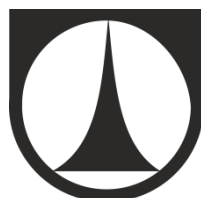


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA SKLÁŘSKÝCH STROJŮ A ROBOTIKY



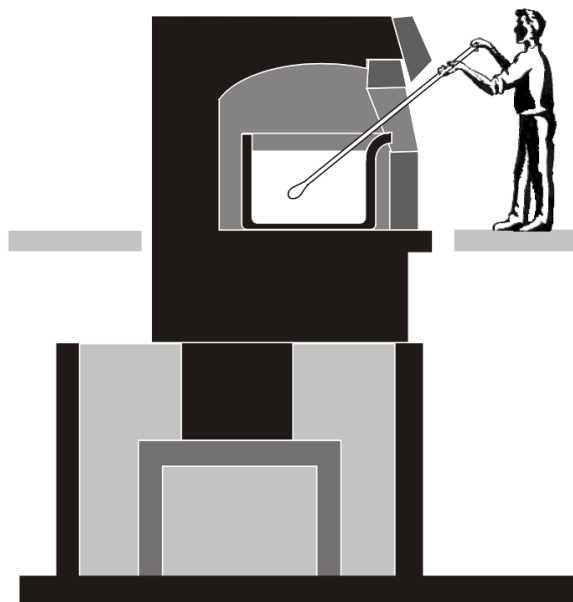
TECHNOLOGIE AUTOMATICKÉ VÝROBY SKLA

Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D.,
doc. Ing. Vladimír Klebsa, CSc.,
Ing. Ivo Matoušek, Ph.D.

2015



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Recenzenti

doc. Ing. Petr Exnar, CSc.

Ing. Jan Macháček, Ph.D.

© Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D.,

doc. Ing. Vladimír Klebsa, CSc.,

Ing. Ivo Matoušek, Ph.D.

ISBN 978-80-7494-237-2

TECHNOLOGIE AUTOMATICKÉ VÝROBY SKLA

Výukový text vznikl na základě zkušeností ve výuce předmětu Technologie skla pro budoucí absolventy inženýrského studia na Katedře sklářských strojů a robotiky. Opírá se o současné poznatky z oboru a zmiňuje některé trendy sklářské technologie.

Skripta jsou určena pro předmět Technologie automatické výroby skla pro studenty 1. ročníku navazujícího studijního programu N2301 Strojní inženýrství, zaměření Sklářské stroje a robotika.

Vytvoření a vydání skript bylo podpořeno projektem OPVK „Zvýšení technických kompetencí absolventů pro průmyslovou praxi“ (Registrační číslo CZ.1.07/2.2.00/28.0311).

© Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D., doc. Ing. Vladimír Klebsa, CSc., Ing. Ivo Matoušek, Ph.D.

Recenzenti	doc. Ing. Petr Exnar, CSc. Ing. Jan Macháček, Ph.D.
Vydavatel	Technická univerzita v Liberci
Schváleno	Rektorátem TUL dne 29. 9. 2015 čj. RE 61/15
Vyšlo	v září 2015
Počet stran	318
Vydání	1.
Náklad	100 kusů
Tiskárna	Vysokoškolský podnik Liberec, spol. s r. o., Studentská 1402/2, Liberec 460 01
Číslo publikace	55-061-15
ISBN	978-80-7494-237-2

Obsah

1	Úvod	13
2	Základní pojmy	17
	2.1 Krystalický, kapalný a skelný stav	17
	2.1.1 Transformační přeměny.....	17
	2.2 Klasifikace skel	19
	2.2.1 Klasifikace podle chemického složení.....	19
	2.2.2 Klasifikace podle způsobu výroby.....	19
	2.2.3 Klasifikace podle účelu použití	20
	2.3 Struktura skel.....	20
3	Vlastnosti skla a skloviny	24
	3.1 Viskozita	24
	3.1.1 Měření viskozity.....	28
	3.2 Povrchové napětí.....	31
	3.3 Krystalizační schopnost	33
	3.4 Další tepelné vlastnosti.....	35
	3.4.1 Teplotní roztažnost	35
	3.4.2 Odolnost proti náhlým změnám teploty.....	40
	3.4.3 Měrná tepelná kapacita	42
	3.4.4 Tepelná vodivost	44
	3.5 Hustota	46
	3.6 Mechanické vlastnosti.....	47
	3.6.1 Modul pružnosti a Poissonova konstanta.....	49
	3.6.2 Pevnost v tahu, tlaku, ohybu a smyku.....	50
	3.6.3 Rázová houževnatost	51
	3.6.4 Tvrdost	52
	3.6.5 Brusná tvrdost	52
	3.6.6 Odolnost proti přetlaku.....	52
	3.6.7 Způsoby zvyšování pevnosti skel.....	52
	3.7 Vnitřní napětí	53
	3.7.1 Přechodné vnitřní napětí.....	53
	3.7.2 Trvalé vnitřní napětí.....	54
	3.8 Elektrické vlastnosti	56
	3.8.1 Elektrická vodivost.....	57
	3.8.2 Dielektrické vlastnosti	59
	3.8.3 Elektrická pevnost	61
	3.9 Optické vlastnosti	62
	3.9.1 Odraz a lom na optickém rozhraní	64
	3.9.2 Disperze světla	69
	3.9.3 Absorpce záření	70
	3.9.4 Rozptyl záření.....	71
	3.9.5 Luminiscence	73
	3.9.6 Fotosenzitivní, fotoplastická, fotochromická a polychromická skla	73
	3.9.7 Dvojlom, polarizace a interference záření.....	73
	3.10 Chemická odolnost.....	74
	3.10.1 Odolnost skla proti vodě	74

	3.10.2	Odolnost skla proti kyselinám	76
	3.10.3	Odolnost skla proti alkáliím	77
4		Sklářské suroviny	78
	4.1	Krátce z historie sklářských surovin	78
	4.2	Požadavky na sklářské suroviny	79
	4.3	Suroviny, kterými se vnášejí do skla sklotvorné oxidy	82
	4.3.1	Oxid křemičitý SiO_2	82
	4.3.2	Oxid boritý B_2O_3	84
	4.3.3	Oxid fosforečný P_2O_5	84
	4.4	Suroviny, kterými se vnášejí oxidy Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , SnO_2	85
	4.4.1	Oxid hlinitý	85
	4.4.2	Oxid titaničitý	85
	4.4.3	Oxid zirkoničitý	85
	4.4.4	Oxid cíničitý	85
	4.5	Suroviny, kterými se vnášejí oxidy kovů alkalických zemin a kovů stabilizujících sklovinu	86
	4.5.1	Oxid vápenatý	86
	4.5.2	Oxid hořečnatý	86
	4.5.3	Oxid olovnatý	87
	4.5.4	Oxid barnatý	87
	4.5.5	Oxid zinečnatý	88
	4.5.6	Oxid strontnatý	88
	4.6	Suroviny, kterými se vnášejí oxidy alkalických kovů	88
	4.6.1	Oxid sodný	88
	4.6.2	Oxid draselný	89
	4.6.3	Oxid lithný	89
	4.7	Barvicí suroviny	90
	4.7.1	Barviva iontová s jedním oxidačním stupněm	90
	4.7.2	Barviva iontová se dvěma a více oxidačními stupni	90
	4.7.3	Barviva molekulární	92
	4.7.4	Barviva koloidní	93
	4.8	Kalicí suroviny	94
	4.8.1	Fluoridy	94
	4.9	Čeřicí suroviny	95
	4.9.1	Síranové čeření	95
	4.9.2	Oxidové čeření	95
	4.10	Urychlovače tavení	96
	4.11	Střepy	96
	4.12	Příklady složení skla	96
5		Příprava sklářského kmene a vsázky	97
	5.1	Kontrola a příjemka surovin	97
	5.2	Skladování a manipulace se sklářskými surovinami	97
	5.3	Úprava surovin	99
	5.4	Vážení a dávkování surovin	99
	5.5	Mísení kmene	102
	5.6	Střepové hospodářství, recyklace	104
	5.7	Úprava kmene	107

	5.8 Kmenárny	107
6	Zakládání vsázky	112
7	Tavení skla	116
	7.1 Vývoj STA v historickém kontextu	116
	7.2 Úvod do teorie tavení skla	117
	7.2.1 Vlastní tavení	118
	7.2.2 Čerění skloviny	120
	7.2.3 Homogenizace a proudění skloviny	122
	7.2.4 Sejití skloviny	124
	7.2.5 Další důležité pochody a děje při tavení	124
	7.2.6 Činitelé ovlivňující dobu tavení	125
	7.3 Energetická náročnost produkce skleněných výrobků	126
	7.3.1 Tepelná bilance STA	126
	7.3.2 Regenerátory, rekuperátory a další zařízení pro snižování energetické náročnosti	132
	7.4 Rozdělení tavicích agregátů	134
	7.5 Tavení v pánvových pecích	135
	7.6 Tavení ve vanových pecích	138
	7.6.1 Kontinuální STA plamenné	139
	7.6.2 Kontinuální STA celoelektrické	145
	7.6.3 Kontinuální STA s elektrickým přihřevem	150
	7.7 Kyslíkové tavení	151
	7.8 Konstrukční prvky STA	153
	7.9 Vyzdívka STA	154
	7.10 Řídicí systémy, hořáky	156
	7.11 Speciální tavicí zařízení	158
	7.11.1 Kelímkové středo- a vysokofrekvenční pece	158
	7.11.2 Tavení křemenného skla grafitovými elektrodami	158
	7.11.3 Vysoko- a středofrekvenční tavení čirého křemenného skla	158
8	Dávkování skloviny	160
	8.1 Žlaby dávkovačů	161
	8.2 Dávkovače kapkové	164
	8.2.1 Plunžrový dávkovač	164
	8.2.2 Kulový naběrač	167
	8.2.3 Sací naběrač	168
	8.3 Dávkovače výtokové	170
	8.3.1 Kontinuální výtoky	170
	8.3.2 Platinové homogenizátory	170
9	Tvarování skloviny	172
	9.1 Vývoj technologií tvarování v historickém kontextu	172
	9.2 Základní principy tvarování skla	175
	9.3 Tvarování skloviny lisováním a mačkáním	177
	9.3.1 Lisování skloviny	178
	9.3.2 Lisovstřík	185
	9.3.3 Mačkání skloviny	186
	9.4 Tvarování obalového skla	191
	9.4.1 Sacofoukací technologie	191

9.4.2	<i>Dvakrát sací technologie</i>	192
9.4.3	<i>Technologie pracující s dávkou</i>	192
9.5	Tvarování tenkostěnného skla	200
9.5.1	<i>Technologie výroby na strojích typu M</i>	201
9.5.2	<i>Technologie strojů typu H-28</i>	203
9.5.3	<i>Technologie konvejerového (stužkového) stroje</i>	204
9.6	Technologie výroby plochého skla	205
9.6.1	<i>Technologie tažení skla</i>	205
9.6.2	<i>Technologie lití</i>	208
9.6.3	<i>Technologie plavení (FLOAT)</i>	210
9.7	Technologie výroby trubíc a tyčí.....	215
9.7.1	<i>Lití mačkárenských tyčí</i>	215
9.7.2	<i>Horizontální tažení (způsob Danner)</i>	216
9.7.3	<i>Vertikální tažení tyčí a trubíc směrem dolů</i>	217
9.7.4	<i>Vertikální tažení trubíc směrem nahoru</i>	219
9.7.5	<i>Tažení rokajlových trubiček</i>	219
9.8	Technologie výroby skleněných vláken	220
9.8.1	<i>Technologie mechanického tažení skleněného rajónu</i>	221
9.8.2	<i>Technologie odstředivého tvarování staplu</i>	223
9.8.3	<i>Tažení plynným médiem</i>	224
9.8.4	<i>Kombinované způsoby</i>	225
9.8.5	<i>Technologie výroby optických vláknových vlnovodů</i>	228
9.9	Technologie tvarování skloviny odstředivým litím.....	229
9.9.1	<i>Odstředivé tvarování se svislou osou rotace</i>	229
9.9.2	<i>Odstředivé tvarování s vodorovnou osou rotace</i>	230
9.10	Technologie výroby zvláštních výrobků	231
9.10.1	<i>Výroba kuliček</i>	231
9.10.2	<i>Výroba balotiny</i>	231
9.10.3	<i>Výroba pěnového skla</i>	233
9.10.4	<i>Výroba sintrovaného skla</i>	233
9.11	Sklářské formy	234
9.11.1	<i>Používané materiály</i>	236
9.11.2	<i>Konstrukce forem</i>	237
9.11.3	<i>Výroba forem</i>	237
9.11.4	<i>Způsoby chlazení sklářských forem</i>	238
10	Chlazení skla	240
10.1	Chladicí postup	240
10.2	Chladicí pece	243
10.2.1	<i>Komorové chladicí pece</i>	243
10.2.2	<i>Tunelové chladicí pece</i>	243
10.3	Další postupy chlazení	245
10.4	Určování napětí ve skle	245
11	Zpracování a zušlechťování skla	247
11.1	Mechanické postupy.....	248
11.1.1	<i>Dělení skla</i>	248
11.1.2	<i>Vrtání skla</i>	252
11.1.3	<i>Broušení a leštění skla</i>	257

11.1.4	<i>Pískování a mechanické matování</i>	269
11.1.5	<i>Rytí</i>	270
11.1.6	<i>Šitlování, rumplování a sekání</i>	270
11.2	<i>Tepelné postupy</i>	273
11.2.1	<i>Pukání</i>	273
11.2.2	<i>Zapalování</i>	276
11.2.3	<i>Odtavování</i>	276
11.2.4	<i>Dělení, vrtání a dekorování laserem</i>	276
11.2.5	<i>Tvrzení a ohýbání plochého skla</i>	278
11.2.6	<i>Leštění teplem</i>	280
11.2.7	<i>Kulacení</i>	282
11.2.8	<i>Nabíhání barev a dokalování</i>	283
11.3	<i>Chemické postupy</i>	284
11.3.1	<i>Chemické leštění, leptání a matování</i>	284
11.3.2	<i>Zpevňování skla iontovou výměnou</i>	287
11.3.3	<i>Nanášení vrstev na sklo</i>	288
11.3.4	<i>Spojování – lepení</i>	301
11.4	<i>Zvláštní techniky zpracování a zušlechťování</i>	302
11.4.1	<i>Vrstvené ploché sklo</i>	302
11.4.2	<i>Skla se zvýšenou odolností proti ohni</i>	304
11.4.3	<i>Sklo pro solární aplikace</i>	304
11.4.4	<i>Autoskla</i>	306
11.4.5	<i>Další technologie a výrobky</i>	308
12	Vady skla a skleněných výrobků	310
12.1	<i>Vady vznikající při výrobě skloviny až po její přípravu ke tvarování</i>	310
12.1.1	<i>Kamínky</i>	310
12.1.2	<i>Skelné nehomogenity – šlíry</i>	310
12.1.3	<i>Plynné nehomogenity ve skle – bubliny</i>	311
12.1.4	<i>Vady zabarvení skloviny</i>	311
12.2	<i>Vady vznikající při tvarování</i>	311
12.3	<i>Vady vznikající při chlazení skla</i>	311
12.4	<i>Vady vznikající při zpracování a zušlechťování skla</i>	312
12.5	<i>Vady dodatečné</i>	312
13	Kontrola jakosti	313
13.1	<i>Kontrola jakosti při výrobě plochého skla technologií plavení</i>	313
13.2	<i>Kontrola jakosti při výrobě obalového skla</i>	314
14	Závěr	315
	Literatura	316

Poděkování

Na tomto místě by chtěl tým autorů poděkovat za účinnou pomoc při přípravě těchto skript kolegům z katedry a fakulty, akademickým pracovníkům z dalších univerzit a odborníkům z průmyslové praxe. Jmenovitě je možné zmínit pana doc. Ing. Františka Novotného, CSc. za poskytnutí podkladů, Ing. Ondřeje Matúška a Petra Voleníka za pomoc při získávání podkladů a tvorbě schémat, Ing. Alenu Horákovou a Ing. Adama Hotaře, Ph.D. za odbornou korekturu. Dále děkujeme recenzentům této práce, doc. Ing. Petru Exnarovi, CSc. (Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická, Technická univerzita v Liberci) a Ing. Janu Macháčkovi, Ph.D. (Ústav skla a keramiky, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze).

Vytvoření učebního textu bylo podpořeno projektem OPVK „Zvýšení technických kompetencí absolventů pro průmyslovou praxi“, TKMOST (registrační číslo CZ.1.07/2.2.00/28.0311). Projekt s názvem TKMOST vznikl jako reakce na požadavky průmyslových podniků, které v současné době trpí nedostatkem kvalifikovaných zaměstnanců, jak pro oblast průmyslového vývoje a výzkumu, tak pro řízení a kontrolu výroby.

Projekt je financován z Operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost a spolufinancován z Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu České republiky. Cílem projektu je modernizace formy výuky v jednotlivých předmětech v bakalářských a magisterských programech v oborech zaměřených na konstrukci a aplikovanou mechaniku. Tato intenzivní obměna stávající náplně předmětů by měla být vedena s důrazem na aktuálnost, vysokou kvalitu a atraktivitu s akcentem na flexibilitu, kreativitu a konkurenceschopnost absolventa na trhu práce. Délka projektu: 23. 4. 2013 - 30. 9. 2015.

Předmluva

Učební text je určen studentům 1. ročníku navazujícího studijního programu N2301 Strojní inženýrství, zaměření Sklářské stroje a robotika. Cílem je seznámit studenty se základy současné sklářské technologie s důrazem na používaná zařízení a stroje. Rozsah skript odpovídá současné rozmanitosti výroby skla a zahrnuje základní informace o technologiích.

Obsah studijních textů je nejprve věnován samotné definici skla a skloviny, struktuře a klasifikaci skel. Následují vlastnosti skla a skloviny a suroviny pro výrobu skla. V další části je učebnice členěna na základě technologických operací od počátku výroby až po finální úpravy, tedy od přípravy sklářského kmene, přes zakládání, tavení, dávkování, tvarování, chlazení až po zpracování a zušlechťení. Poslední kapitoly jsou krátce věnovány vadám a kontrole jakosti.

Při studiu se předpokládá znalost chemie, fyziky a matematiky na úrovni strojního bakaláře a inženýra.

1 Úvod

Rozsah současné sklářské výroby je umožněn díky plně automatizovaným strojům a zařízením, pokročilým technologiím a komplikovaným linkám. Moderní sklářské provozy jsou automatizované, často robotizované, čisté, vyrábějí velké objemy a moderní skláři v nich často sedí ve velínu u počítačů.

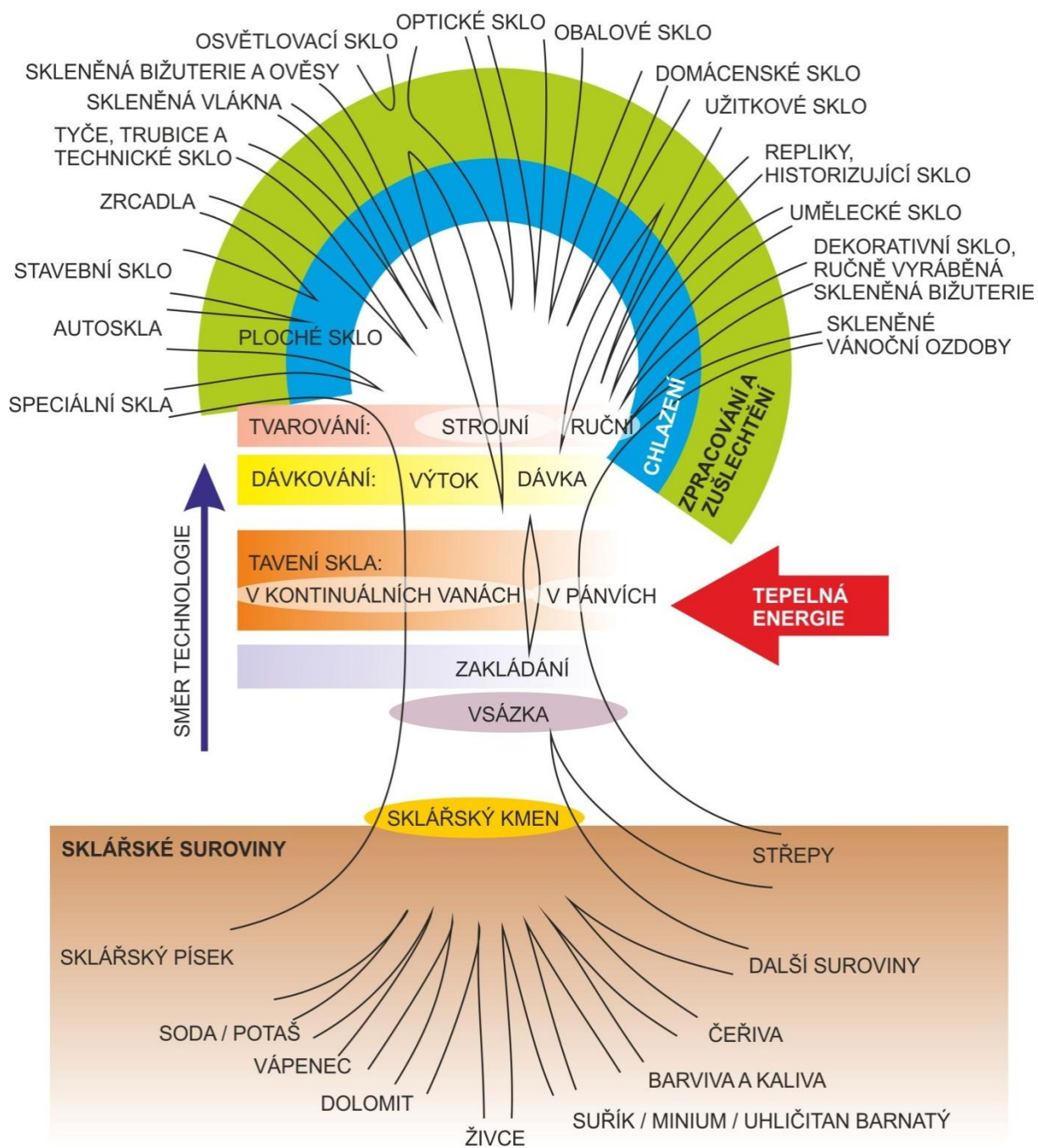
Sklářská výroba prošla v minulosti velkými změnami nejen v technologii, ale i ve vnímání skla jako materiálu. Sklo se v průběhu dvou tisíciletí přeměnilo z ojedinělého materiálu, vyvažovaného i zlatem, na materiál běžný. V dávné historii byly skleněné výrobky považovány za exkluzivní zboží, které bylo výsadou jen prominentních a bohatých jednotlivců. S tím, jak se zdokonalovala technologie, stávalo se sklo levnějším a dostupnějším. Sklo začalo postupně nahrazovat některé materiály, jako například v případě obalového skla kameninu, která byla postupem času (nejen) sklem úplně nahrazena. Sklo se začalo používat jako imitace drahokamů a polodrahokamů, až bylo nakonec vyčleněno samostatné odvětví: skleněná bižuterie, kterou si může dovolit každý. Za touto přeměnou stojí pokrokové změny v technologii, například vynález sklářské píšťaly v prvním století před naším letopočtem, mechanizace, která umožnila zefektivnit produkci, zavádění jednoduchých strojů na začátku průmyslové revoluce, automatické stroje, jako je Owensův stroj na výrobu lahví z počátku 20. století, až po výkonné linky, umožňující produkci dostupných výrobků ze skla. Postupem času se stávají sklářské linky velmi drahými, ale díky velkým objemům výroby umožňují vyrábět relativně levné výrobky, konkurenceschopné vůči jiným materiálům.

Pokrok ve sklářství byl a je ovlivněn vývojem technologií, a to jak sklářských, tak i technologií, které jsou u strojů a zařízení používány a nesouvisí přímo s technologií skla. Hlavními impulzy pro výzkum, vývoj a nasazení nových a často převratných strojů byly a jsou snahy zavést technologie, které umožní vyrábět výrobek ve větších objemech, často za nižší jednotkové ceny a případně také vedou ke zvýšení kvalitativních vlastností výrobků ze skla.

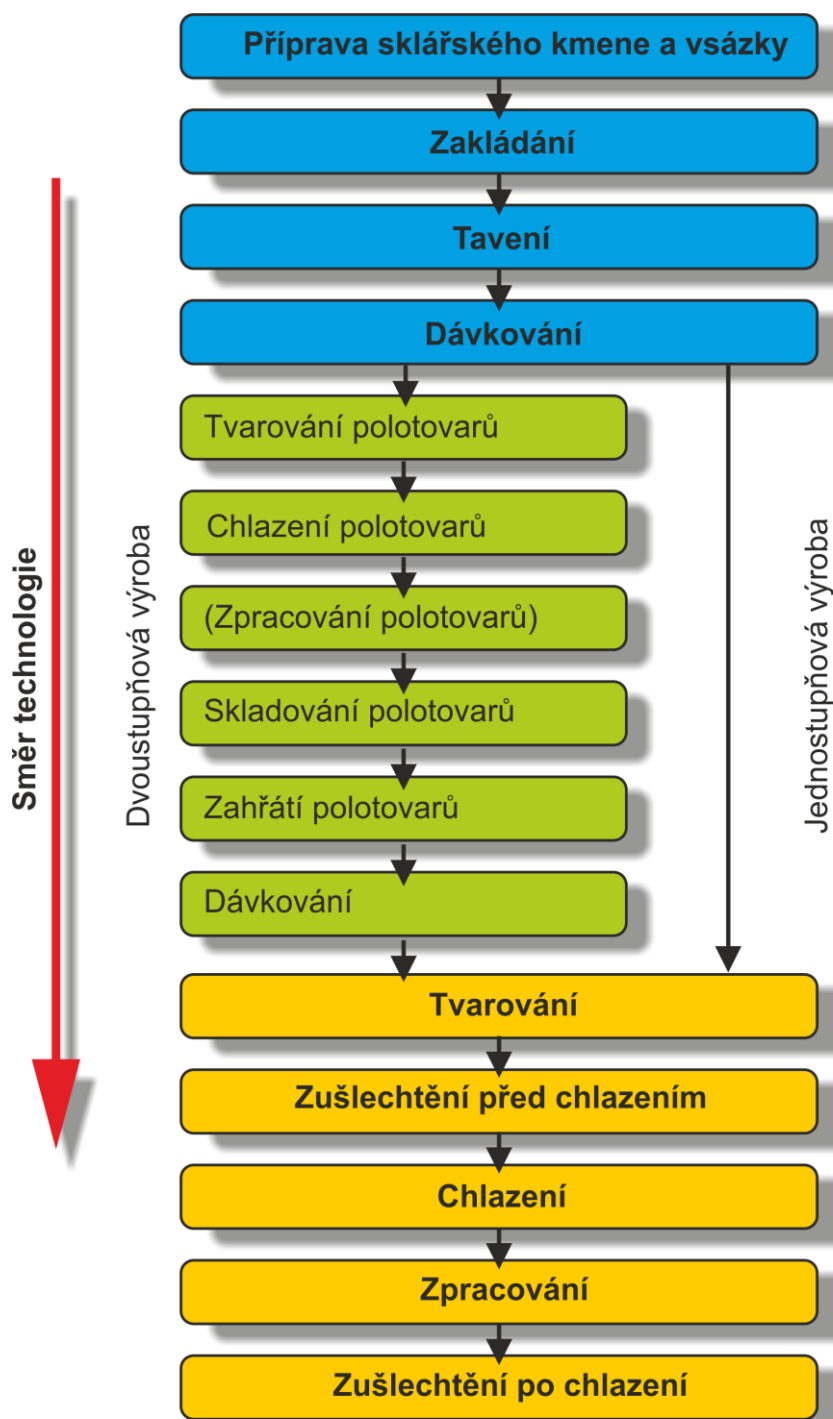
Běžnou sklářskou technologii lze zobrazit technologickým sklářským stromem (Obr. 1.1). Většinou se používá podobné základní suroviny a v případě nejběžnějších skel je hlavní surovinou sklářský písek. Tato skla jsou označována jako křemičitá skla. Další důležité suroviny jsou soda, potaš, vápenec a další. Směs sklářských surovin bez střepek je nazývána **sklářský kmen** a spolu se střepek **sklářská vsázka**. Po přípravě vsázky následuje zakládání do tavicích agregátů, tavení a dávkování skloviny. Navazuje tvarování skloviny, její chlazení a zušlechťení skleněných výrobků. Výroba jednotlivých produktů se liší ve složení a množství potřebných sklovin, v dávkovacích a tvarovacích technologiích, množství chlazených výrobků a v široké škále následného zpracování, zušlechťení a použití. Jak je zřejmé z Obr. 1.1, existuje celá škála výrobků ze skla s širokým využitím od čistě technického uplatnění až po čistě dekorativní výrobky.

Většina sklářských technologií vychází ze základního principu výroby skleněných produktů, Obr. 1.2. Budoucí výrobek musí projít jednotlivými fázemi technologie a vzhledem k výše uvedenému se lze vždy setkat s využitím zařízení a strojů. Pro jednotlivé výrobky se stroje a zařízení často zásadně liší, přestože základní princip zůstává zachován.

SKLÁŘSKÝ TECHNOLOGICKÝ STROM



Obr. 1.1 Sklářský technologický strom



Obr. 1.2 Základní princip sklářské technologie s rozdělením jednostupňové a dvoustupňové výroby

Obecně lze také dělit výrobu na jednostupňovou a dvoustupňovou. Dvoustupňová výroba je charakteristická výrobou polotovaru, který je ochlazen, skladován, tzv. prvovýroba. Polotovar je pak následně dál zpracováván opětovným nahřátím do plastického stavu, případně i roztaven, následně dávkován a nakonec znovu tvarován. Tento princip výroby je charakteristický především pro starší technologie, speciální technologie a nízkoobjemové technologie, kdy se nevyplatí pro malé množství výrobků volit jednostupňovou výrobu.

Při jednostupňové výrobě je vynechána mezioperace chlazení polotovaru, proto je obecně možno dosáhnout nižších nákladů, neboť se šetří energie na ochlazování a opětovné zahřívání, zkracuje se výrobní čas, snižuje se cena za následné tvarování, manipulaci a skladování. Jednostupňová výroba je výrobou moderní a je určená pro velké objemy výrobků. Ne vždy je z technologického hlediska možné jednostupňovou výrobu pro určitý typ výrobků zavést. V současné době není také dostatečně flexibilní, a proto není vhodná pro malé objemy výrobků.

Velmi důležitým technologickým krokem je samotné tavení. V zásadě pracují sklárny na dvou základních principech technologií tavení. Jedná se o periodické – přetržité tavení (v pánvích a denních vanách) a kontinuální – nepřetržité tavení (v kontinuálních vanách). U pánvového tavení a tavení v denní vaně se cyklus tavby opakuje v denních cyklech. U kontinuálních van (sklářských tavicích agregátů, STA) je proces kontinuální, bez přerušení (více v kap. 7.6). Tyto dva základní principy se liší nejen tavbou samotnou, ale i zakládáním vsázky, dávkováním a tvarováním skloviny. S tím souvisí i odlišná mechanizace, automatizace, jiné stroje a zařízení. Jednoznačně se také odlišují objemem produkce a rozmanitostí výrobků.

2 Základní pojmy

Sklo je svým chováním, strukturou, vlastnostmi i výrobou a konec konců i způsoby použití, zvláštní materiál. Sklo patří mezi látky pevné, přičemž jsou rozlišovány základní stavy hmoty, pevný, kapalný, plynný a plazmatický.

2.1 Krystalický, kapalný a skelný stav

Látky krystalické jsou charakterizovány periodicky se opakující vnitřní stavbou. Tato periodicitu se může projevovat i na „velkou“ vzdálenost a pak hovoříme o monokrystalu. Další charakteristickou vlastností krystalických látek je, že při zahřátí nad bod tání vytvoří taveninu většinou o relativně nízké viskozitě. U těchto látek s pravidelnou vnitřní strukturou se vyskytují určité vady (poruchy mřížky), které jsou charakterizovány, klasifikovány a do jisté míry i využívány. Jedná se o poruchy bodové, čárové (dislokace), plošné (hranice bloků v mozaikové struktuře) a objemové.

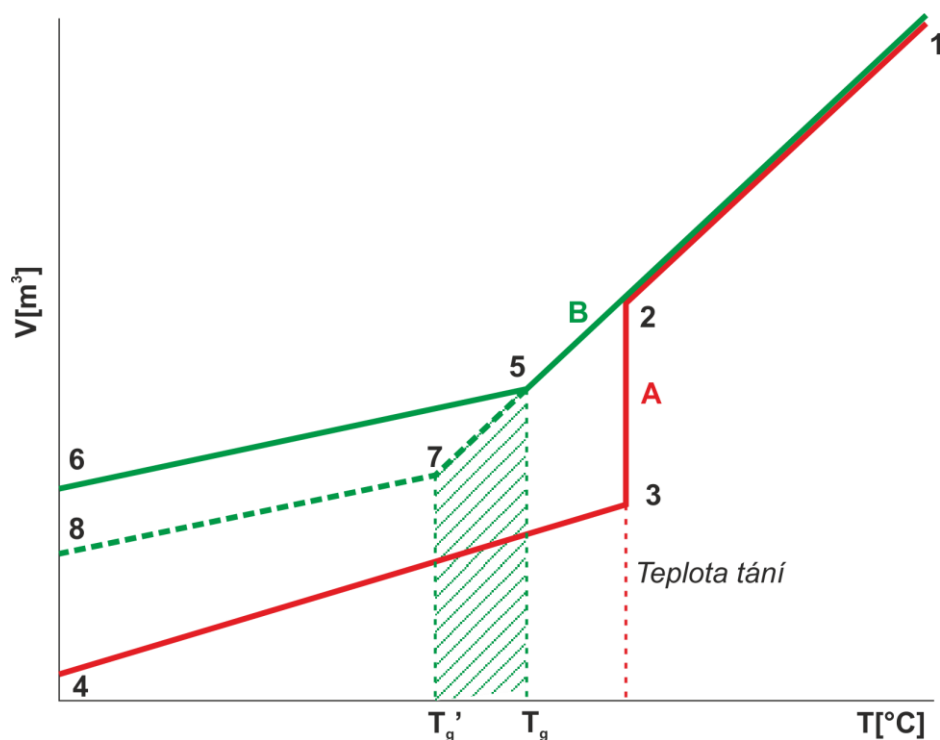
Na rozdíl od látek krystalických existují látky ve **skelném stavu**, u nichž se jedná o neuspořádané seskupení základních stavebních jednotek (molekul nebo iontů), jejichž podoba s látkami krystalickými se týká zejména mechanických vlastností. Tyto látky při zahřívání (nelze říci k bodu tavení) postupně ztrácejí pevnost, měknou a postupně se začínají chovat jako silně viskózní kapaliny, jejichž viskozita při rostoucí teplotě klesá. Charakteristickou vlastností látek ve skelném stavu je existence transformační oblasti, kterou je možno nazvat také oblastí skelného přechodu – zesklenní. Při podrobném studiu vnitřní stavby skel lze však i u nich nalézt ostrůvkové oblasti s určitou mírou pravidelnosti vnitřního uspořádání, jedná se o pravidelnost na tzv. „malou“ vzdálenost, jinými slovy – jejich míra vnitřní pravidelnosti vykazuje tzv. krátkodosahové uspořádání. Kromě skel vykazují podobnou charakteristiku i další látky, jako např. asfalt, vosk, řada vysokomolekulárních látek, ale i kovy v amorfním stavu, tedy kovová skla aj. Při pokusu o stručné shrnutí poznatků o skelném stavu, jehož studium je náročné, vyžaduje moderní metody a neustále probíhá, je možné bez obav o správnost použít definici, kterou formuloval svého času M. Fanderlík a která zní: *skla jsou látky v amorfním stavu (tj. nemající znaky krystalové mřížky), které jeví při přechodu z pevné konzistence ve viskózně plastickou a opačně, transformační přeměny.*

2.1.1 Transformační přeměny

Většina anorganických látek vytvoří při zahřátí nad bod tání taveninu o velmi nízké viskozitě, při postupném odebrání tepla u nich dojde ke krystalizaci. Jiné látky pozvolna měknou a přecházejí ve značně viskózní taveniny, které lze snadno přechladit a za zvyšování viskozity u nich nedochází ke krystalizaci, ale vznikne sklo. Toto je možné demonstrovat na závislosti objemu a teploty obou typů látek (Obr. 2.1).

Je-li ochlazována tavenina, objem se plynule zmenšuje z bodu 1 až do bodu 2 (teplota tuhnutí). V případě krystalických látek v bodě 2 dojde při dostatečně pomalém ochlazení ke spontánní krystalizaci. Pokles teploty se zastaví a objem látky se v důsledku fázové přeměny (krystalizace) změní skokem. Jakmile veškerá tavenina přejde v krystaly (bod 3), jejich objem se dále zmenšuje do bodu 4.

Při skelném tuhnutí je počáteční průběh shodný až do bodu 2. V bodě 2 však ke krystalizaci nedojde a objem se zmenšuje plynule až do bodu 5. V úseku mezi body 2 – 5 se jedná o přechlazenou kapalinu. Od bodu 5 do bodu 6 je zřejmá změna v chování látky, jejíž objem se zmenšuje pomaleji. Teplota T_g odpovídající bodu 5 se nazývá transformační teplota anebo též teplota zesklenní. V odborné sklářské terminologii je nazývána tavenina nad teplotou T_g sklovinou, pod teplotou T_g je používán termín sklo.



Obr. 2.1 Schematické znázornění změny objemu s teplotou: A - tuhnutí s krystalizací (1-2-3-4), B - skelné tuhnutí: - pomalé ochlazování (1-5-7-8), rychlé ochlazování (1-5-6)

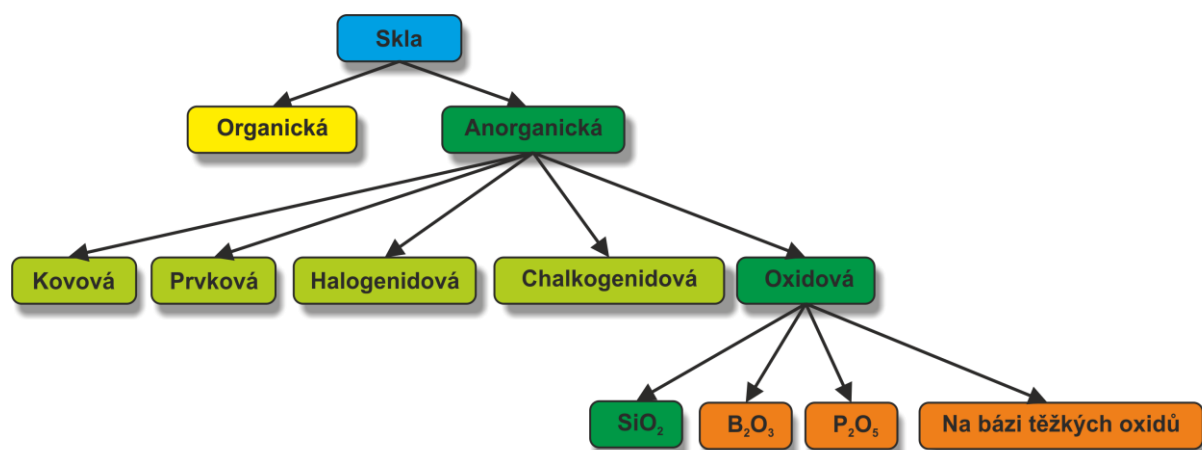
Jestliže se tavenina, nacházející se v bodě 1, bude ochlazovat zřetelně pomaleji, aniž by došlo ke krystalizaci, dojde ke změně v chování zkoumané látky až při teplotě o něco nižší (bod 7), která je označena T_g' . Konečný objem soustavy v bodě 8 bude tedy menší než v bodě 6, který přísluší větší rychlosti ochlazování. Z tohoto průběhu lze usuzovat na skutečnost, že vlastnosti skla jsou pod transformační teplotou T_g závislé na jeho tepelné historii. Oblast teplot mezi T_g' a T_g se nazývá transformační interval nebo také interval zesklenní. Rychlost ochlazování a tedy i proběhlá transformace ovlivňují i většinu vlastností (různou měrou, významněji např. index lomu).

2.2 Klasifikace skel

Pro klasifikaci skel je možno uplatňovat více hledisek. Pro účely těchto skript jsou zvolena hlediska následující: chemické složení, způsob výroby a účel použití.

2.2.1 Klasifikace podle chemického složení

Podle chemického složení sklo tvoří dvě velké skupiny látek. Jednak jsou to skla organická (např. polymethylmetakrylát), na druhé straně skla anorganická, Obr. 2.2. Těmi se tento text bude podrobněji zabývat, protože anorganická skla tvoří materiálový základ většiny vyráběných skleněných komodit. Sklo může být tvořeno za určitých okolností prvky (S, Se, P, As), oxidy, halogenidy, chalkogenidy i kovy, nejširší průmyslové využití však mají skla tvořená oxidy, tedy skla oxidová.



Obr. 2.2 Klasifikace skel podle chemického složení

Některé oxidy mohou tvořit sklo samy o sobě, to jsou oxidy sklotvorné. Patří sem především oxid křemičitý SiO_2 , oxid boritý B_2O_3 , oxid fosforečný P_2O_5 a některé další. Jiné oxidy mohou tvořit sklo pouze v kombinaci s jinými oxidy (např. oxid hlinitý Al_2O_3), kromě toho se stavby skla mohou účastnit i oxidy další, lze je nazvat modifikující, jejichž přítomnost ovlivňuje strukturní síť a konečné vlastnosti skel. V dalším textu budou pod pojmem sklo považována skla křemičitá, u nichž hlavním sklotvorným oxidem je oxid křemičitý, podle kterého rozlišujeme třídu skel křemičitých. Skla při tom považujeme za vícesložkové soustavy, kde hlavní složkou je oxid sklotvorný (křemičitý), další složky tvoří oxidy modifikující. Podle počtu oxidů (složek) rozlišujeme skla jednosložková tvořená jedním oxidem (musí být sklotvorný), příkladem je sklo křemenné tvořené skelným oxidem křemičitým, dále skla vícesložková tvořená dvěma nebo více oxidy, z nichž alespoň jeden musí být sklotvorný. Tato skla jsou materiálem pro výrobu převažující většiny skleněných komodit.

2.2.2 Klasifikace podle způsobu výroby

Tato část je omezena na výčet nejčastěji používaných výrobních technologií, podle nichž skupiny výrobků nazýváme. Jsou to skla litá, lisovaná, tažená, foukaná, skleněná bižuterie a některá další.

2.2.3 Klasifikace podle účelu použití

Na tomto místě budou uvedeny aplikační oblasti vyráběných skel, velice zhruba řečeno, podle významu použití v praxi.

Skla obalová: široko- i úzkohrdlé skleněné obaly z barevného (zpravidla zeleného a hnědého) nebo čírého, tzv. „bílého“ skla.

Skla stavební: jednoduché okenní sklo, skla izolační (tepelně a/nebo zvukově), plochá skla opatřená funkčními povlaky, celoskleněné prvky (dveře apod.), tvarovaná stavební skla (skleněné tvárnice, ohýbaná skla), skla protipožární a bezpečnostní (i vrstvená s fólií), dekorační (barvená, pískovaná, opatřená reliéfem), skla pochozí, zrcadla a další.

Skleněná vlákna: izolační vlákna (tepelné, akustické a elektrické izolační materiály), světlovody, výztužná textilní vlákna (textilie pro výrobu skelných laminátů aj.).

Automobilová skla: ohýbaná, vrstvená a tvrzená.

Užitkové sklo: nápojové, varné, dekorační.

Chemické sklo: velice široká škála laboratorních potřeb, jednoúčelové aparatury.

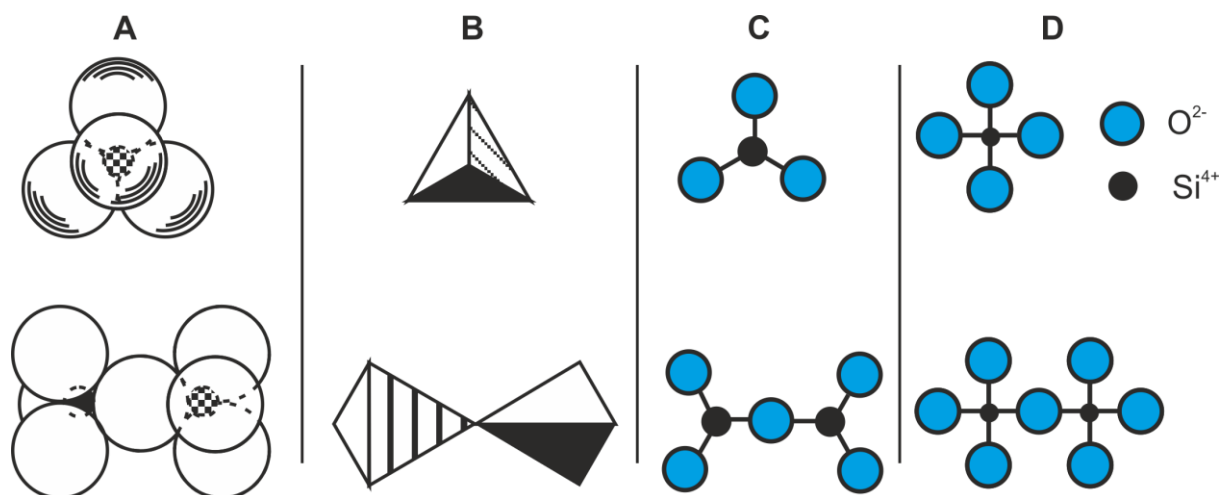
Technické a optické sklo: sklo osvětlovací, žárovkové baňky, čočky pro optické soustavy, brýlová skla, displeje a obrazovky.

Speciální skla: křemenné sklo číré a opakní, pěnové sklo, skla bioaktivní, skla pro vitrifikaci radioaktivních odpadů, skelně krystalické materiály aj.

Umělecké a dekorativní sklo, skleněná bižuterie, figurky, plastiky apod.

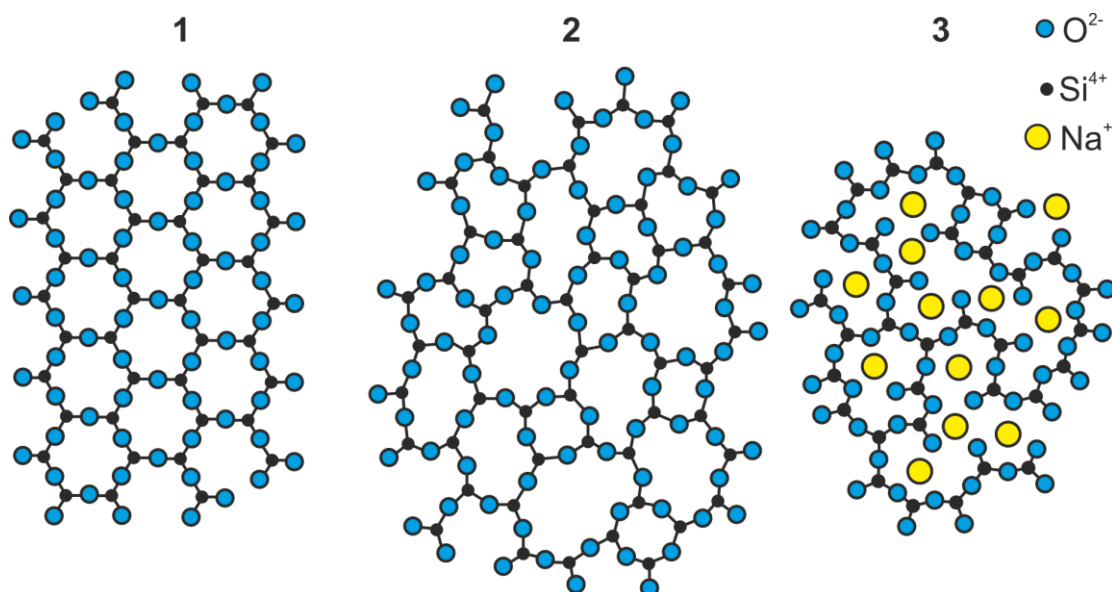
2.3 Struktura skel

Názory na strukturu skla prošly dlouhým vývojem. Základní představy formuloval Zachariasen (teorie neuspořádané mřížky) a Lebeděv (teorie krystalitová). Zachariasenova teorie předpokládá existenci strukturní mřížky vytvořené základními strukturními elementy, kterými jsou tetraedry SiO_4^{4-} , Obr. 2.3. Tato strukturní síť je na rozdíl od struktury krystalického SiO_2 nepravidelná, neboť došlo k „zamrznutí“ struktury neuspořádané taveniny. Modifikátory (především oxidy alkalických kovů a kovů alkalických zemin) generují nemůstkové kyslíky a snaží si vybudovat výhodnou koordinační sféru. Jejich přítomnost způsobuje přerušení některých vazeb mezi atomy kyslíku a křemíku, způsobuje nepravidelnost sítě tetraedrů a umožňuje vznik dutin, v nichž jsou umístěny kationty zmíněných kovů.



Obr. 2.3 Zobrazení tetraedru SiO_4^{4-} , možné zobrazení jednoho tetraedru a dvou spojených můstkovým kyslíkem, A – pomocí modelu, B – schematické zobrazení s vyznačením polohy tetraedru, C – plošné zobrazení s nevyznačeným kyslíkem v ose kolmé na stránku, D – plošné zobrazení se všemi kyslíky v rovině

Z předchozího vyplývá, že základní strukturální jednotkou křemičitých skel je čtyřstěn SiO_4^{4-} , v jehož těžišti se nachází atom křemíku a v jehož čtyřech vrcholech leží atomy kyslíku. Jednotlivé tetraedry jsou mezi sebou spojeny svými vrcholy, tedy atomem kyslíku, který je společný dvěma sousedním tetraedrům (tzv. můstkové kyslíky, Obr. 2.3). V případě přítomnosti dalších kationtů (sodíku, draslíku, vápníku aj.), dochází k přerušení vazby můstkovými kyslíky a na nemůstkovém kyslíku zůstává záporný náboj, kompenzovaný příslušnými kationty. Tím dochází k rozvolnění sítě tetraedrů a rušení kyslíkových můstků. Důsledkem přítomnosti nemůstkových kyslíků je, mimo jiné, snížení tavicí teploty. Na Obr. 2.4 je znázorněno porovnání struktury krystalického SiO_2 (1), skelného SiO_2 (2) a sodnokřemičitého skla (3).



Obr. 2.4 Struktura krystalického SiO_2 , skelného SiO_2 a sodnokřemičitého skla

Studiem struktury se zabýval i Stevels, který zavedl čtyři strukturní parametry, X , Y , Z a R , kterými hodnotil, mimo jiné, „pevnost“ struktury skla. Parametr Y podle Stevelse udává střední počet můstkových kyslíků na tetraedr a jeho velikost (četnější propojení tetraedrů SiO_4 ve struktuře) zvyšuje i teplotu tavení příslušného skla. Jím zavedené parametry jsou následující:

- X ... střední počet nemůstkových kyslíků na čtyřstěn (obecně polyedr),
- Y ... střední počet můstkových kyslíků na polyedr,
- Z ... střední počet všech kyslíků na polyedr (tj. koordinací číslo síťotvořice),
- R ... poměr celkového počtu kyslíků k celkovému počtu síťotvořičů (křemíků).

Mezi těmito čtyřmi strukturními parametry platí následující vztahy:

$$\begin{aligned} X + Y &= Z \\ X + \frac{1}{2}Y &= R \end{aligned} \quad (2.1)$$

Což lze přepsat do vztahů:

$$\begin{aligned} X &= 2R - Z \\ Y &= 2Z - 2R. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Jsou-li základními polyedry čtyřstěny (např. SiO_4^{-4}) je hodnota $Z = 4$. Parametr R lze snadno vypočítat z molárního složení skla. Jsou-li známy hodnoty parametru Z a R , je možné pomocí výše uvedených vztahů vypočítat parametry zbývající, tedy X a Y .

Příklad:

<i>Molární složení skla:</i>	$2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$,
<i>protože se jedná o sklo křemičité</i>	$Z = 4$
<i>parametr R z definice</i>	$R = \frac{15}{6} = 2,5$
<i>ze vztahu</i>	$X = 2R - Z = 5 - 4 = 1$
<i>ze vztahu</i>	$Y = Z - X = 3$

Hodnota parametru $Y = 3$ říká, že v průměru tři kyslíky v jednom polyedru jsou můstkové. Tento příklad je jednoduchý. U většiny průmyslových skel hodnota parametru Y nevychází celočíselná (např. pro složení skla $\text{Na}_2\text{O} \cdot 4\text{SiO}_2$), některé ionty se mohou chovat anomálně a vypočtené hodnoty mohou být zkreslené.

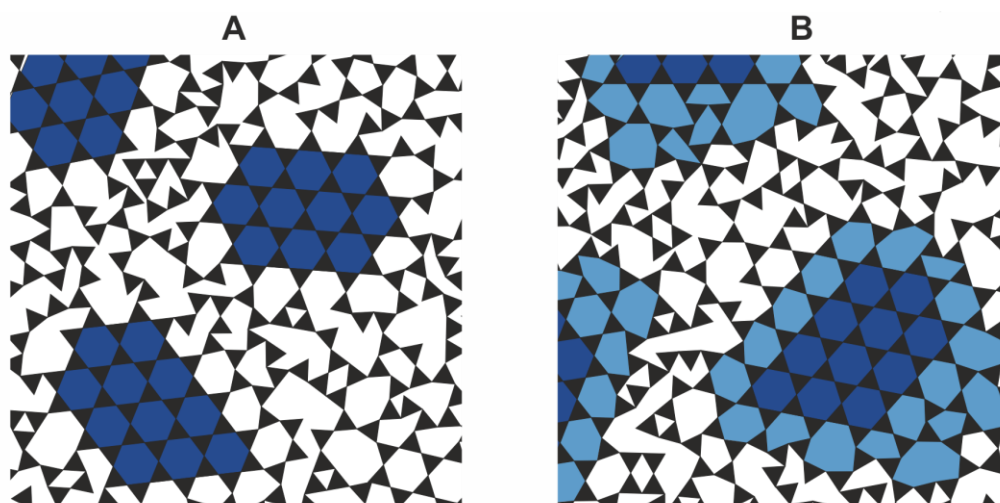
Střední počet můstkových kyslíků na polyedr (tedy hodnota parametru Y) má značný vliv na řadu vlastností skla. Ze strukturního pohledu je zřejmé, že rostoucí hodnota parametru Y představuje pevnější a kompaktnější propojení polyedrů ve struktuře skla, což může znamenat například to, že sklo podobného složení, ale s vyšší hodnotou parametru Y má vyšší tavicí teplotu. Několik příkladů je pro názornost shrnuto do tabulky. Zkoumaná skla budou blízká svým chemickým složením (z hlediska kvalitativního), ale měnící se poměr oxidů bude mít vliv na hodnotu parametru Y , tedy i na některé vlastnosti skla.

Tab. 2.1 Vliv parametru Y na vybrané vlastnosti skla

Složení skla	Y	Tavicí teplota [$^{\circ}\text{C}$]	$\alpha \cdot 10^6$ [K^{-1}]
SiO_2	4	2000	0,7
$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$	3	1250	14,6
$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$	2	1050	22,0

α ... střední lineární součinitel teplotní roztažnosti

Další představa o struktuře skla byla formulována v tzv. krystalitové teorii (Lebeděv), která předpokládá ve struktuře nahodilou přítomnost malých oblastí zvýšené pravidelnosti uspořádání (Obr. 2.5). Tato teorie byla později, na základě dalšího zkoumání, modifikována v tom smyslu, že vnitřní oblasti s pravidelným uspořádáním a vnější zcela chaotické, jsou navzájem propojeny zdeformovanou strukturou, u níž pravidelnost uspořádání klesá směrem od středu krystalitů k vnější oblasti.



Obr. 2.5 Plošné znázornění struktury křemenného skla: A – podle krystalitové teorie, B – podle modifikované krystalitové teorie

3 Vlastnosti skla a skloviny

Pojem vlastnosti skla a skloviny zahrnuje širokou škálu parametrů definujících skla a skloviny z hlediska tepelných, mechanických, elektrických, optických a chemických vlastností. V této kapitole je uveden popis jen nejdůležitějších vlastností, který je zkrácen na širší znalost potřebnou pro strojního inženýra. Podrobnější informace je možné najít v odborné literatuře, (viz Literatura).

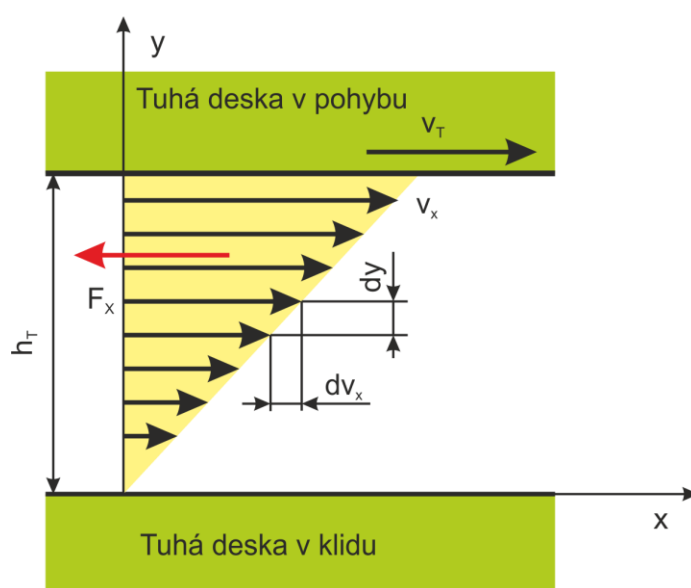
3.1 Viskozita

Viskozita je vlastností látek v kapalném stavu, tedy látek, které mohou téci. Viskozita je důležitou vlastností skla a skloviny a její znalost je důležitá při výrobě. To, že i sklo samotné je popisováno viskozitou o vysokých hodnotách, se může jevit neobvykle, odpovídá to však realitě.

Z technologického pohledu je sklovina považována za newtonovskou kapalinu. Rychlost deformace je pak přímo úměrná napětí, které deformaci působí. Pohybuje-li se tuhé těleso v kapalném prostředí určitou rychlostí, povrchová vrstva skloviny na tělese má shodnou rychlost a další vrstvy vlivem tečného napětí s vnějšími vrstvami jsou brzděny - napříč vrstvami se vytvoří rychlostní spád, Obr. 3.1. Až v určité vzdálenosti od tělesa přestávají být vrstvy tekutého prostředí tělesem ovlivňovány. Suma všech namáhání (tečných napětí) v jednotlivých vrstvách představuje celkovou brzdicí sílu F_x [N], která působí snížení rychlosti nejvzdálenější vrstvy na nulu. V rozdílných tekutých prostředích je tento odpor proti tečení obecně různý. U sklovin je vnitřní odpor F_x přímo úměrný rychlostnímu spádu (tečnému napětí) a třecí ploše S_x [m²] podle vztahu

$$F_x = \eta S_x \frac{\Delta v_x}{\Delta y}, \quad (3.1)$$

kde η je konstanta úměrnosti, která je nazývána součinitelem viskozity, *dynamickou viskozitou*.



Obr. 3.1 Schematické znázornění rychlostního spádu ve viskózní kapalině

Je-li odpor F_x vztažen na plochu S_x , je získán vztah pro tečné (smykové) napětí, které je úměrné změně rychlosti ve směru kolmém na směr pohybu podle Newtonova vztahu

$$\tau_{xy} = \eta \frac{dv_x}{dy} . \quad (3.2)$$

Dynamická viskozita tedy představuje vnitřní odpor skloviny proti tečení. Jednotkou dynamické viskozity v SI soustavě jednotek je Pa·s (kg·m⁻¹·s⁻¹). Ve starší literatuře se téměř výhradně používala jednotka Poise (P), podle SI soustavy jednotek odpovídající dPa·s, která je desetkrát menší než Pa·s. Protože je viskozita velmi silně závislá na teplotě a od tavicích teplot po teploty chlazení se mění o mnoho řádů (z 10¹ až po 10^{13,5} Pa·s), často se udává její logaritmus. Při studiu a přebírání číselných hodnot viskozity ze starší literatury je proto nutné vždy na tuto skutečnost brát zřetel.

Dále je možno definovat *kinematickou viskozitu* ν , která představuje podíl dynamické viskozity a hustoty ρ

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} . \quad (3.3)$$

Jednotka kinematické viskozity má rozměr m²·s⁻¹. Pokud se čtenář setká pouze s pojmem viskozita, má se na mysli viskozita dynamická. Převrácená hodnota viskozity je tekutost.

Se stoupající teplotou přechází sklo v transformačním intervalu ze skelného (tuhého stavu) plynule do stavu plastického až tekutého, stává se sklovinou. Mírou „plastičnosti“ skloviny, tedy schopností téci, je právě dynamická viskozita. U běžných křemičitých skel se popsané chování (v závislosti na chemickém složení) začíná projevovat zhruba nad teplotou 400 až 550 °C.

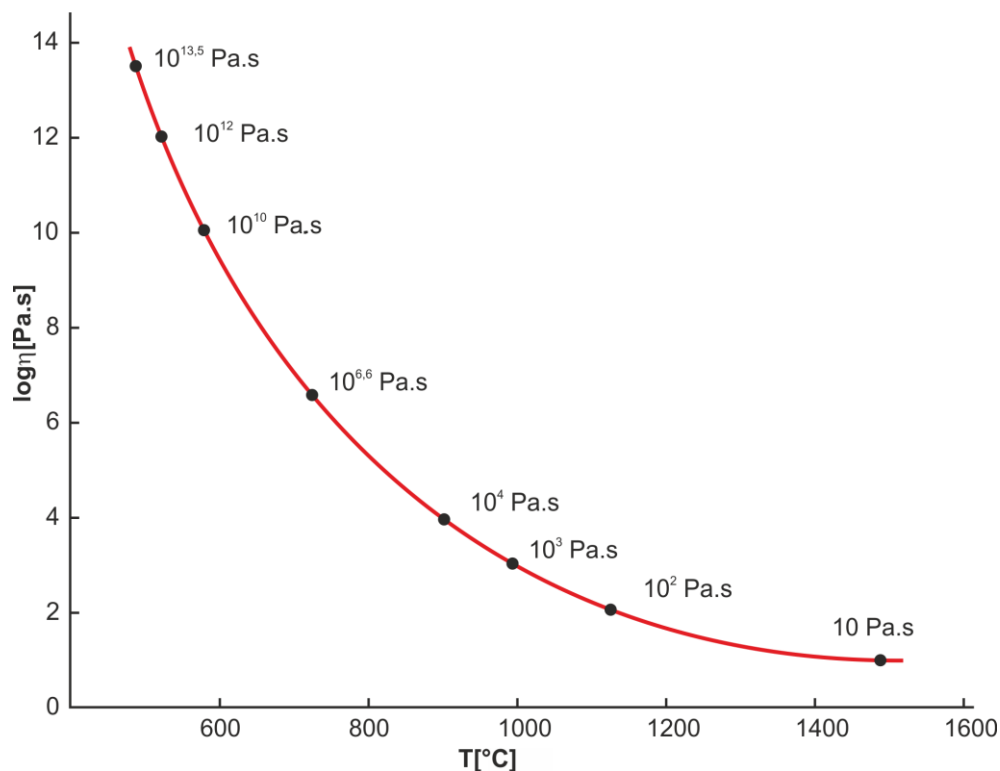
Znalost teplotního průběhu viskozity je důležitá prakticky pro všechny oblasti sklářské technologie. Vztah mezi teplotou a viskozitou je u skel charakterizován tzv. viskozitní křivkou, jejíž typický průběh je znázorněn na Obr. 3.2.

Viskozitní křivku ovlivňuje za běžných podmínek především chemické složení skla. Z technologického hlediska se rozlišují skla „krátká“ se strmým průběhem viskozitní křivky a skla „dlouhá“ s pozvolným průběhem viskozitní křivky, Obr. 3.3. Označení pochází z historie, kdy sklář měl u skla s pozvolným průběhem viskozitní křivky delší čas na zpracování. Jiné technické rozlišení je na skla „tvrdá“, jejichž viskozitní křivka je na grafu závislosti umístěna výše a na skla „měkká“, jejichž viskozitní křivka leží ve spodní části grafu, Obr. 3.3. Při dané teplotě mají skla „měkká“ nižší viskozitu a jsou tedy měkčí než skla s viskozitní křivkou umístěnou výše.

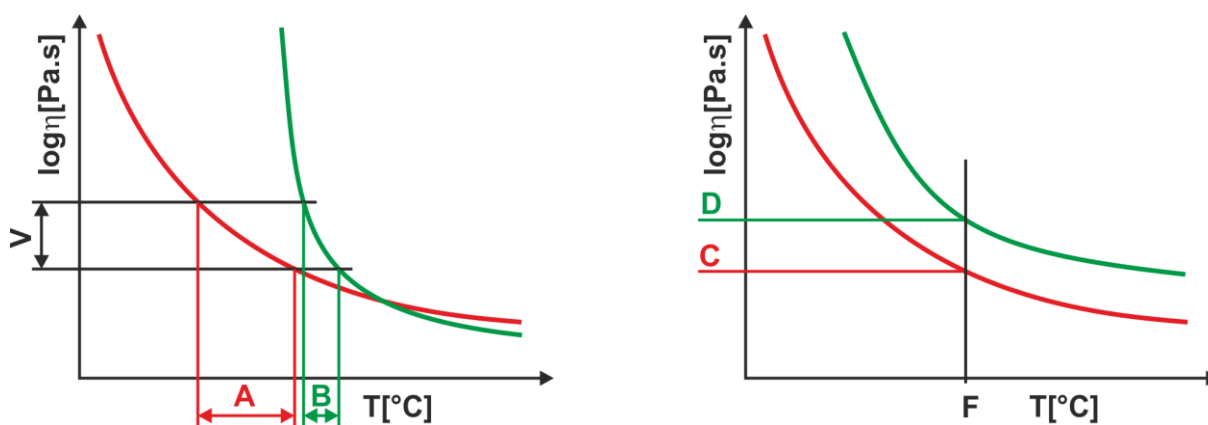
Kromě průběhu viskozitní křivky, která je významnou charakteristikou každé skloviny, jsou definovány tzv. vztažné body viskozity, které pro každou sklovinu odpovídají odlišné teplotě. Jedná se o následující body:

- bod tavení 10 Pa·s,
- bod zpracování 10³ Pa·s,
- bod tečení 10⁴ Pa·s,
- Littletonův bod měknutí 10^{6,6} Pa·s,
- deformační teplota t_d 10¹⁰ Pa·s,

- horní chladicí teplota 10^{12} Pa·s,
- transformační teplota T_g $10^{12,3}$ Pa·s,
- dolní chladicí teplota $10^{13,5}$ Pa·s.

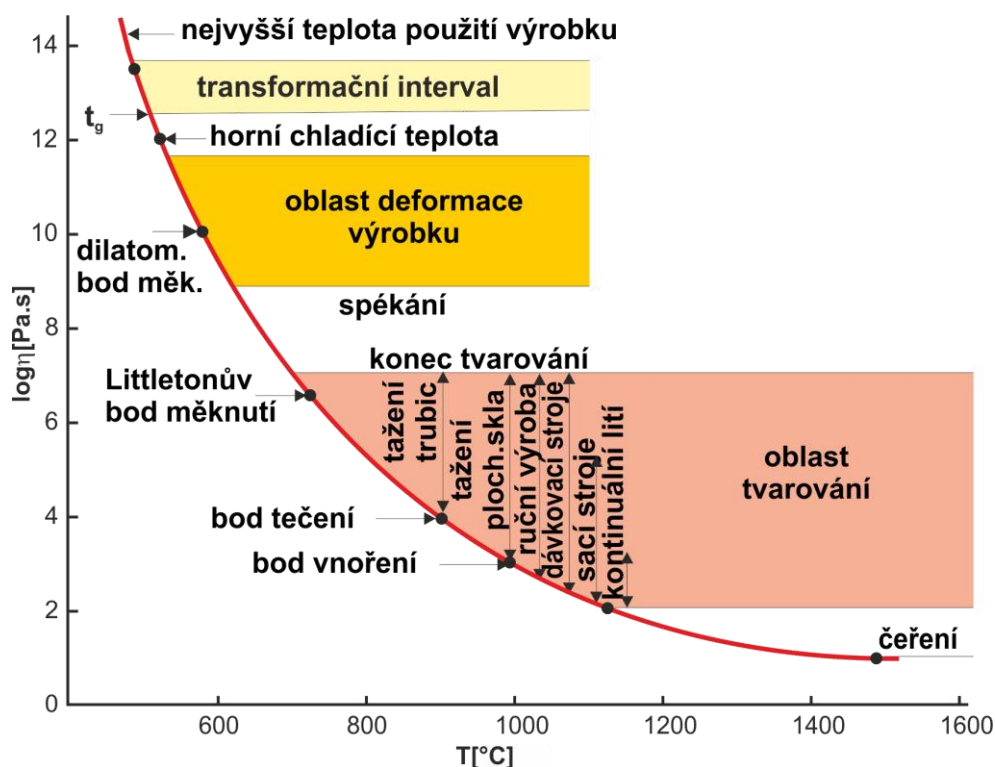


Obr. 3.2 Viskozitní křivka (nespecifikované složení)



Obr. 3.3 Viskozitní křivky různých typů skel: V - interval viskozity zpracování skla, A - interval teplot zpracování „dlouhého“ skla, B - interval teplot zpracování „krátkého“ skla, C - viskozita „měkkého“ skla při dané teplotě F, D - viskozita „tvrdého“ skla při dané teplotě F

Technologicky významné body a oblasti zpracování skloviny jsou uvedeny na Obr. 3.4. Pro tavení skloviny jsou důležité viskozity pod 10^2 Pa·s, pro tvarování oblasti 10^2 až 10^8 Pa·s a oblast deformace výrobku (10^9 až $10^{11,5}$) a pro chlazení oblast viskozity 10^{12} až $10^{13,5}$.



Obr. 3.4 Technologicky významné body a oblasti zpracování skloviny (viskozita v $\text{Pa}\cdot\text{s}$)

Experimentální metody stanovení celé viskozitní křivky jsou obvykle přístrojově i časově náročné, proto se lze často setkat s početním stanovením průběhu viskozitní křivky pomocí empirických vztahů, které výpočet zjednodušují a vyžadují proměření pouze několika viskozitních bodů. Nejčastěji se setkáváme s výpočtem pomocí Vogel-Fulcher-Tammannovy rovnice (zkráceně V-F-T rovnice), jejíž použití vyžaduje stanovení tří dvojic bodů teplota-viskozita a výpočet průběhu viskozitní křivky je dostatečně přesný

$$\log \eta = A + \frac{B}{T - C}, \quad (3.4)$$

kde η - dynamická viskozita ($\text{Pa}\cdot\text{s}$),

T - absolutní teplota (K),

A, B, C - konstanty.

Jinou možností je provést výpočet přímo z chemického složení skloviny. Vzhledem k tomu, že se liší vliv jednotlivých oxidů a nemá aditivní charakter, tzn. je ovlivněn vzájemnými interakcemi těchto oxidů, je třeba pro předem stanovenou oblast provést vyhodnocení vlivu jednotlivých oxidů, např. metodou plánovaných faktorových pokusů a stanovit příslušné regresní vztahy pro výpočet konstant použitého vztahu. Obecně platí, že vyšší obsah oxidu křemičitého viskozitu skloviny zvyšuje, naopak vyšší obsah modifikujících oxidů, např. oxidů alkalických kovů, viskozitu snižuje.

3.1.1 Měření viskozity

Relativní metody měření viskozity skloviny vyžadují kalibraci (cejchování) viskozimetru pomocí známých viskozit jiných látek (olej, glycerol, sirup). Absolutními metodami měříme veličiny, z nichž lze viskozitu přímo vypočítat. Vzhledem k širokému rozsahu viskozit se k měření používá více typů viskozimetrů. Nejpoužívanější jsou viskozimetry se zavěšenou kuličkou (měření nízkých viskozit v rozsahu 10^1 až 10^4 Pa·s), s koncentrickými válci (měření nízkých viskozit v rozsahu 10 až 10^5 Pa·s), s prodlužujícím se skleněným vláknem (měření středních a vysokých hodnot viskozity v rozsahu 10^7 až 10^{14} Pa·s), viskozimetr penetrační (k měření vysokých hodnot viskozity v rozsahu 10^7 až 10^{13} Pa·s), metodou ohybu trámečku lze měřit i viskozity nad 10^{13} Pa·s. I sklo při pokojové teplotě má stále ještě definovanou viskozitu, která je však extrémně vysoká ($> 10^{20}$ Pa·s) a projevuje se například deformací nevhodně uložených trubic a tyčí při dlouhodobém skladování. Vybrané metody měření viskozity jsou popsány dále.

Metoda zavěšené kuličky. Upravený postup měření spočívá v zavěšení platinové kuličky na tenké platinorhodiové vlákno, které je upevněno na jednom ramenu vah. Na protilehlou miskou vah se umístí protizávaží Z , kterým se upraví rychlost pádu kuličky (nebo stoupání), takže její dráha je sledována pouze v rozsahu několika milimetrů. Rychlost pádu se měří vhodným optickým nebo elektronickým zařízením. Metoda je vhodná pro měření viskozit sklovin v rozsahu 10^1 až 10^4 Pa·s. Měřicí metoda není absolutní, ale je nutno před měřením provést kalibraci. Metoda vychází z poznatku, že poměr Z/v je při konstantní viskozitě stálý bez ohledu na velikost protizávaží. Vynesením závislosti $\log \eta$ proti $\log Z/v$ získáme přímkovou závislost a pro viskozitu a rychlost brzděného pádu kuličky platí vztah

$$\log \eta = a + b \log Z/v \quad (3.5)$$

kde Z je hmotnost závaží [g],

v – rychlost pádu kuličky [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

a, b – konstanty přístroje vypočtené z kalibračních měření,

η – koeficient dynamické viskozity [dPa·s].

Metoda koncentrických válců. Jedná se o absolutní metodu měření viskozity na rotačním viskozimetru, ve kterém se jeden z koncentrických válců otáčí kolem vlastní osy a druhý je pevný. Vnitřní válec je z platiny nebo slitiny PtRh. Pokud se otáčí vnitřní válec, měří se síla potřebná k jeho otáčení stanovenou konstantní rychlostí. V případě otáčení vnějšího válce (válcového kelímku) je vnitřní válec zavěšen na torzním vlákně. Metoda je vhodná pro měření viskozit sklovin v rozsahu 10 až 10^5 Pa·s.

Pro výpočet viskozity platí vztah

$$\eta = \frac{M \left(\frac{1}{r_1^2 - r_2^2} \right)}{4\pi h_s \omega} = A \frac{M}{\omega}, \quad (3.6)$$

kde M - moment síly [N.m],

r_1, r_2 - poloměry válců [m],

h - výška smýkané vrstvy [m],

ω - úhlová rychlost [s^{-1}],

A - konstanta přístroje, zahrnující geometrické rozměry konkrétního uspořádání.

Metoda prodloužení skleněného vlákna. Jde o absolutní metodu a lze ji použít pro měření viskozity v rozsahu 10^7 až 10^{14} Pa.s. Ze skloviny se vytáhne vlákno kruhového průřezu, které se upevní mezi vhodná táhla a umístí do osy vertikální elektrické pece, jejíž teplota je stabilizována na určité hodnotě. Při tom jedno táhlo je pevně uchyceno, na druhé se ve směru jeho podélné osy působí silou vyvozenou zavěšeným závažím. Účinkem tíhy závaží a vlivem viskózního toku se vlákno prodlužuje určitou rychlostí

$$v = \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (3.7)$$

Z rychlosti prodlužování v lze stanovit součinitel dynamické viskozity

$$\eta = \frac{4}{3} \frac{mgl}{\pi v d^2} \cdot 10 \quad (3.8)$$

kde m je hmotnost závaží s táhlem [kg],

l - délka vlákna [m],

d - průměr vlákna [m],

g - gravitační zrychlení [$9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$],

v - rychlost prodlužování vlákna [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Littletonův bod měknutí ($10^{6,6}$ Pa.s). Stanovení se provádí měřením rychlosti prodlužování skleněného vlákna o průměru 0,55 až 0,75 mm a délky 235 mm zavěšeného ve vertikální peci bez zatížení. Pec se zahřívá konstantní rychlostí 4 až 6 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ a Littletonův bod měknutí je teplota, při níž rychlost samovolného prodlužování vlákna je za těchto podmínek přesně 1 mm za minutu.

Metoda penetrační. Metoda umožňuje měřit viskozitu skel v rozsahu 10^7 až 10^{13} Pa.s. Měření se provádí na kotoučku skla o průměru 30 mm a tloušťky 3 mm s vyleštěnou čelní plochou. Vzorek je umístěn ve vertikální elektrické peci a udržován při konstantní teplotě. Do vyleštěného povrchu vzorku skla se vtlačuje známou silou F kovové tělísko, jehož konec tvoří polokoule o průměru 3 mm. Elektronickým nebo optickým zařízením se měří hloubka vtisku l za dobu τ .

Viskozita se vypočítá ze vztahu

$$\eta = \frac{9F}{32\sqrt{2}rl^3} \cdot \tau, \quad (3.9)$$

kde F je působící síla [N],

τ - doba [s],

l - hloubka vtisku [m],

r - poloměr tělíska [m],

η - součinitel dynamické viskozity [Pa·s].

Při použití kulového tělíska se jedná o absolutní metodu.

Metoda ohybu trámečku. Trámeček nebo tyčinka jsou vetknuty nebo podepřeny na dvou koncích a vystaveny působení síly shora nebo zdola. Výpočet viskozity vychází ze vztahu

$$\eta = \frac{gl^3}{144In} \left(m + \frac{\rho Sl}{1,6} \right), \quad (3.10)$$

kde η je viskozita [Pa·s],

g - gravitační zrychlení ($9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$),

I - průřezový moment setrvačnosti [m^4],

n - střední rychlost ohybu trámečku [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

m - hmotnost závaží [kg],

l - rozpětí podpěr [m],

ρ - hustota skla [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

S - průřez trámečku [m^2].

Moment setrvačnosti I je vypočten ze vztahu, pro tyčinku

$$I = \frac{\pi r^4}{4}, \quad (3.11)$$

pro trámeček:

$$I = \frac{bh^3}{12}, \quad (3.12)$$

kde b je šířka trámečku [m],

h - výška trámečku [m],

r - poloměr tyčinky [m].

3.2 Povrchové napětí

Povrchové napětí je výslednou silou, která se snaží minimalizovat povrch kapalin – tavenin. Povrchové napětí se označuje symbolem γ a má jednotku $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$, přitom povrchové napětí $1\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ má kapalina, ve které na délku 1 m kolmého řezu povrchem působí síla 1 N. Obecně tak platí vzorec

$$\gamma = \frac{dF}{dl} \quad (3.13)$$

kde dF je síla působící kolmo na řez povrchem,

dl – délka myšleného řezu povrchem kapaliny.

Obvykle je povrchové napětí skloviny vyjadřováno jednotkou tisíckrát menší, tedy $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$.

Povrchové napětí je vysvětlováno působením kohezních sil. Na každou částici (molekulu) kapaliny působí sousední částice přitažlivými kohezními silami. Podstatu kohezních sil lze vysvětlit elektrostatickým přitahováním a odpuzováním molekul. Vzájemné působení je pouze krátkého dosahu a klesá s mnohem vyšší mocninou (většinou se šestou mocninou). Přitažlivé působení každé částice je tak možné omezit na velmi malý kulový prostor, v jehož středu se nachází uvažovaná částice. Tento prostor se nazývá sféra molekulárního působení a jeho poloměr ρ_m se označuje jako poloměr molekulárního působení. Uvnitř kapaliny je vzájemné působení molekul v rovnováze a výslednice sil je nulová. Molekuly se vzdáleností od povrchu menší než ρ_m jejich sfér tvoří povrchovou vrstvu kapaliny. Na každou molekulu ležící v této vrstvě působí opět sousední molekuly kapaliny, ale protože nad povrchem kapaliny již molekuly kapaliny nejsou, je výslednice sil nenulová. Výslednice přitažlivých sil molekul plynu (nad povrchem) je mnohem menší než výslednice působení molekul kapaliny zevnitř a výsledná přitažlivá síla směřuje dovnitř kapaliny. Výsledkem je síla, která zajišťuje stažení kapaliny do minimálního povrchu, tedy povrchové napětí.

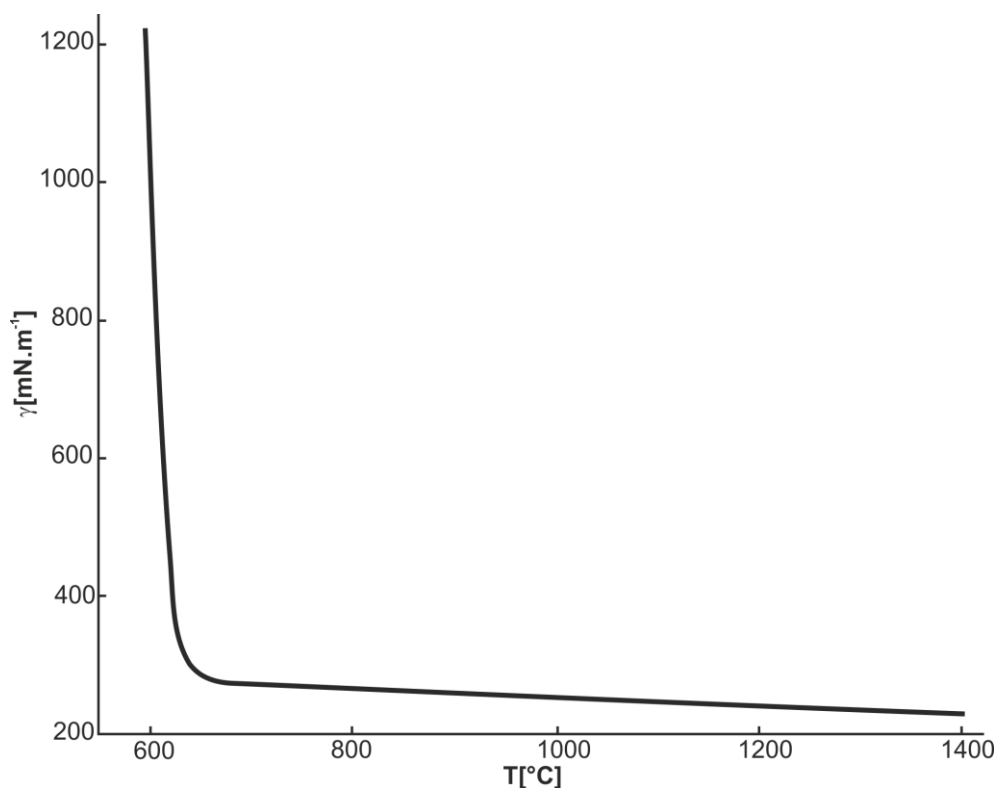
V technologii skla se s účinky povrchového napětí lze setkat v oblasti tavení, čerení, dávkování, tvarování a tepelného zušlechťování skla.

Povrchové napětí je vlastnost aditivní, což je možno využít při orientačním výpočtu ze známého chemického složení skla a znalosti aditivních konstant. Z běžnějších oxidů zvyšují povrchové napětí např. oxid vápenatý CaO , oxid hořečnatý MgO , opačně působí oxid draselný K_2O , oxid olovnatý PbO , oxid boritý B_2O_3 . Povrchové napětí sklovin není příliš ovlivněno teplotou – jeho závislost na teplotě je uvedena na Obr. 3.5.

K měření povrchového napětí se využívá řada metod:

- metoda vážení kapek,
- metoda přisedlé kapky,
- metoda maximálního tlaku v bublině,
- metoda vláknová,
- metoda prstencová aj.

Skutečnosti, že povrchové napětí není příliš ovlivněno teplotou, se využívá při jeho experimentálním stanovení *vláknovou metodou*, která je relativně jednoduchá.



Obr. 3.5 Závislost povrchového napětí skloviny na teplotě plochého skla

Vláknová metoda. Skleněné vlákno o průměru přibližně 0,6 mm délky přibližně 80 mm se zavěsí tak, aby se nacházelo v ose spirály zhotovené z platinového drátu. Po nažhavení spirály odporovým teplem se vlákno nejprve vlivem povrchového napětí zkrátí, v místě maximální teploty se rozšíří (zduří). Při dalším zvyšování teploty překoná tíha vlákna povrchové napětí a spodní část, včetně rozšířené partie, odpadne.

Při vhodně zvolené rychlosti zahřívání a správné délce vlákna se vlákno rozšíří. Z odpadlého konce vlákna se oddělí rozšířená část v místě původního průměru a zváží se. Povrchové napětí se vypočte ze vztahu

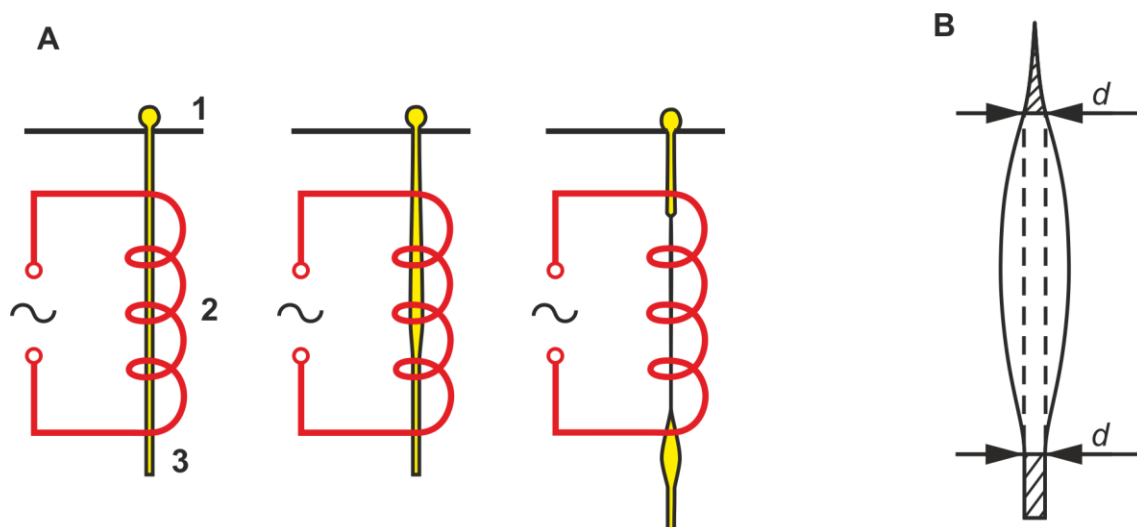
$$\gamma = \frac{2gM}{\pi d}, \quad (3.14)$$

kde M je hmotnost odkápnuté části vlákna [kg],

g - gravitační zrychlení [9,81 m·s⁻²],

d - průměr vlákna [m].

Schéma metody je znázorněno na Obr. 3.6.



Obr. 3.6 Schéma měření povrchového napětí skla vláknovou metodou: A – zobrazení metody, 1 – držák s otvorem pro zavěšení vlákna, 2 – topná spirála, 3 – zavěšené vlákno, B – oddělení protaženého konce odkápnuté části vlákna

3.3 Krystalizační schopnost

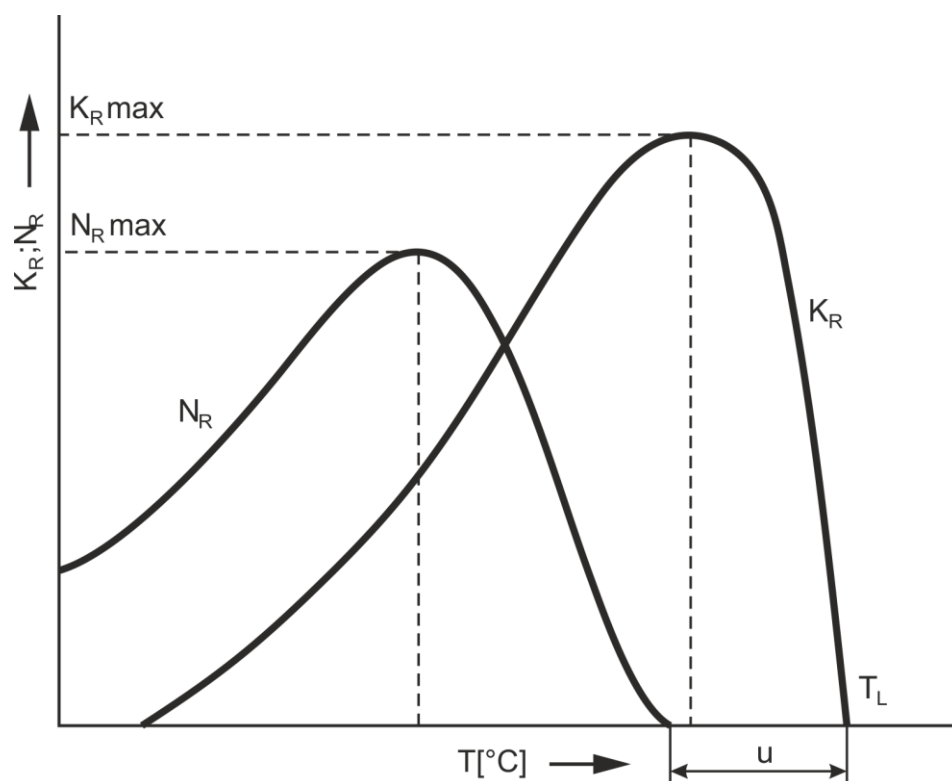
Látky v amorfním stavu, mezi které se řadí i sklo, se jinými slovy nacházejí v metastabilním stavu podchlazené kapaliny. Znamená to, že se vyznačují vyšší hodnotou vnitřní energie než látky ve stavu krystalickém. Tepelnou expozicí při vhodné teplotě dochází u nich ke krystalizaci a tím k přechodu do stabilního, krystalického stavu. Krystalizaci, jinými slovy též odskelnění, ovlivňují především následující vlastnosti:

- rychlost nukleace (N_R), která představuje počet krystalických zárodků (nukleí) vzniklých v objemové jednotce skla za jednotku doby,
- rychlost růstu krystalů (K_R), která představuje geometrický nárůst velikosti krystalizačních zárodků [$\mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$],
- teplota liquidus (T_L), nad touto teplotou nemůže existovat krystalická fáze.

Vzájemný vztah mezi oběma výše uvedenými rychlostmi a tím i snadné pochopení možnosti vzniku krystalické fáze (odskelnění) podává schéma na Obr. 3.7.

Těsně pod teplotou liquidus se nuklea prakticky nevyskytují (interval podchlazení u mezi teplotou liquidus T_L a počátkem křivky N_R), pokud však nedošlo (i ke krátkodobému a přechodnému) ochlazení skloviny pod teplotu vysokoteplotního počátku křivky N_R . Pokud se bude teplota skloviny v intervalu u udržovat delší dobu (bez předchozího ochlazení), prakticky nemůže dojít k odskelnění. Samotná přítomnost nukleačních zárodků je možná na základě dvou mechanismů:

- **Heterogenní nukleace**, růst krystalů probíhá následně na cizích krystalizačních centrech (hraniční plochy nedokonale rozpuštěných zrn, plochy kontaktu skloviny se žárovzdorným materiálem, povrchové znečištění taveniny apod.).
- **Homogenní nukleace**: zárodky krystalů se vytvářejí vylučováním z taveniny na základě termodynamické rovnováhy mezi složkami přítomnými v tavenině.



Obr. 3.7 Závislost nukleační rychlosti a rychlosti růstu zárodků na teplotě

Cílem sklářské technologie je (ve většině případů technologie) heterogenní i homogenní nukleaci minimalizovat. Samotná nukleace není problémem, ale zásadní je pak růst krystalů, které jsou od určité velikosti i vidět a způsobují neprůhlednost a praskání skla. Krystalizace se minimalizuje tím snáze:

- čím nižší je nukleační rychlost,
- čím větší je rozsah intervalu podchlazení u ,
- čím dále jsou od sebe položena teplotní maxima.

V některých případech je ale krystalizace, které předchází homogenní nukleace, žádoucí. Přísadou vhodného nukleačního činidla je možno vyvolat téměř u všech druhů skel krystalizaci (kap. 4.8). V některých případech vzniká krystalický zákal, který způsobí neprůhlednost skla (opakní nebo světlo rozptylující sklo). Dalším případem jsou skelně krystalické hmoty (sklokeramika), které mají specifické vlastnosti, jako je např. nulová nebo záporná teplotní roztažnost. Cílem může být také zlepšení mechanických vlastností. Řízenou krystalizací se zlepšuje mnoho vlastností původního skla, mj. pevnost, tvrdost a tepelná odolnost. Kromě zvýšení pevnosti je pro skelně krystalické hmoty důležité zřetelné snížení křehkosti. Ve všech případech je homogenní nukleace a krystalizace ovlivněna složením skla (přísadou nukleačních činidel) a tepelnými podmínkami při tzv. kalení (řízené krystalizaci).

Ke stanovení krystalizačních vlastností se používají následující postupy:

- metoda gradientové pícky,
- metoda přímého mikroskopického pozorování v tepelné komůrce,
- metoda rychlého ochlazení vzorku.

3.4 Další tepelné vlastnosti

Znalost tepelných vlastností je důležitá při řešení technologických problémů výroby, při tepelně technických výpočtech, při využití výrobků ze skla při zvýšených teplotách a rovněž při řešení automatizace a řízení sklářské výroby. V dalším textu bude pojednáno o teplotní roztažnosti, měrném teple, odolnosti proti náhlým změnám teploty a tepelné vodivosti.

3.4.1 Teplotní roztažnost

Teplotní roztažnost (dilataci) je možno definovat jako změnu rozměrů skleněného tělesa se změnou teploty za konstantního tlaku. Při změně délkových rozměrů jde o délkovou roztažnost, při změně objemových rozměrů jde o objemovou roztažnost. Kvantitativně charakterizujeme teplotní roztažnost nejčastěji součinitelem teplotní roztažnosti (dédkové, objemové), který má rozměr $[K^{-1}]$ nebo $[^{\circ}C^{-1}]$.

Součinitel délkové teplotní roztažnosti α je definován vztahem

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{dl}{dT}, \quad (3.15)$$

kde l_0 je délka měřeného vzorku při referenční teplotě T_0 .

dl - prodloužení měřeného vzorku při změně teploty dT .

Součinitel objemové roztažnosti β je definován vztahem

$$\beta = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dT}, \quad (3.16)$$

kde V_0 je objem měřeného vzorku při referenční teplotě T_0 .

dV – objemové zvětšení měřeného vzorku při změně teploty dT .

Součinitel objemové roztažnosti β lze pro pevné látky s izotropní mřížkou, i pro skla, vzhledem k nízké hodnotě α zjednodušeně vyjádřit jako

$$\beta = 3\alpha. \quad (3.17)$$

Vztahem (3.15) je definován tzv. *pravý součinitel délkové teplotní roztažnosti*, který udává relativní změnu délky tělesa se změnou teploty o dT při dané teplotě T . Pro malé teplotní intervaly lze však α považovat za konstantu, takže tzv. *střední lineární součinitel teplotní roztažnosti* lze definovat vztahem

$$\alpha_{T_2-T_1} = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T} \quad (3.18)$$

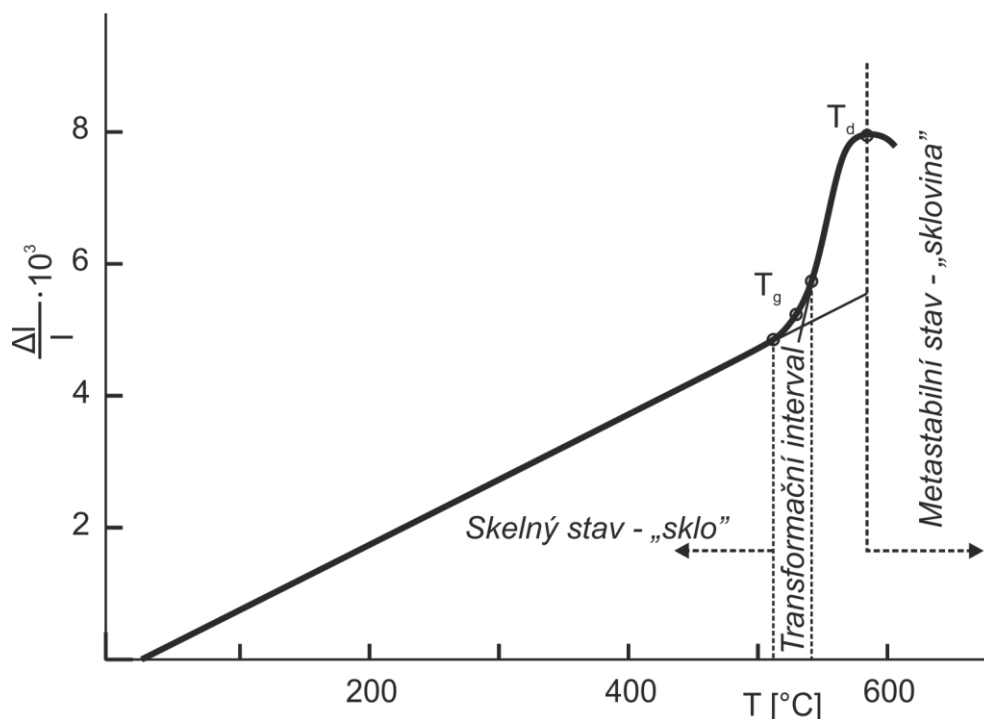
kde T_1, T_2 jsou počáteční a konečná teplota $[^{\circ}C]$,

Δl - změna délky při změně teploty o $\Delta T = T_2 - T_1$,

l_0 - počáteční délka vzorku.

Střední lineární součinitel teplotní roztažnosti udává relativní změnu délky vzorku měřeného skla při změně teploty o $1^{\circ}C$ v teplotním intervalu (T_2, T_1) . Teplotní rozsah bývá obvykle stanoven na 20 až $300^{\circ}C$, aby bylo možné porovnávat mezi sebou teplotní

roztážnost skel různého chemického složení. Teplotní závislost délkové roztážnosti se graficky vyjadřuje křivkou teplotní roztážnosti (dilatační křivkou skla, Obr. 3.8).



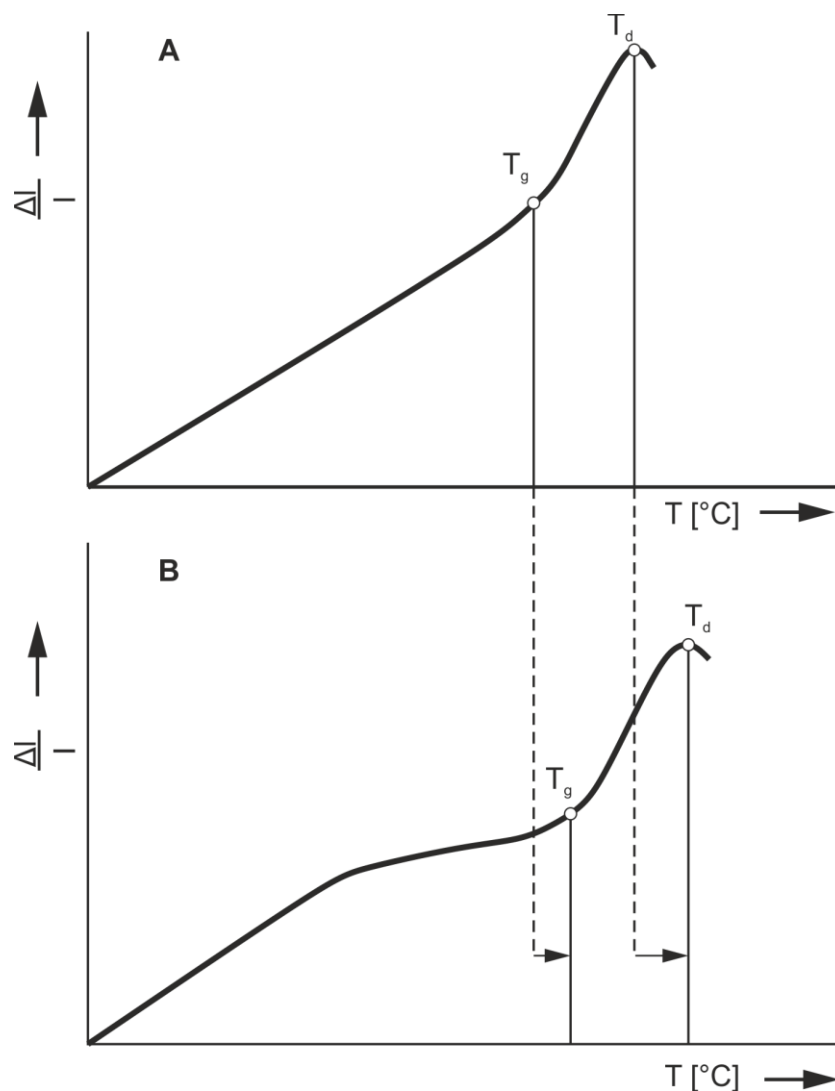
Obr. 3.8 Dilatační křivka sodnovápenatokřemičitého skla: T_g – transformační teplota, T_d – teplota dilatometrického bodu měknutí (deformační teplota)

Transformační teplota T_g leží přibližně uprostřed transformačního intervalu. Určuje se z dilatační křivky měřené při rychlosti ohřevu $10\text{ °C} \cdot \text{min}^{-1}$ a odpovídá jí viskozita $10^{12,3}\text{ Pa} \cdot \text{s}$. Deformační teplota T_d je definována obvykle ohybem křivky teplotní roztážnosti a odpovídá viskozitě přibližně $10^{10}\text{ Pa} \cdot \text{s}$.

Průběh dilatační křivky (Obr. 3.8) je pro sklo bez napětí (dobře vychlazené) přibližně lineární až do transformační teploty T_g . Následuje strmější průběh dilatační křivky až do teploty dilatometrického bodu měknutí (deformační teplota T_d), kdy již dochází k deformaci měřeného vzorku skla tlakem přítlačného zařízení. U skla s vnitřním napětím (špatně vychlazeného) pozorujeme přibližně 100 °C pod transformační teplotou prohnutí dilatační křivky. Názorně jsou tato zjištění ukázána na Obr. 3.9.

Teplotní rozsah, pro který bývá α definován, je obvykle 20 až 300 °C . Pro jiný rozsah (pod teplotou T_g) lze provést přepočet. Jak se střední součinitel délkové teplotní roztážnosti s teplotou mění, je pro sklo Simax a sklo sodnovápenatokřemičité ukázáno v Tab. 3.1.

Jak z předchozího vyplývá, je střední součinitel délkové teplotní roztážnosti závislý na chemickém složení skla. Nejnížší teplotní roztážnost vykazuje křemenné sklo, teplotní roztážnost některých vybraných skel je uvedena v Tab. 3.2. Jak z údajů vyplývá, nejvýrazněji snižuje teplotní roztážnost skel zvýšený obsah oxidu křemičitého SiO_2 , naopak působí zvýšený obsah oxidů alkalických kovů (Na_2O a K_2O) a dalších.



Obr. 3.9 Dilatační křivka dobře a špatně vychlazeného skla: A – sklo dobře vychlazené, B – sklo špatně vychlazené

Tab. 3.1 Střední součinitel délkové teplotní roztažnosti skla α pro sklo Simax a sklo sodnovápenatokřemičité pro různé teplotní rozsahy

$\Delta T = (T_2 - T_1) [^{\circ}\text{C}]$	$\alpha [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	
	Sklo Simax	Sodnovápenaté sklo
20 – 100	$3,16 \cdot 10^{-6}$	$8,06 \cdot 10^{-6}$
20 – 200	$3,24 \cdot 10^{-6}$	$8,33 \cdot 10^{-6}$
20 – 300	$3,20 \cdot 10^{-6}$	$8,67 \cdot 10^{-6}$
20 – 400	$3,14 \cdot 10^{-6}$	$8,91 \cdot 10^{-6}$
20 – 500	$3,07 \cdot 10^{-6}$	-

Tab. 3.2 Teplotní roztažnost vybraných skel pro rozsah teplot 20 až 300 °C

Sklo	α [°C ⁻¹]
Křemenné	$0,6 - 0,8 \cdot 10^{-6}$
Simax	$3,2 \cdot 10^{-6}$
Eutal (pro skleněná vlákna)	$4 \cdot 10^{-6}$
Ploché sklo	$8 - 9 \cdot 10^{-6}$
Obalové sklo	$9 \cdot 10^{-6}$
Oovnatý křišťál	$9,4 \cdot 10^{-6}$

Ke stanovení teplotní roztažnosti se používají dilatometry, v provozu pak metody porovnání dvou skel vrstvených, spojených nebo zatavených.

3.4.1.1 Dilatometry

Podle způsobu měření rozlišujeme přímoměrné, interferenční a diferenční dilatometry.

Přímoměrný dilatometr

Vzorek měřeného skla se vloží do trubice z křemenného skla, která je na spodním konci zatavena a je umístěna ve svislé elektrické peci. Pomocí táhla se změna délky vzorku přenáší na indikátor, teplota se měří termočlánkem. Vzorek se při zahřívání prodlužuje, ale současně i křemenná trubice a táhlo z křemenného skla. Délková změna spodní části trubice je indikátorem registrována v opačném směru než prodloužení vzorku stejné délky. Délková změna horní části trubice je kompenzována prodloužením táhla o stejnou délku a na indikátoru se proto změna neprojevuje. Na indikátoru je tedy zaznamenávána celková délka vzorku snižená o prodloužení spodní části trubice. Délkové změny lze odečítat např. pomocí číselníkového úchylkoměru nebo elektronicky. Na podobném principu je založeno měření ve vodorovné pídce, kde ale teplotní roztažnost křemenného táhla a trubice musí být odečtena od naměřeného údaje.

Interferenční dilatometr

Měřený vzorek se vkládá mezi dvě vyleštěné destičky z křemenného skla nebo ze safíru. Měření změny délky je založeno na měření interferenčních proužků. Se změnou rozměrů vzorku při zahřívání se vzájemně posunují i obě interferenční destičky a dochází k pohybu interferenčních proužků. Vlastní měření spočívá v počítání interferenčních proužků, které přejdou přes referenční bod vyznačený na horní interferenční destičce v průběhu změny teploty z T_1 na T_2 .

Diferenční dilatometry

Od přímoměrných dilatometrů se liší tím, že změna teploty se zjišťuje ze změny délky kovového etalonu, který má stejné rozměry jako vzorek měřeného skla a je umístěn v trubici z křemenného skla vedle vzorku skla. Prodlužování vzorku se potom srovnává se změnou délky etalonu a jejich délkové změny jsou obvykle graficky zaznamenávány.

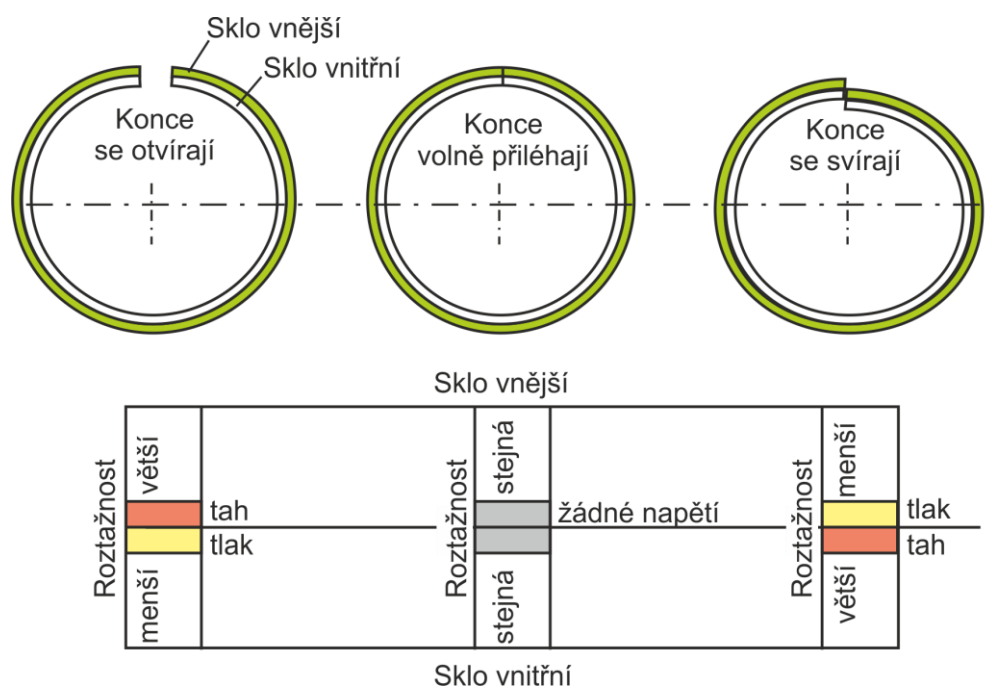
3.4.1.2 Provozní kontrola

K provozní kontrole teplotní roztažnosti skel se využívají následující metody:

- prstencová zkouška,
- metoda dvojné nitě,
- metoda plošného zátavu.

Prstencová zkouška

Využívá se zejména při výrobě přejímaných a podjímaných skel a spočívá ve vyfouknutí vrstveného válce z obou skel o průměru asi 80 až 100 mm a jeho vychlazení. Z válce se opukne prstenec výšky 20 až 40 mm a příčně se rozřízne. Podle poměru roztažností obou skel mohou nastat případy uvedené na Obr. 3.10.



Obr. 3.10 Prstencová metoda zkoušky teplotní roztažnosti

Metoda dvojné nitě

Spočívá ve stavení tyčinek dvou hodnocených skel a vytažení do nitě. Po ochlazení se vytvoří oblouk, v němž sklo s větší roztažností se smrští více a bude na vnitřní straně oblouku.

Metoda plošného zátavu

Využívá se při kontrole zátavových skel. Spočívá ve stavení dvou skel ve formě tyčinek nebo hranolků, jedno z nich je obvykle standardem. Po vychlazení se planparalelně vybrousí tak, aby svar byl kolmý k jejich povrchu, a ve svaru se změří měrný dráhový rozdíl polarizačním přístrojem s přesným kompenzátozem a sestojí se kalibrační graf závislosti měrného dráhového rozdílu na rozdílu roztažnosti obou skel.

3.4.2 Odolnost proti náhlým změnám teploty

Odolnost proti náhlým změnám teploty (někdy také tepelná odolnost) vyjadřuje schopnost skel odolat teplotnímu rázu v určitém teplotním rozsahu, aniž by došlo k porušení. Udává se největším rozdílem teplot $\Delta T [^{\circ}\text{C}]$, o který je možné zahřátý vzorek (výrobek) ochladit, případně chladný výrobek ohřát, aniž by došlo k prasknutí.

Vliv teplotní roztažnosti spočívá v tom, že při náhlém ochlazení se sklo smrští a vytvoří se v něm přechodné napětí. Čím nižší je roztažnost skla, tím nižší je i smrštění a tím vyšší je jeho odolnost proti náhlým změnám teploty. Při prudkém zahřátí výrobku ze skla vzniká v povrchové vrstvě tlakové napětí, při prudkém ochlazení napětí tahové. Vzhledem k tomu, že pevnost skla je v tahu mnohem menší než pevnost tlaková a výrobek snáze praskne při prudkém ochlazení, vyjadřuje se odolnost proti náhlým změnám teploty obvykle odolností proti ochlazení vztahem

$$\Delta T = T_1 - T_2, \quad (3.19)$$

kde ΔT je tepelná odolnost $[^{\circ}\text{C}]$,

T_1 - teplota vyhřátí vzorku $[^{\circ}\text{C}]$,

T_2 - teplota ochlazujícího prostředí $[^{\circ}\text{C}]$.

Odolnost proti náhlým změnám teploty je závislá na teplotní roztažnosti, dané chemickým složením skla, a je pro masivní prudce ochlazené sklo dána vztahem

$$\Delta T = \frac{\sigma(1-\mu)}{\alpha E}, \quad (3.20)$$

kde σ je pevnost skla v tahu,

μ - Poissonova konstanta,

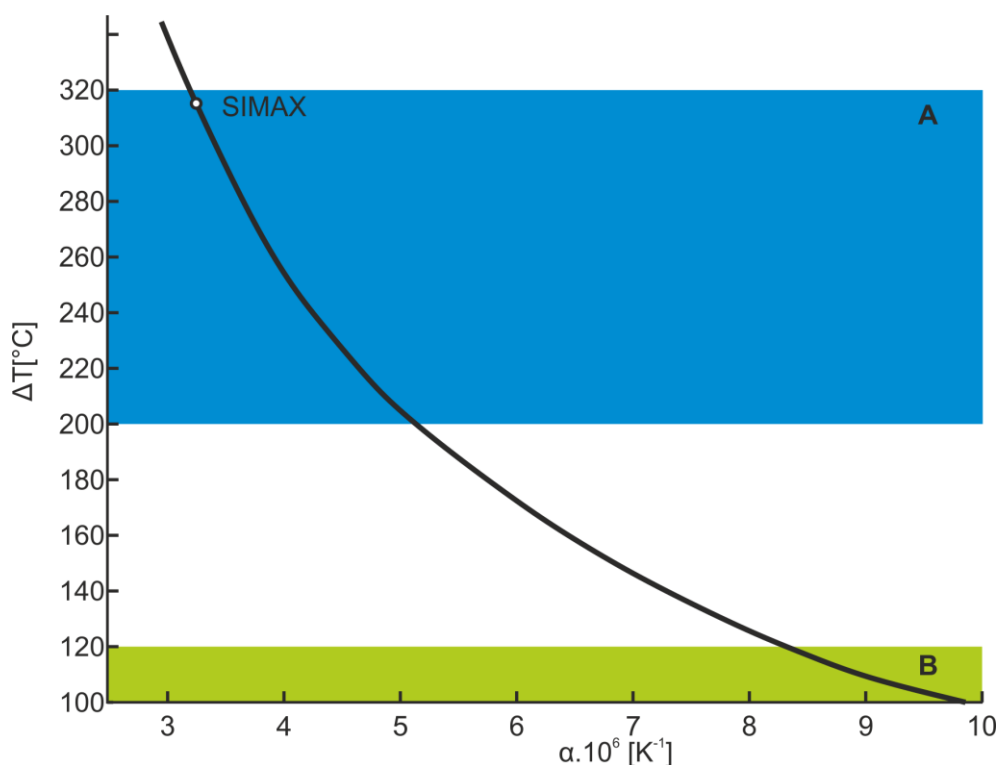
α - součinitel délkové teplotní roztažnosti,

E - Youngův modul pružnosti v tahu.

Pro orientační výpočet tepelné odolnosti lze použít zjednodušeného vztahu

$$\Delta T = \frac{1000}{\alpha \cdot 10^7}, \quad (3.21)$$

který ideálně platí pro desku o tloušťce 1 mm a pro výrobky stejné tloušťky, při zanedbání vlivu tvaru. Grafická závislost ΔT na α je uvedena na Obr. 3.11.



Obr. 3.11 Závislost odolnosti proti náhlým změnám teploty na teplotní roztažnosti pro skleněnou desku tloušťky 1 mm: A - tepelně odolná skla, B - sodnovápenatokřemičitá skla

Vnitřní napětí ve skle lze vypočítat (při zahřívání nebo ochlazování konstantní rychlostí, kdy se ve skle ustálí pravidelně rozložené vnitřní napětí) pro skleněnou desku na povrchu podle vztahu

$$\sigma = \frac{1}{3} \cdot \frac{E\alpha}{a(1-\mu)} h d^2, \quad (3.22)$$

kde σ je napětí [Pa],

E - Youngův modul pružnosti v tahu [Pa],

α - součinitel délkové teplotní roztažnosti [K^{-1}],

a - teplotní vodivost [$m^2 \cdot s^{-1}$],

μ - Poissonova konstanta [-],

d - poloviční tloušťka desky [m],

h - rychlost zahřívání nebo ochlazování [$K \cdot s^{-1}$].

Tepelná odolnost skel je dále funkcí tvaru vzorku (výrobku), homogenity skla, neporušenosti jeho povrchu, vychlazení (vytvrzení), charakteru úpravy jeho okrajů (hran), které mohou být zapalované nebo zabroušené apod. Není to tedy vlastnost ryze materiálová.

Např. pro desku z křemenného skla o tloušťce 1 až 2,5 mm je hodnota tepelné odolnosti 1000 až 1100 °C, trubice o průměru 10 až 30 mm ze stejného materiálu vykazuje odolnost 800 až 900 °C.

Podle tepelné odolnosti se skleněné výrobky rozdělují do tří skupin:

- skleněné výrobky s malou tepelnou odolností, pro které platí $\Delta T < 100$ °C (mj. ploché a obalové sklo),
- skleněné výrobky se střední tepelnou odolností, pro které platí 100 °C $< \Delta T < 250$ °C (sklo laboratorní, farmaceutické aj.),
- skleněné výrobky s velkou tepelnou odolností, pro které platí $\Delta T > 250$ °C (varné sklo, celoskleněné aparatury velkých rozměrů, výrobky z křemenného skla aj.).

3.4.2.1 Stanovení odolnost proti náhlým změnám teploty

Principem metody je vyhřátí vzorku skla, popř. skleněného výrobku, na postupně zvyšovanou teplotu s následným rychlým ochlazením ve vodní lázni o teplotě asi 20 °C až do doby, než se vzorek skla (výrobek) poškodí (praskne, objeví se trhlinky, kousek se odštípne apod.). Protože, jak bylo uvedeno výše, je tato vlastnost skleněných výrobků, stejně jako mechanické vlastnosti, ovlivněna řadou činitelů, je nutné ke zkoušce použít normou stanovený minimální počet výrobků.

3.4.3 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita (ve starší literatuře je používán pojem měrné teplo) je důležitá pro průběh procesů výměny tepla při zahřívání či ochlazování skloviny. Znalost měrné tepelné kapacity je proto důležitá např. při sestavování tepelných bilancí pro návrh tavicích pecí, dále se uplatňuje zejména v oblasti tvarování, dávkování a chlazení skla.

Měrná tepelná kapacita c_p [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] (index p, uvádí konstantní tlak) je definovaná množstvím tepla dQ , kterým se teplota látky z teploty T zvýší na teplotu $T + dT$, dělené hmotností látky m a zvýšením teploty dT , tedy

$$c_p = \frac{dQ}{dT} \frac{1}{m}, \quad (3.23)$$

kde dQ je přírůstek tepla [J],

dT - přírůstek teploty [K],

m - hmotnost skla [kg].

Jedná se tedy o nepatrné množství tepla dQ potřebné k zahřátí jednotkového množství skla z teploty T na teplotu $T + dT$. Ke stejnému zvýšení teploty stejného množství různých látek je potřeba rozdílné množství tepla.

Měrná tepelná kapacita skel, stejně jako ostatních látek, je závislá na teplotě a se zvyšující se teplotou se zvyšuje a asymptoticky se blíží konstantní hodnotě. Proto byl zaveden pojem střední měrné tepelné kapacity $\bar{c}_p$, který je definováno vztahem

$$\bar{c}_p = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \frac{1}{m}. \quad (3.24)$$

Je-li známa závislost $c_p = f(T)$ lze provést výpočet střední měrné tepelné kapacity $\bar{c}_p$ [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] pro interval $\Delta T = T_1 - T_2$

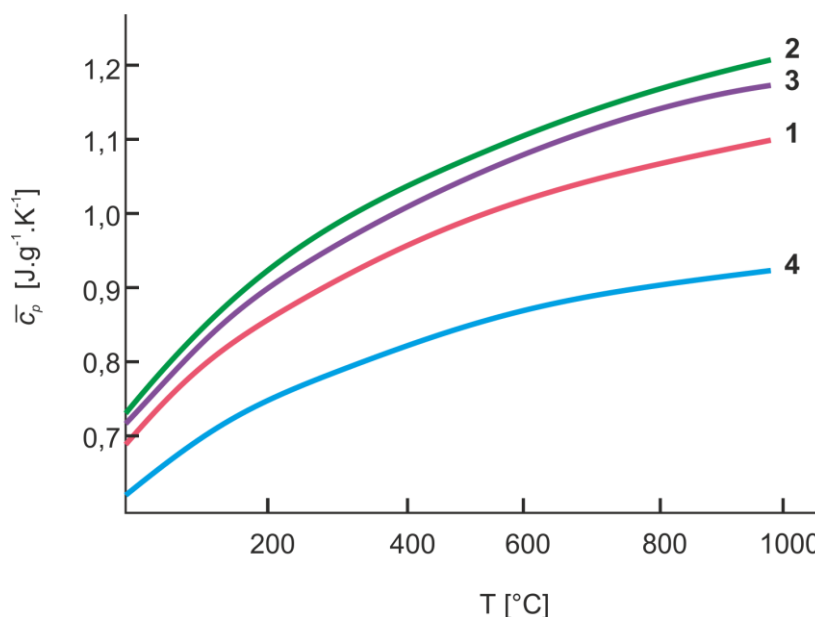
$$\bar{c}_p = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} c_p dT, \quad (3.25)$$

kde $\bar{c}_p$ je aritmetický průměr všech hodnot $f(T)$ v intervalu ΔT .

Výpočet množství tepla ΔQ [J], jehož je potřeba k ohřátí m [kg] množství látky o ΔT [K], se zjednoduší, jestliže $\Delta Q = Q$

$$Q = \bar{c}_p m (T_2 - T_1). \quad (3.26).$$

Vzhledem k absolutním hodnotám střední měrné tepelné kapacity skel je výhodnější používat menší odvozenou jednotku $\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a u běžných průmyslových skel se pohybuje v rozmezí přibližně 0,46 až 1,20 $\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Ve srovnání s technickými křemičitými skly jsou hodnoty měrného tepla pro čiré křemenné sklo nižší, avšak vyšší než alkalickoolovnatokřemičitého skla s obsahem 22,3 % PbO. Závislost střední měrné tepelné kapacity na teplotě je pro vybraná skla uvedena na Obr. 3.12.



Obr. 3.12 Teplotní závislost střední měrné tepelné kapacity na teplotě: 1 – čiré křemenné sklo, 2 – sodnovápenatokřemičité sklo, 3 – boritokřemičité sklo, 4 – olovnaté sklo s obsahem 22,3 % PbO

Měření měrné tepelné kapacity se provádí směšovací metodou. Vzorek skla se vyhřeje v platinovém kelímku na zvolenou teplotu a přemístí do kalorimetru s vodní náplní. Po

dosažení teplotně rovnovážného stavu mezi vzorkem a kalorimetrem se vypočte z množství tepla, které vzorek předal kalorimetru, střední měrná tepelná kapacita.

3.4.4 Tepelná vodivost

Při definici tepelné vodivosti je možné vycházet ze vztahu

$$\frac{dQ}{d\tau} = -kA \frac{dT}{dx}, \quad (3.27)$$

kde dQ je množství tepla [Wh]¹, které projde za dobu $d\tau$ [h] plochou A [m²],

$-\frac{dT}{dx}$ - je teplotní gradient [K·m⁻¹],

k – konstanta úměrnosti – tepelná vodivost daného materiálu [W·m⁻¹·K⁻¹].

Potom měrná tepelná vodivost představuje množství tepla Q , které při ustáleném stavu projde za jednotku doby τ [h] jednotkou plochy A [m²] rovinné stěny, při jednotkové tloušťce d [m] a při jednotkovém teplotním rozdílu ΔT [K] protilehlých povrchů. Platí tedy

$$k = \frac{Q d}{A \Delta T \tau}. \quad (3.28)$$

Pokud je zde uvedena tepelná vodivost, je vhodné se zmínit o tepelné energii, která se může šířit v podstatě třemi způsoby:

- vedením (kondukcí), předáváním části kinetické energie mezi sousedními částicemi lišícími se střední kinetickou energií, při tomto procesu se částice nepřemísťují, pouze kmitají kolem svých rovnovážných poloh, tepelnou energii přenáší látka na nanoúrovni,
- prouděním (konvekci), při němž přenáší energii samotná látka na mikro až makroúrovni,
- zářením (sáláním, radiací), při němž tepelnou energii přenášejí elektromagnetické vlny.

V případě vedení jsou důležité částice (molekuly, ionty), které jsou v neustálém pohybu, jehož intenzita roste s teplotou. V pevných látkách, jakými jsou skla, se částice nacházejí ve stálém silovém poli ostatních částic a vychýlení každé z nich proto způsobuje vychýlení sousedních částic. Nemá-li látka (těleso) všude stejnou teplotu, vyrovnává se vzájemným působením částic jejich kinetická energie, takže teplejší části tělesa s vyšší energií molekul se ochlazují a chladnější části tělesa s nižší energií molekul se ohřívají.

Je-li ponořeno těleso do lázně jiné teploty než je teplota tělesa, probíhá výměna energie až do ustáleného stavu, kdy má celé těleso stejnou teplotu. V případě, že dvě části tělesa trvale udržujeme při nestejných teplotách, mají molekuly v teplejších částech trvale větší pohybovou energii než molekuly v chladnějších částech a energie z teplejších částí tělesa se přenáší na chladnější části. Přenos tepelné energie v tomto případě probíhá

¹ watthodina [Wh] = 3 600 joulů [J]

vedením tepla (v prvním případě neustáleným – nestacionárním vedením, ve druhém případě ustáleným – stacionárním vedením). Protože jde o interakci mezi kvanty tepelné energie, tzv. fonony, je nazýván tento mechanismus fononový.

Přenos tepla se značně zesílí, jsou-li v pohybu části látek větší než molekuly. Proto se v kapalinách nebo plynech vytváří proudění a přenos tepla se uskutečňuje prouděním. Proudění vzniklé pouze rozdílem hustot v kapalině se nazývá proudění volné, naproti tomu proudění vzniklé působením vnějších sil se nazývá nucené.

Tepelné záření nebo sálání je zcela jiné povahy, protože se jím přenáší tepelná energie z jednoho tělesa na těleso druhé bez zprostředkování prostředí. Přenos energie zářením probíhá i tehdy, je-li teplota prostředí mezi oběma tělesy podstatně nižší nebo vyšší, než je teplota obou těles. Tento přenos zářivé energie se děje v konečných množstvích, nazývaných fotony a mechanismus přenosu energie nazýváme fotonový.

U silikátových materiálů, tedy i u skel, se přenosu tepla účastní všechny tři mechanismy, takže pojem tepelná vodivost nabývá komplexního významu a metody měření jsou náročné.

V látkách prostupných pro tepelné záření prostupuje teplo kromě vedení též zářením. Efektivní tepelná vodivost k_{ef} je potom součtem tepelné vodivosti vedením k_v a tepelné vodivosti zářením (radiací) k_z

$$k_{ef} = k_v + k_z \quad (3.29)$$

Zářivá složka tepelné vodivosti k_z je při teplotě nižší než 400 °C minimální. Pod teplotou 300 °C prostupuje teplo ve skle pouze vedením. Při vyšších teplotách vzrůstá u bezbarvých skel podíl zářivé složky.

Mírou pro vznik nebo vyrovnaní teplotních rozdílů ve skle je *teplotní vodivost* (difuzivita) a [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]. Vzájemný vztah mezi teplotní vodivostí a tepelnou vodivostí je

$$a = \frac{k}{c_p \rho} \quad (3.30)$$

kde k je tepelná vodivost,

c_p – měrná tepelná kapacita,

ρ - hustota.

Čiré křemenné sklo vykazuje nejvyšší tepelnou vodivost ze všech technických skel. Při 20 °C je měrná tepelná vodivost čirého křemenného skla $1,3816 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, což je hodnota přibližně o 20 % větší než u boritokřemičitých skel a přibližně o 50 % větší než u vysoce olovnatého skla. Vzhledem k tomu, že největší tepelnou vodivost vykazuje křemenné sklo, pak záměnou SiO_2 za jiné oxidy ve skle její hodnota klesá. Podle vlivu záměny stejného množství různých oxidů je možno sestavit řadu poklesu tepelné vodivosti



Měrná tepelná vodivost sodnovápenatokřemičitého skla je pak uváděna na hodnotách kolem $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Znalost tepelné vodivosti je důležitá především při tavení a při vlastním tvarování. V případě tavení se jedná o přenos tepla radiací od hořáků nebo od nepřímého elektrického ohřevu. Také dochází k únikům tepla ze skloviny a pecní atmosféry přes vyzdívku STA. V případě tvarování přechází teplo ze skloviny do okolí (především sáláním) nebo formy (především vedením). Důležité je proto znát i tepelnou vodivost dalších materiálů (vyzdávka STA, materiál forem,...).

3.4.4.1 Metody měření tepelné vodivosti

Metody měření tepelné vodivosti lze rozdělit do dvou základních skupin:

- měření při stacionárním toku tepla,
- měření při nestacionárním toku tepla.

Nejznámější metodou první skupiny je tzv. *desková metoda*. Její princip spočívá v tom, že jedna plocha o velikosti A měřené rovinné planoparalelní desky (kruhové nebo čtvercové) se přiloží k ohřívači a protilehlá plocha desky k chladiči. Okrajové plochy desky jsou buď dokonale izolovány, nebo jsou opatřeny vytápěnými kompenzačními pásy, které zabrání výměně tepla s okolím. V desce definované tloušťky se vytvoří mezi jejím horkým a studeným povrchem stacionární teplotní spád $\Delta T = T_1 - T_2$. Kromě obou teplot, které musí být po dobu měření konstantní, se ještě měří množství tepla Q , které vstupuje z ohřívače do měřeného vzorku (např. se měří napětí U a proud I udržující ohřívač na konstantní teplotě). Měrná tepelná vodivost se vypočte ze vztahu (3.28).

Příkladem metody měření při nestacionárním toku tepla je tzv. *metoda horkého drátu*, jejíž princip spočívá v měření vzestupu teploty T lineárního tepelného zdroje (horkého drátu) délky l , umístěného uprostřed měřeného prostředí. Má-li tento lineární tepelný zdroj konstantní vstup energie Q , bude jeho teplota t v průběhu času τ stále narůstat a to tím rychleji, čím menší tepelnou vodivost bude mít okolní prostředí. Vynesení hodnot teploty T proti logaritmu doby měření $\ln \tau$ je získána přímka, jejíž směrnice bude nepřímo úměrná měrné tepelné vodivosti k měřeného skla. Tato metoda se vztahuje k měření tzv. *pravé tepelné vodivosti* řízené mechanismem vedení tepla (kondukcí), tedy do teplot max. 500 až 600 °C.

3.5 Hustota

Hustota ρ je definována jako hmotnost měrného objemu homogenní látky při dané teplotě

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3.31)$$

kde ρ je hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$] homogenního tělesa při dané teplotě,

m - hmotnost tělesa [kg , g],

V - objem tělesa [m^3 , cm^3].

Hustota, stejně jako další vlastnosti skla, závisí na jeho chemickém složení. Skla různého chemického složení se liší hodnotou hustoty v závislosti na atomovém čísle, atomové hmotnosti a rozměrech iontů, vnášených formou oxidů do skel. Hustota většiny alkalickovápenatokřemičitých skel se pohybuje okolo hodnoty $2\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, tato hodnota je považována pro komerční skla za střední. Pouze křemenné sklo a technická skla obsahující větší podíl oxidu křemičitého SiO_2 a oxidu boritého B_2O_3 , dále některá skla pro zátavy kovů ve vakuové elektrotechnice mají hustotu relativně malou, mezi $2\,200$ a $2\,300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Naopak skla olovnatá a některá další mají hustotu větší než $3\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, speciální skla s přechodovými prvky (některá skla optická a ochranná proti rentgenovému a gama záření) dosahují výjimečně vysoké hustoty, $5\,000$ až $7\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Vzhledem k vysoké citlivosti hustoty na složení skla a jeho odchylky, plynulé sledování kolísání hustoty nahrazuje někdy kontrolní rozbor skla i kontrolní rozbor sklářských kmenů.

Hustota skla se přirozeně také mění s teplotou. Například u plaveného plochého skla Float se jeho hustota při běžných teplotách uvádí $2\,400$ až $2\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (v závislosti na složení). Při teplotách nad $1\,400\text{ °C}$ je hustota pod $2\,300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Předpokládá se, že hustota skla se při vysokých teplotách mění lineárně.

Ke stanovení hustoty skla se používá následujících metod:

- metoda pyknometrická, která se využívá k přímému stanovení u malých vzorků: hmotnost vzorku se určí vážením, objem pak nepřímo z hmotnosti vody vytlačené vzorkem z pyknometru,
- hydrostatická metoda dvojího vážení, která se používá při zjišťování hustoty větších kusů skla, případně i celých výrobků,
- měření v těžkých kapalinách. Tato metoda je velmi rychlá a přesná a používá se jako provozní metoda k denní kontrole stálosti složení skla. Vzorek a standard známé hustoty se zahřívá stejnou rychlostí v těžké kapalině (směs α -bromnaftalenu a acetylentetrabromidu). Zahříváním se hustota kapaliny plynule snižuje a vzorky klesají. Z rozdílu teplot, při nichž vzorek a standard míjejí srovnávací značku na měřicím válci, je možno hustotu vzorku vypočítat.

3.6 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti skla jsou důležité pro použití výrobků ze skla ve všech oblastech. Nejprísnější jsou požadavky při jeho použití jako konstrukčního materiálu. Jak bude dále zdůvodněno, mechanické vlastnosti skel jsou závislé zejména na kvalitě povrchu, tvaru a rozměrech výrobků a na tepelné historii, vliv složení skla je nižší.

Rozborem měření pevnosti skla v nárazu, tlaku a ohybu se zjistilo, že příčinou rozbití skla jsou vždy tahové síly, které vznikají při působení kteréhokoli z uvedených namáhání. Skla jsou všeobecně desetkrát až patnáctkrát méně pevná při tahovém namáhání než při tlakovém. Výsledky měření pevnosti řady vzorků téhož skla vykazují značný rozptyl, což souhlasí i s praktickými zkušenostmi při užití skla v technice. Při vysvětlení tohoto jevu se vychází z předpokladu existence trhlinek na povrchu skla, které jsou zárodkem začínajícího porušení.

Na základě lomové mechaniky se při studiu lomu skla vychází z předpokladu, že se sklo až do lomu řídí Hookovým zákonem a plastická deformace je omezena pouze na nejbližší okolí kořenu trhlinky. Ve srovnání s kovy je tak mez pevnosti při pokojové teplotě u skel nižší než mez pružnosti a při vyšších teplotách se obtížně odlišuje plastická deformace od viskózního toku.

Lom skla je procesem vzniku trhlinky a jejího šíření. U skel se vychází z předpokladu existence tzv. Griffithových trhlinek ve skle ještě před zatížením. Tyto trhlinky, rozměru řádově desítek nm, vznikají na povrchu skla při výrobě a nejsou tedy vlastností materiálu. Při zatěžování se sklo deformuje nejprve elasticky a při dosažení kritické pevnosti v tahu se náhle poruší křehkým lomem, vycházejícím z povrchu. Vztah mezi délkou (případně hloubkou) trhlinky a pevností skla při porušení je možno vyjádřit rovnicí

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}}, \quad (3.32)$$

kde σ je kritické napětí, při němž dochází k prasknutí [Pa],

E - Youngův modul pružnosti v tahu [Pa],

γ - povrchové napětí [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$],

a - rozměr trhlinky [m].

Vliv kvality povrchu je možné demonstrovat na pevnosti v ohybu plochého skla po poškrábání brusným papírem se zrny karbidu křemíku (siliciumkarbidu) o různé velikosti uvedené v Tab. 3.3. (Zrnitost je uváděna v počtu otvorů síta na jeden palec, podle normy FEPA, tady vyšší hodnota znamená jemnější zrna.)

Tab. 3.3 Pevnost v ohybu plaveného plochého skla tloušťky 2,8 mm a její ovlivnění poškrábáním povrchu

Poškrábání povrchu papírem		Strana	Pevnost v ohybu [MPa]	
Zrnitost podle FEPA	Měrný rozměr zrna [μm]		Průměrná hodnota	Vliv poškrábání
Výchozí, neporušený vzorek	-	Necínová Cínová	238 117	1,00 1,00
Č. 500	13,3 - 11,3	Necínová Cínová	73 77	0,31 0,66
Č. 240	63 - 53	Necínová Cínová	32 31	0,13 0,25
Č. 36	600 - 500	Necínová Cínová	19 18	0,08 0,15

Mechanickou pevnost skla snižují dále strukturní nehomogenity, ať již ve formě krystalků, šlír, kamínků, bublin nebo nemísitelných fází (kap. 12).

Dále je to únava, která vzniká v průběhu dlouhodobého namáhání skla, při kterém dochází ke koncentraci napětí na povrchu trhlinek a napětí se v průběhu času stále zvyšuje,

až dojde k překonání pevnosti skla. Únavu ovlivňují i korozní účinky především vodní páry a také zvýšená teplota. Při dlouhodobém zatěžování se začíná projevovat i vliv stárnutí.

Mechanické vlastnosti skla jsou také ovlivněny chlazením výrobku a případně jeho tvrzením (jedná se o vliv vnitřního napětí, kap. 3.7).

Mechanická pevnost skla je také ovlivněna tvarem a složitostí výrobků. Obecně platí, že velké a tvarově složité výrobky ze skla mají nižší mechanickou pevnost (a i rozptýlené naměřené hodnoty je vyšší) než výrobky malé a tvarově jednodušší. Naměřené pevnosti kusového skla činí v průměru desetinu až patnáctinu pevnosti skleněných vláken. Předpokládá se, že vlivem krátké doby tuhnutí se na povrchu nalézá menší počet trhlinek. Pevnost vláken se zvyšuje od vláken nižšího průměru než 1 μm a při 0,1 μm se blíží pevnost vláken teoretické.

Vliv chemického složení na mechanické vlastnosti je nižší než kvalita povrchu, povrchová únava, chlazení, tvrzení apod. Obecně platí, že pevnost skla zvyšují oxidy, které zvyšují chemickou odolnost (která nepřímo ovlivňuje kvalitu povrchu).

3.6.1 Modul pružnosti a Poissonova konstanta

Youngův modul pružnosti v tahu E [Pa] je určen Hookovým zákonem ve tvaru

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (3.33)$$

modul pružnosti ve smyku G [Pa] pak

$$G = \frac{\tau}{\gamma}, \quad (3.34)$$

kde σ je napětí v tahu [Pa],

ε – poměrné prodloužení [-],

γ – poměrné posunutí [-],

τ – napětí ve smyku [Pa].

Poissonova konstanta μ [-] je konstantou úměrnosti mezi poměrnou deformací ve směru napětí a poměrnou deformací ve směru kolmém k působícímu napětí. Je určena vztahem

$$\mu = \frac{\varsigma}{\varepsilon} = \frac{E-2G}{2G}, \quad (3.35)$$

kde ς je poměrná deformace ve směru kolmém ke směru napětí [-],

ε – poměrná deformace ve směru napětí [-].

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty modulu pružnosti v tahu E , ve smyku G a Poissonovy konstanty μ nejčastěji vyráběných skel.

Tab. 3.4 Moduly pružnosti E, G a Poissonova konstanta μ u nejčastěji používaných skel a několika kovů

Sklo	E [MPa]	G [MPa]	μ [-]
Křemenné sklo (podle SÚ H.K.)	73 089	31 509	0,16
Sodnodraselný křišťál	66 851	27 458	0,217
Olovnaté sklo (21 % PbO)	58 417	24 133	0,211
Ploché sklo	72 479	29 753	0,220
Sklo Simax	62 918	26 722	0,176
Kovy			
Ocel	200 000 – 220 000	70 000 – 85 000	0,28
Měď	120 000 – 130 000	42 000 – 47 000	0,34
Hliník	66 000 – 68 000	26 000 – 28 000	0,33

Moduly pružnosti jsou ovlivněny složením skla a předpokládají se souvislosti s pevností vazeb, těsností částic ve skelné síti, s deformabilitou iontů a tedy i s iontovou relaxací, koordinačním číslem apod.

Moduly pružnosti vychlazených skel pod transformační teplotou T_g klesají se vzrůstající teplotou s výjimkou křemenného skla, skla Pyrex a Simax, u nichž moduly vzrůstají. V oblasti teplot nad T_g hodnoty modulů skel prudce klesají. Nevychlazená a tvrzená skla vykazují moduly pružnosti v tahu nižší než skla vychlazená, přičemž Youngův modul pružnosti E tvrzeného skla je nižší zhruba o 7 %.

Měření Youngova modulu pružnosti se provádí řadou metod. Následně jsou uvedeny jen příklady.

Statické metody – většinou se využívá měření průhybu tyčí či destiček při zatěžování ohybem. Pro ohyb třemi přímkovými břity se průhyb vzorku odečítá v místě maximálního průhybu pod středním břitem.

Dynamické metody – tyto metody jsou založeny na měření rychlosti šíření ultrazvukových vln vzorkem, přitom rychlost šíření ultrazvuku závisí na elastických vlastnostech prostředí a na jeho hustotě. Tyto metody jsou přesnější než metody statické a dělí se na impulsové a rezonanční.

3.6.2 Pevnost v tahu, tlaku, ohybu a smyku

Skla se při namáhání za pokojové teploty chovají jako materiály křehké, které se do svého porušení deformují pouze pružně a plastickou deformaci je možno zanedbat. V rozsahu pružné deformace platí Hookův zákon ve tvaru

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (3.36)$$

kde σ je napětí [Pa], pro které platí

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.37)$$

E - Youngův modul pružnosti v tahu [Pa],

ε - poměrné prodloužení [-],

F - vnější působící síla [N],

A - plocha [m²].

V úvodu byly zmíněny značné rozdíly v pevnosti skel v tahu, tlaku (10 až 15krát vyšší pevnost než v tahu) a ohybu (2krát vyšší pevnost než v tahu). V případě ideální homogenní mikrostruktury a povrchového nepoškození, by teoretická pevnost skla dosáhla pevnosti vazeb, řádově 20 000 až 30 000 MPa. Povrchové defekty a strukturní nehomogenity však snižují pevnost skla v tahu na 40 až 100 MPa, v tlaku pak na 500 až 2 000 MPa. Kdyby se Griffithovy trhlinky v povrchové vrstvě skla podařilo odstranit, mělo by sklo pevnost minimálně 10x větší a blížila by se pevnosti teoretické.

Pevnost v tahu se měří pomocí trhacích zkoušek, problémy se projevují především při upínání vzorků. Pevností v tahu se rozumí největší zatížení, které snese zkušební vzorek při trhací zkoušce tahem, vztažené na jednotku jeho průřezu.

Při měření pevnosti v tlaku se k měření používají vzorky ve tvaru krychle, hranolku, válečku apod. Čelní plochy vzorků, které jsou ve styku s čelistmi zkušebního zařízení, jsou jemně vybroušeny a vyleštěny. Ke stanovení se používá většího počtu vzorků. Při měření jsou vzorky zatěžovány mezi dvěma paralelně broušenými ocelovými deskami. Pevnost v tlaku je zatížení, při němž se zkušební tělísko rozdrtí.

Pevnost v ohybu se měří metodou zatěžování třemi přímkovými břity (maximální napětí vzniká pod středním břitem na povrchu protilehlém k tomuto břitu), metodou zatěžování čtyřmi symetricky uloženými přímkovými břity (maximální napětí vzniká pod středními břity na povrchu protilehlém těmto břitům a je konstantní v celé oblasti mezi středními břity) nebo metodou zatěžování dvěma soustřednými kruhovými břity nestejného průměru.

3.6.3 Rázová houževnatost

Rázovou houževnatost můžeme charakterizovat pevností skla v ohybu rázem, tj. dynamickou pevností v ohybu. Pevnost v ohybu rázem je definována prací potřebnou k přeražení zkušebního vzorku a vztaženou na plochu průřezu. Rychlost přeražení je řádově 10⁻³ až 10⁻⁴ s.

Rozeznáváme zkoušky nárazem:

- kladiva podle Charpyho,
- kyvadlovým kladivem,
- ocelové koule,
- pytlíkem s broky,
- maketou hlavy, tzv. fantomem.

Konkrétní typ zkoušky se zpravidla volí podle účelu použití výrobku ze skla a zkoušky jsou pro konkrétní účely normované.

3.6.4 Tvrdost

Tvrdost je schopnost povrchu materiálu zachovávat svůj tvar při soustředěném mechanickém zatížení. Tvrdost skla je značně vysoká, je srovnatelná s tvrdostí kalené oceli. Pro vysokou tvrdost je sklo odolné proti poškrábání při běžném kontaktu s jinými materiály. V Mohsově stupnici vrypové tvrdosti zauímají skla pátý až sedmý stupeň.

Pro měření tvrdosti skla se používají nejčastěji vnikací metody, zpravidla podle Vickerse nebo Knoopu. Principem je vtlačování tělesa definovaného tvaru a rozměru do povrchu skla a vytvořený vtisk se měří a pozoruje pod mikroskopem.

Vickersova metoda je založena na vtlačování diamantového jehlanu do povrchu skla. Hodnota tvrdosti je pak dána podílem použitého zatížení a povrchu vtisku. S ohledem na velmi malá užívaná zatížení (setiny až několik N) a malé vtisky se jedná o mikrotvrdost. U většiny skel se Vickersova tvrdost HV pohybuje mezi 4000 až 7000 MPa. Nejtvrdší je křemenné sklo (7 000 MPa), tvrdší jsou skla hlinitokřemičitá a boritokřemičitá, nejměkčí jsou skla s vysokým obsahem PbO, pro ploché plavené sklo je uváděna hodnota 5 300 MPa.

3.6.5 Brusná tvrdost

Mírou brusné tvrdosti skel je množství skla, odbroušeného volným nebo vázaným brusivem za konstantních, přesně definovaných podmínek, tj. při určité rychlosti otáčení brusného kotouče za konstantního tlaku po proběhnutí určité dráhy a při použití standardního brusiva definované zrnitosti (smírek, diamantový prášek, křemičitý písek). U vázaného brusiva se používá obvykle syntetický korund nebo diamantový kotouč.

3.6.6 Odolnost proti přetlaku

Pevnost skleněných výrobků proti vnitřnímu přetlaku se stanovuje u dutých výrobků a trub. Výrobky se naplní vodou pod tlakem, který se postupně zvyšuje až do prasknutí výrobku. Rychlost zvyšování tlaku a doba působení jsou definovány a činí přibližně 0,1 až 0,4 MPa·s⁻¹. Na předepsaných hodnotách je výdrž 15 až 60 sekund, přitom minimální naměřený vnitřní přetlak bývá 1,5 až 2násobkem provozního tlaku.

3.6.7 Způsoby zvyšování pevnosti skel

Příčinou malé a často nedostačující pevnosti skla je především jeho nízká pevnost v tahu. Závažným činitelem, který podstatně snižuje pevnost skla je existence povrchových defektů (nejen Griffithových trhlinek). Při snaze o zvýšení pevnosti skla je nutné se na předchozí činitele soustředit a jejich vliv odstranit nebo alespoň minimalizovat. Níže budou jednotlivé používané metody charakterizovány.

3.6.7.1 Tvrzení

Prudkým ochlazením povrchu skla dojde k jeho smrštění a po ochlazení celého výrobku se v povrchových vrstvách vytvoří trvalé tlakové napětí. Trhlinky na povrchu skla jsou tímto napětím svírány, takže k jejich zvětšení je třeba větší síly. Metoda je v praxi využívána především při výrobě bezpečnostního skla (ať již stavebního, interiérového či autoskel), kap. 11.2.5.

3.6.7.2 Výměna iontů v povrchové vrstvě

Při této metodě se tlakové napětí vyvolá tak, že se v povrchové vrstvě provede výměna sodných kationtů za kationty větších rozměrů. Jako příklad je možno uvést výměnu kationtu Na^+ za K^+ (nebo jiný kationt o větším iontovém poloměru) ponořením skla do taveniny draselných solí.

3.6.7.3 Odstranění povrchové vrstvy

Tento způsob využívá působení kyseliny fluorovodíkové a spočívá v odleptání povrchové vrstvy skla, v níž jsou soustředěny defekty, které pevnost skla snižují. Pro leptání se používá obvykle směsi kyseliny fluorovodíkové s kyselinou sírovou.

3.6.7.4 Krystalizace povrchové vrstvy

Tepelným zpracováním skla vhodného chemického složení se v povrchové vrstvě vytvoří krystalky. Vytvořená krystalická fáze má negativní teplotní roztažnost (se vzrůstající teplotou se objem výrobku snižuje) nebo teplotní roztažnost nižší než základní sklo, proto při ochlazování vznikne v povrchové vrstvě tlakové napětí.

3.6.7.5 Další postupy

Kromě uvedených postupů se můžeme setkat např. s krystalizací skla pro zlepšení mechanických vlastností (kap. 3.3), dále s přejímáním povrchu skla (sklem nebo smaltem), při kterém se na povrchu skla vytvoří vrstvička s tlakovým napětím. Jiným postupem je laminování – skelné lamináty jsou speciální výrobky tvořené skleněnými vlákny spojenými vhodnou organickou pryskyřicí (kap. 11.4.1). Konečně lubrikace skleněných vláken přímo při jejich výrobě má za cíl i zvýšení jejich pevnosti.

3.7 Vnitřní napětí

Mechanická pevnost je mimo jiné i funkcí vnitřního napětí, které může ve výrobku vzniknout mechanickým nebo tepelným namáháním a také nedokonalým vychlazením. Při tvarování dochází stykem vnějšího povrchu výrobku s formou vlivem špatné tepelné vodivosti skla ke vzniku teplotního gradientu mezi povrchem výrobku a jeho vnitřními vrstvami. Tento teplotní gradient má za následek vytvoření napětí mezi různě teplými vrstvami skla. Vzniklé napětí by bez technologického postupu chlazení ve skle zůstalo, a proto se výrobky ze skla podrobují technologickému procesu řízenému ochlazování, tzv. chlazení (kap. 10).

Ze své podstaty může ve skle a sklovině vzniknout vnitřní napětí trvalé nebo přechodné.

3.7.1 Přechodné vnitřní napětí

Předpokládejme, že bude postupně ochlazována skleněná deska (podobného složení jako běžné ploché sklo vyrobené technologií float) zahřátá na teplotu $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, tedy na teplotu, kdy se sklo stále chová jako pevná látka. Deska je ochlazována pouze ze spodní strany, a to na teplotu $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, řez deskou je uveden na Obr. 3.13 A. Pro lepší vysvětlení, je vhodné desku rozdělit na několik imaginárních vrstev, Obr. 3.13 B. Při ochlazování této desky se v důsledku nízké tepelné vodivosti skla bude ochlazovat rychleji povrch spodní strany desky

než její vnitřní vrstvy a povrch její horní strany, Obr. 3.13 C. Vznikne tak teplotní gradient, jehož velikost souvisí s rychlostí ochlazování desky. Současně dojde vlivem dilatace ke smršťování spodních vrstev desky, které je větší než u vrstev vnitřních a horních. Jelikož se tyto vrstvy o rozdílné teplotě nemohou navzájem posunout (viskózní tok je při tak nízkých teplotách prakticky vyloučen), vznikne v desce napětí a to tahové na spodním povrchu a tlakové na horním povrchu desky. Při zachování teplotního gradientu bude napětí v desce přetrvávat až do okamžiku, kdy se spodní vrstva ochladí na cílovou teplotu 20 °C, Obr. 3.13 D. Jakmile se při pokračujícím ochlazování desky teploty mezi jejími vnitřními a vnějšími vrstvami vyrovnají, zanikne v celé desce vnitřní napětí, které se nazývá **přechodné napětí**. V případě zahřívání bude mít vzniklé napětí opačný charakter – tedy tahové uvnitř a tlakové na povrchu desky.

Velikost tohoto napětí závisí zejména na teplotním gradientu (3.4.4), dále pak na teplotní roztažnosti (kap. 3.4.1) a také na vodivosti skla (3.4.4). Pokud je rychlost teplotní změny příliš vysoká, může vlivem přechodného napětí dojít k překročení mechanické pevnosti a k porušení výrobku. Navíc rychlé ochlazování je pro sklo nebezpečnější proto, že v povrchové vrstvě vzniká tahové napětí, které může způsobit rozvoj povrchových trhlinek snáze než napětí tlakové.

3.7.2 Trvalé vnitřní napětí

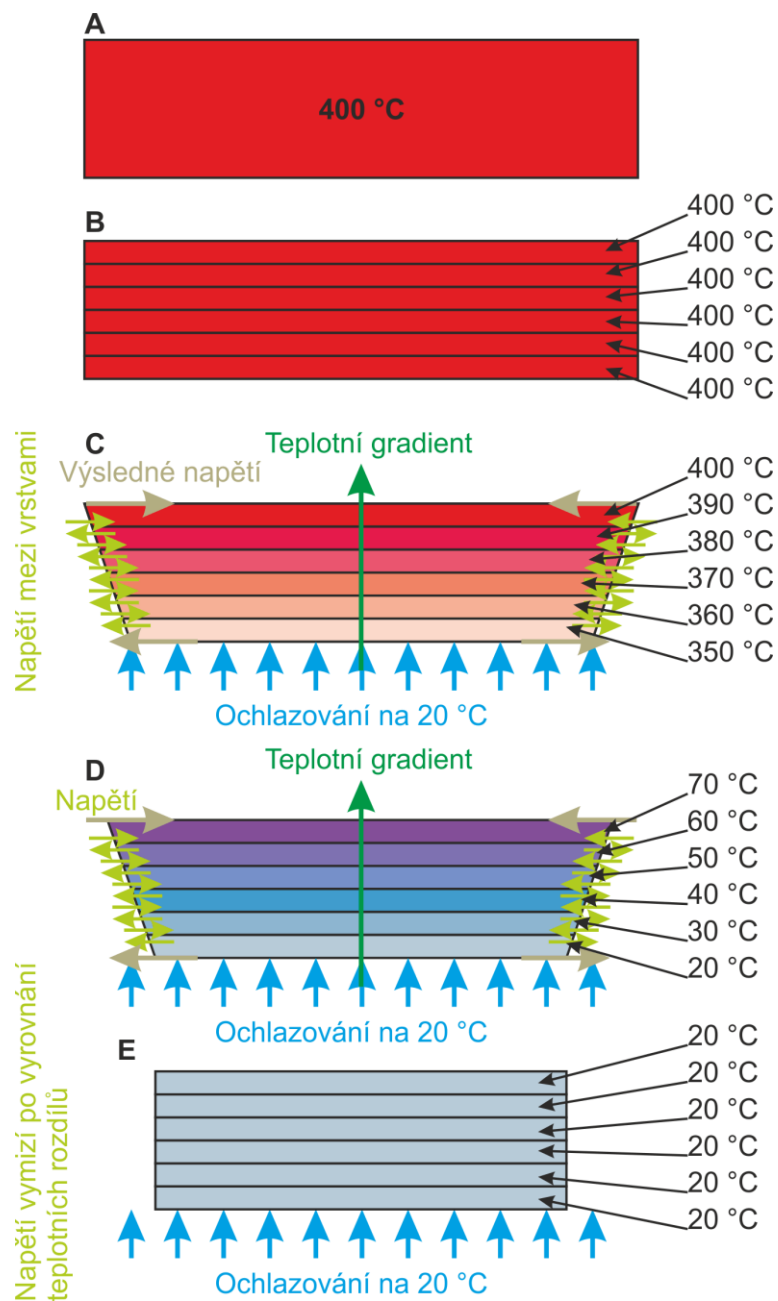
Předpokládejme nyní, že bude ochlazována stejná skleněná deska a stejným způsobem, ale tentokrát z teploty 550 °C (Obr. 3.14 A, B), při níž se výrobek jeví jako pevný, ale mezi vrstvami ve sklovině je umožněn viskózní tok. Jestliže se v důsledku ochlazování skleněné desky (v oblasti teplot těsně pod 550 °C) vytvoří teplotní gradient, nemá jeho přítomnost v desce za následek vznik napětí, neboť toto napětí se okamžitě vyrovná viskózním tokem vrstev skloviny, Obr. 3.14 C.

Jestliže rychlost ochlazování bude rovnoměrná, tj. vytvořený teplotní gradient bude konstantní, pak uvnitř desky nevznikne žádné napětí až do okamžiku, kdy dolní povrch desky dosáhne teploty okolí, Obr. 3.14 D. Jakmile se začne vyrovnávat teplota desky (teplota horního povrchu desky se bude blížit teplotě dolního povrchu), začne se v desce vytvářet vnitřní napětí (na dolním povrchu tlakové, na horním povrchu tahové), které se v důsledku vysoké viskozity skla nemůže vyrovnat deformací a zůstává ve výrobku jako **napětí trvalé**, Obr. 3.14 E. Ve vychladlé desce zůstane tedy trvalé vnitřní napětí, které se rovná svojí velikostí tomu napětí, které se v průběhu ochlazování vyrovnalo vnitřním viskózním tokem, ale má opačné znaménko (opačný charakter).

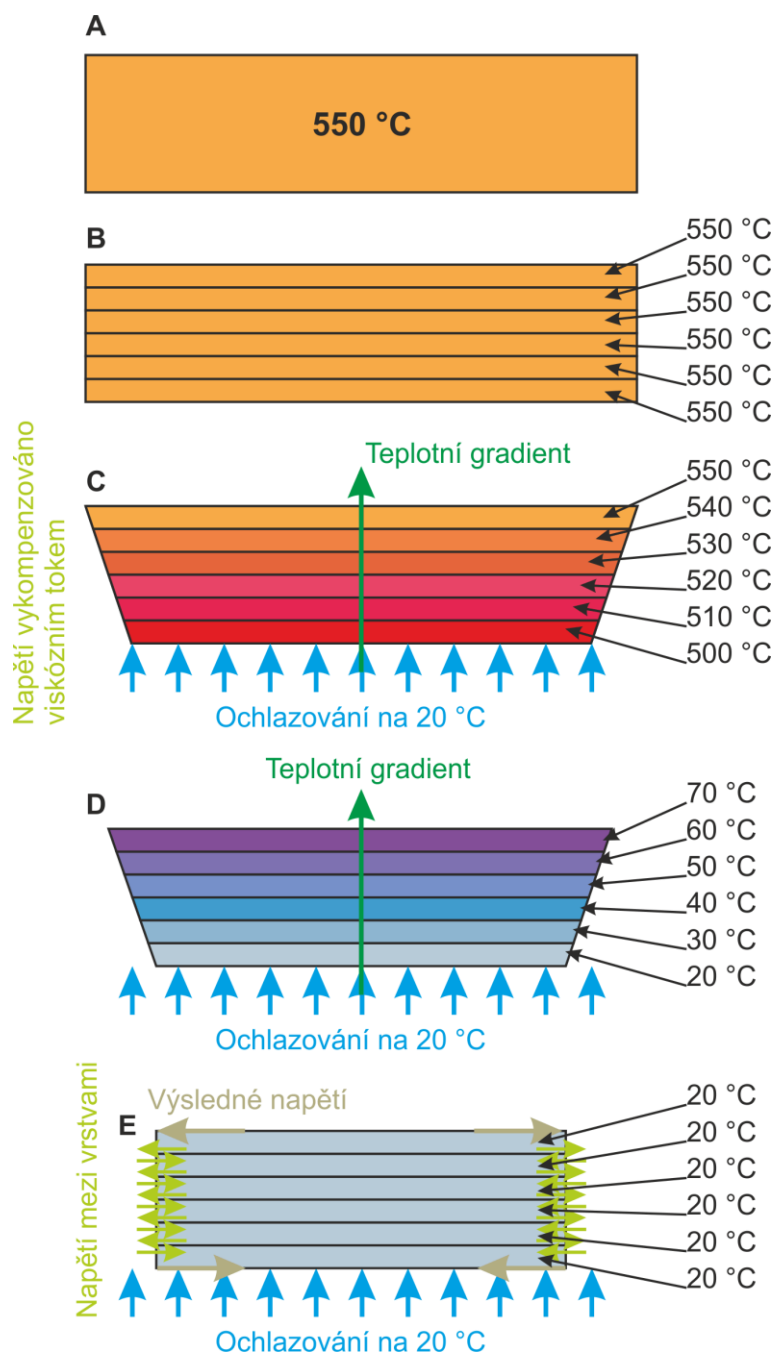
Trvalé napětí může ve skle vzniknout pouze tehdy, jestliže se vytvořil teplotní gradient při takových teplotách, při kterých je možný vnitřní viskózní tok skloviny a příslušný teplotní interval se nazývá chladicím intervalem. Chladicí interval je tedy rozmezí teplot, ve kterém dochází k vyrovnání napětí viskózním tokem skloviny v technologicky přijatelné době, ale kdy ještě nedojde v průběhu této doby k samovolné deformaci výrobku. Všechna napětí, která ve skle vznikají při teplotách ležících pod dolní hranicí chladicího intervalu, jsou přechodného charakteru, tedy napětí přechodná a trvají jen tak dlouho, dokud nedojde k vymizení teplotního gradientu. Mohou být ovšem vyvolána nejen změnou teploty, ale i mechanicky.

Pokud je viskozita nízká, vyrovnává se toto napětí viskózním tokem. Není-li v důsledku vysoké viskozity (nižší teplota) viskózní tok možný, zůstává toto napětí ve výrobku i po jeho

ochlazení. Aby velikost zbytkového napětí ve skle byla minimalizována, podrobují se skleněné výrobky řízenému ochlazování, kap. 10.



Obr. 3.13 Vývoj přechodného napětí v řezu skleněné desky: A – řez desky, B – imaginární rozdělení desky na vrstvy, C – počátek ochlazování desky, D – konec ochlazování desky, E – deska po vyrovnání teplot



Obr. 3.14 Vývoj trvalého napětí v řezu skleněné desky: A – řez desky, B – imaginární rozdělení desky na vrstvy, C – počátek ochlazování desky, D – konec ochlazování desky, E – deska po vyrovnání teplot

3.8 Elektrické vlastnosti

Znalost elektrických vlastností skla je důležitá při jejich využívání v elektrotechnice, elektronice i v dalších průmyslových odvětvích. Znalost elektrických vlastností skloviny je pak důležitá při elektrickém tavení skla nebo při aplikaci elektrického přehřevu. Elektrické vlastnosti skel jsou ovlivňovány zejména chemickým složením, teplotou, tepelným zpracováním a krystalizací.

Skla se obecně vyznačují vysokým elektrickým odporem, elektrickou pevností a nízkými dielektrickými ztrátami, naproti tomu speciální skla mají významné polovodivé elektrické vlastnosti, např. skla chalkogenidová a halogenidová mají elektrické vlastnosti využitelné zejména v moderní elektrotechnice.

3.8.1 Elektrická vodivost

Jednotkou elektrického odporu R je ohm $[\Omega]$, který je definován odporem vodiče, na němž při průchodu proudem 1 A vznikne napětí 1V. Převrácenou hodnotou je elektrická vodivost G , jejíž základní jednotkou v soustavě SI je Siemens.

Je rozeznávána **iontová vodivost** s transportem hmoty a **elektronová vodivost** bez transportu hmoty. Většina běžných typů sklovin se vyznačuje iontovou vodivostí, přičemž nositeli proudu jsou nejčastěji kationty alkalických kovů (především Na, K). U oxidových sklovin nealkalických nahrazují jejich působení kationty kovů Pb, Ba. Elektrická vodivost může být povrchová a objemová.

Povrchová vodivost bývá zřetelně vyšší než objemová vodivost téhož skla a je způsobena kondenzací velmi tenké vrstvy vodní páry na povrchu skla, ve které se rozpouštějí alkalické složky uvolněné korozí skla. Uplatňuje se při teplotách nižších než 100 °C, zvláště ve vlhké atmosféře, a úzce souvisí s chemickou odolností skla proti vodě. Měrný povrchový odpor ϱ_s se stanoví z podílu napětí a proudu, procházejícího pouze povrchem měřeného vzorku.

Objemová vodivost je definována pomocí měrného objemového odporu ϱ_v $[\Omega \cdot m]$

$$\varrho_v = R_v \cdot \frac{q}{h}, \quad (3.38)$$

kde R_v je vnitřní odpor $[\Omega]$,

q - průřez vzorku $[m^2]$,

h - délka $[m]$.

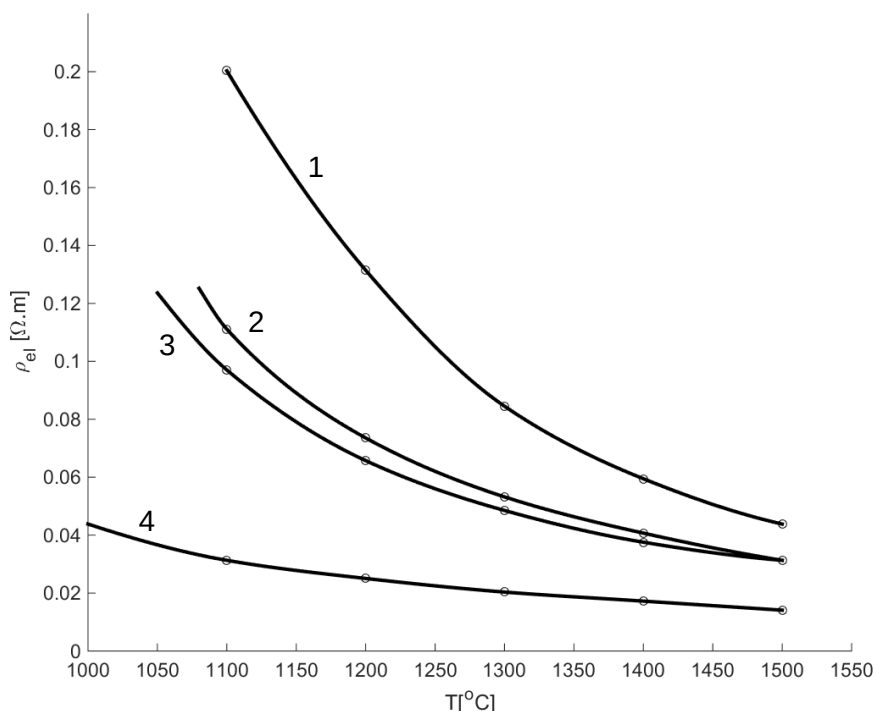
Měrný objemový odpor ϱ_v se stanoví z podílu proudu procházejícího objemovou částí skla k připojenému napětí a z geometrických rozměrů zkušebního hranolu nebo válce.

Jak již bylo řečeno, velká většina běžných sklovin jsou iontové vodiče, kde nositeli elektrického proudu jsou ionty alkalických kovů. Ty se pohybují v tavenině vlivem působení elektrického pole sítí tetraedrů SiO_4 .

Elektrická vodivost se s rostoucí teplotou zvyšuje. Chemicky nejjednodušší sklovina – křemenná sklovina, se vyznačuje vynikající izolační schopností i za vysokých teplot, u běžných sklovin se elektrická vodivost do teploty asi 1400 °C mění až o 15 řádů (viz charakteristiky na Obr. 3.15).

Zvláštním jevem, který provází elektrodový ohřev skloviny při elektrickém tavení (při přímém ohřevu skloviny), je tzv. tepelná nestabilita (deregulační efekt). Dochází k tomu, že teplé, tedy vodivější oblasti skloviny, se v peci stále více zahřívají, protože jimi prochází stále větší proud, zatímco chladnější oblasti stále více chladnou. Kdyby zůstalo na elektrodách

stejně napětí, jev by se stupňoval. Napájecí obvod proto musí být opatřen regulací buď na konstantní proud, nebo impedanci.



Obr. 3.15 Závislost měrného objemového odporu některých sklovin na teplotě: 1 – sklo na výrobu TV baněk, 2 – ploché sklo, 3 – bílé obalové sklo, 4 – vodní sklo

Co se týče vlivu chemického složení skloviny, bylo již řečeno, že nejvýrazněji elektrickou vodivost snižuje rostoucí obsah oxidu křemičitého SiO_2 , naopak oxidy alkalických kovů Li_2O , Na_2O , K_2O vodivost zvyšují. Elektrickou vodivost je možné měřit nebo vypočítat. Z řady empirických vztahů je uvedena rovnice pro elektrickou vodivost

$$\log G = A - \frac{B}{T}, \quad (3.39)$$

kde T je absolutní teplota [K] a A , B jsou konstanty, které musí být nejprve zjištěny. Vzorec platí i za vysokých teplot, ale s jinými konstantami. Rovnici lze použít v intervalech 20 až 800 °C a 1000 až 1450 °C, tedy s výjimkou transformačního intervalu.

Orientační výpočet měrného odporu lze při znalosti výchozích podmínek provést pomocí Borelovy rovnice

$$\varrho_m = \varrho_{15} \cdot \frac{15}{m}, \quad (3.40)$$

kde ϱ_m je měrný odpor skloviny s obsahem m molárních % Na_2O ,

ϱ_{15} – měrný odpor skloviny s obsahem 15 molárních % Na_2O .

Při použití uvedené rovnice pro alkalická skla o složení $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ je nutno dosadit za m

$$m = \text{Na}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{K}_2\text{O}, \quad (3.41)$$

kde m je molární % udávající „fiktivní“ obsah alkálií (poloviční hodnota koncentrace K_2O odpovídá zhruba dvojnásobku poloměru iontu K^+ ve srovnání s iontem Na^+ , tedy i snížení jeho pohyblivosti sítí tetraedrů SiO_4).

Ve sklovinách se smíšenými alkáliemi a vysokým celkovým obsahem alkálií (nad 10 molárních %) se uplatňuje anomální chování spočívající v tom, že měrný odpor skloviny je významně vyšší než by odpovídalo lineární závislosti měrného odporu při ekvimolární náhradě alkalických kationtů. Výsledkem je průběh závislosti měrného odporu skloviny při ekvimolární náhradě alkálií s výrazným maximem. Ještě výraznější maximum se projevuje při měření měrného odporu obdobných skel pod teplotou T_g .

Často se jako charakteristika skloviny uvádí hodnota TK 100 (teplota, při které je měrný odpor skla $100 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$), Tab. 3.5.

Pro zjišťování velikosti elektrické vodivosti nebo odporu byla vyvinuta řada metod. Jako příklad uveďme princip kompenzační čtyřsondové metody používané pro získání základních údajů potřebných pro navrhování elektrických tavicích agregátů. Jedná se o měření závislosti měrného odporu skloviny na teplotě při střídavém napětí. Metoda je založena na měření úbytku napětí, který vzniká tím, že mezi dvěma platinovými elektrodami ponořenými do skloviny protéká proud. Úbytek napětí se kompenzuje úbytkem napětí vzniklým na ohmickém odporu, jímž protéká proud stejné velikosti i fáze jako roztavenou sklovinou. Proud se do skloviny zavádí proudovými elektrodami a úbytek napětí se zjišťuje napěťovými sondami.

Tab. 3.5 Vybrané skla a jejich odpor

Sklo	TK 100 [°C]	Měrný odpor log $\rho_{250^\circ\text{C}}$ [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Měrný odpor log $\rho_{350^\circ\text{C}}$ [$\Omega \cdot \text{cm}$]
Tepelně odolné sklo (Kavalier Sazava)	250	8,0	6,6
E-sklo (sklo pro skleněná vlákna)	300	8,8	7,3
Křemenné sklo	450	12,3	10,5

3.8.2 Dielektrické vlastnosti

Při působení střídavého proudu nebo střídavého elektromagnetického pole se uplatňují dielektrické vlastnosti související s polarizací dielektrika.

Kapacita C je schopnost dielektrika hromadit elektrický náboj, jednotkou je Farad [F]. Je dána vztahem

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{2A}{U^2} \quad (3.42)$$

kde Q je náboj [C],

U - elektrický potenciál [V],

A - energie elektrického pole [W·s].

Relativní permitivita ε udává míru polarizace dielektrika vyvolané elektrickým polem, je dána poměrem kapacity kondenzátoru, v němž je dielektrikem zkoumaná látka ke kapacitě kondenzátoru, v němž je dielektrikem vakuum.

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0} \quad (3.43)$$

kde C je kapacita kondenzátoru s dielektrikem [F],

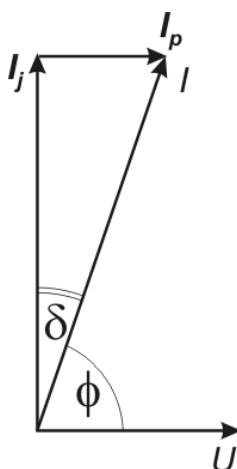
C_0 - kapacita kondenzátoru, kde je dielektrikem vakuum [F].

Ztrátový činitel $\tan \delta$ vyjadřuje ztráty, ke kterým dochází při polarizačních jevech. Např. v ideálním kondenzátoru připojeném ke střídavému napětí předbíhá elektrický proud napětí o 90° , takže posun mezi napětím a proudem bude menší než 90° (Obr. 3.16). Dielektrické ztráty odpovídají té části energie, která se při průchodu proudem reálným dielektrikem mění v teplo. Energie přeměněná na teplo je ztrátová. Ztrátový činitel můžeme vyjádřit

$$\tan \delta = \frac{I_p}{I_j} \quad (3.44)$$

kde I_p je vektor činného (ztrátového) proudu,

I_j - vektor kapacitního (jalového) proudu.



Obr. 3.16 Vektorový diagram ztrát v dielektriku

Úhel dielektrických ztrát δ je považován za důležitou charakteristiku izolantů. Čím je větší, tím větší (za jinak stejných podmínek) jsou dielektrické ztráty. U izolantů je požadováno, aby úhel dielektrických ztrát δ tedy i ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ byl co nejmenší. Mezi dobré izolanty řadíme ty, jejichž ztrátový činitel je řádově 10^{-4} až 10^{-3} . Izolanty se ztrátovým činitelem 10^{-2} až 10^{-1} jsou považovány za nevyhovující.

Ztrátové číslo p . Celkové ztráty v dielektriku závisí jak na relativní permitivitě ε , tak na velikosti ztrátového činitele $\operatorname{tg} \delta$ a jsou dány vztahem

$$p = \varepsilon \operatorname{tg} \delta \quad (3.45)$$

Vliv složení skla na dielektrické ztráty je v širokém rozsahu frekvencí závislý na odlišných mechanismech, takže se na křivkách $\operatorname{tg} \delta$ vyskytují různá maxima. Křemenné sklo se vyznačuje nízkými ztrátami, stejně jako boritokřemičitá skla. Příklady změřených hodnot některých skel jsou uvedeny v Tab. 3.6.

Tab. 3.6 Vybraná skla a jejich dielektrické vlastnosti

Sklo	Permitivita ε (1 MHz, 20 °C)	Ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4$
Tepelně odolné sklo (Kavalier Sazava)	4,6	40
E-sklo (sklo pro skleněná vlákna)	6,1	60
Křemenné sklo	3,8	1 až 2

3.8.3 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost skel je definována jako schopnost dielektrika odolávat působení elektrického pole vysokého napětí bez porušení a bez ztrát izolačních vlastností. Průraz izolantu je fyzikální děj, při kterém dochází k výboji. Výboj vzniká, pokud dojde k překročení kritického gradientu elektrického pole. Je to náhlý jev, při kterém dojde k vytvoření dokonale vodivé cesty uvnitř izolantu. Elektrická pevnost dielektrika je definována intenzitou pole E_p [$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$], při které došlo k průrazu podle vztahu

$$E_p = \frac{U}{k} \quad , \quad (3.46)$$

kde U je napětí mezi elektrodami [V],

k - vzdálenost mezi elektrodami [m].

V praxi se udává v $\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ nebo $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$. Dostí závisí na tvaru elektrod a na intenzitě pole ve zkoušeném materiálu. Rozlišuje se elektrická pevnost při stejnosměrném napětí a elektrická pevnost při střídavém napětí určitého kmitočtu. Rozlišujeme tyto druhy průrazu:

- čistě elektrický, který vede k porušení vazeb mezi nabitými částicemi. Musí být vyloučeny všechny zkreslující vlivy (nehomogenity, tvar vzorku, materiál elektrod, nečistoty apod.),

- tepelný, kdy dojde k zahřátí vlivem dielektrických ztrát, zvyšuje se teplota (a tím i dielektrické ztráty a elektrická vodivost), až je výsledným efektem průraz, který se projeví tavením skla,
- elektrochemický: při dlouhodobém působení elektrického pole mohou proběhnout nevratné chemické pochody.

Teoreticky elektrická pevnost skla činí 10^7 až $10^8 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ (tj. 10^4 až $10^5 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$), skutečná pevnost bývá o řád i více nižší. Je ovlivněna teplotou, chemickým složením, dobou působení elektrického pole, jeho frekvencí i tloušťkou vzorku. Například u vzorku skla vyhřátého na 100°C se elektrická pevnost výrazně mění s obsahem Na_2O . Při nulovém obsahu byla naměřena od 7 do $11\cdot 10^6 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ (podle druhu skel), při obsahu 15 hmot. % Na_2O klesá pod $2\cdot 10^6 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$.

3.9 Optické vlastnosti

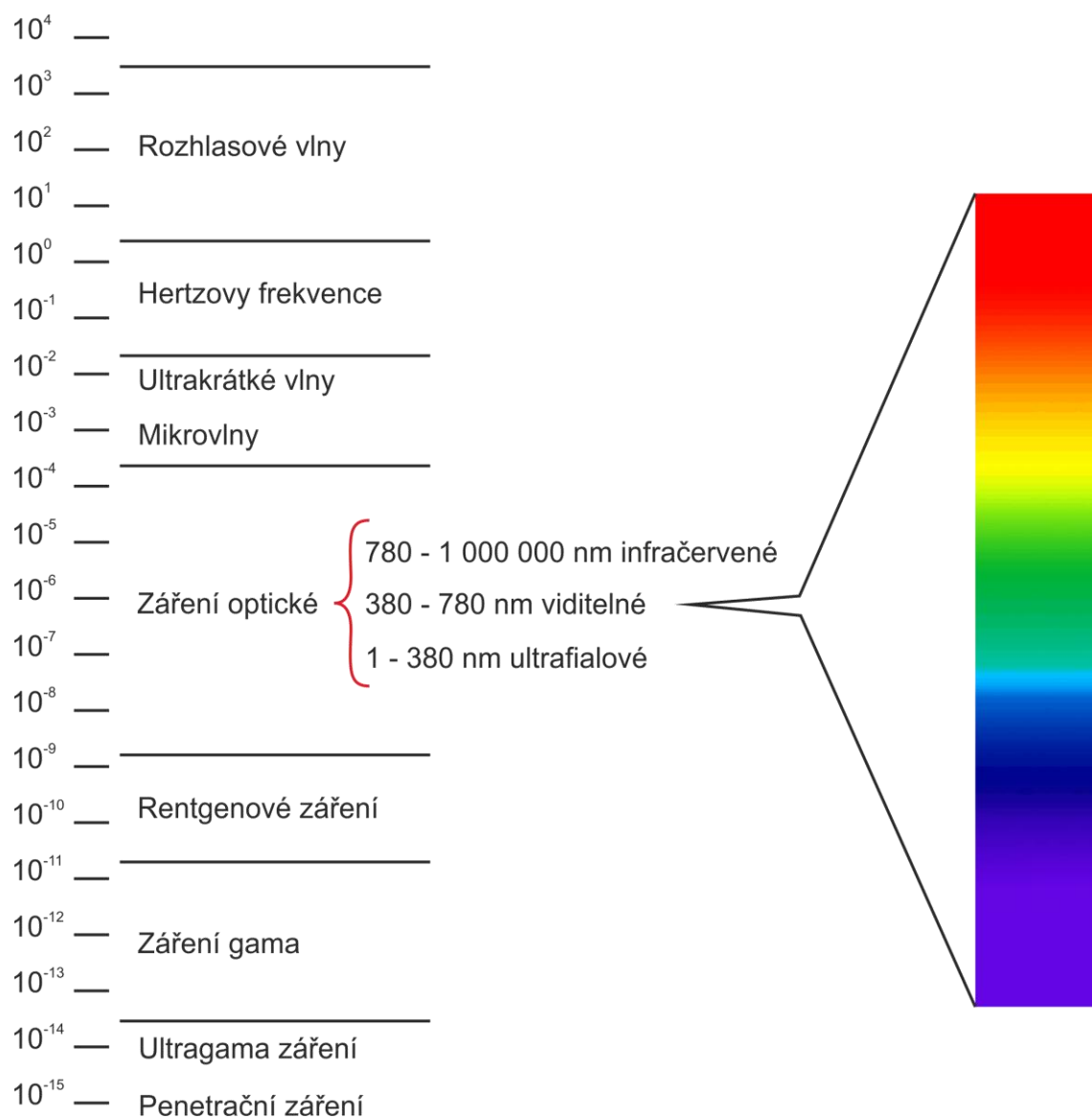
Významnými a často rozhodujícími vlastnostmi pro vzhled skleněných výrobků jsou optické vlastnosti, sklo je oceňováno pro svoji transparentci, ale i barvu a index lomu. Ve sklářství se lze setkat s největší barevnou škálou užívaných barev a odstínů v bižuterní výrobě. Nelze ovšem opomíjet využití optických vlastností skla pro technické účely, jako jsou skla selektivně propustná barvená ve hmotě (automobilové a stavební sklo), světlovody, optické soustavy, dále pak fotosenzitivní, fotoplastická, luminiscenční, laserová, fotochromatická, polychromatická a další speciální skla. Znalost optických vlastností je důležitá i pro povrchové vrstvy skla, které mění nejen jeho barevnost, ale především jeho propustnost pro některé složky elektromagnetického záření. Příkladem může být stavební sklo se selektivní propustností.

Pro úvod do této problematiky je vhodné zopakovat základní vlastnosti elektromagnetického záření, které zahrnuje širokou škálu záření od penetračního, přes gama záření, rentgenové záření a ultrafialové záření, po viditelné záření, infračervené záření, mikrovlny až po radiové vlny, Obr. 3.17.

Světlo lze chápat jako elektromagnetickou vlnu: každá světelná vlna má svoji složku elektrickou a magnetickou, přičemž obě lze vyjádřit vektorem. Jako vlnová délka (λ) průběžné světelné vlny se označuje vzdálenost mezi následnými vrcholy vln, amplituda (svítivost), frekvence je počet prošlých vln za jednu sekundu, Obr. 3.18 A. Třetí základní vlastností světla je úhel vlnění (polarizace), který si lze velice jednoduše představit jako elektromagnetickou vlnu, kmitající v jedné rovině o stejné vlnové délce, jak je vidět na Obr. 3.18 A (světlo monochromatické). Příkladem nepolarizovaného („běžného“) světla je schéma na Obr. 3.18 B, kdy elektromagnetické vlny jednotlivých složek světla kmitají v různých rovinách (v uvedeném příkladě, kolmo na sebe). Základní charakteristikou světla je jeho vlnová délka.

Bílým (denním) světlem je nazýváno světlo, které má ve viditelné oblasti zastoupeny všechny vlnové délky ve stejném poměru jako sluneční světlo a lidské oko ho vnímá jako nebarevné.

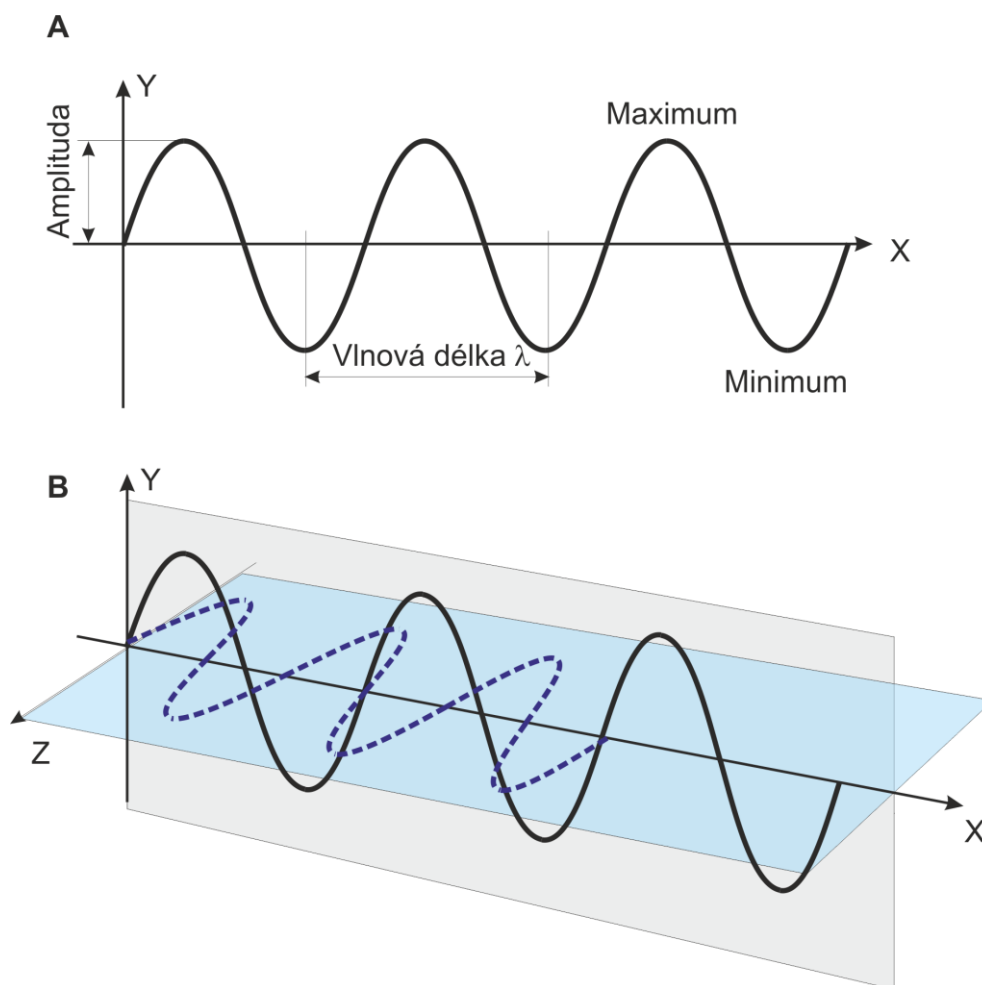
Světlo, které je viditelné lidským okem, se nachází v rozsahu vlnových délek 380 až 780 nm (Tab. 3.7) a různé vlnové délky vnímá lidské oko jako rozdílné barvy.



Obr. 3.17 Elektromagnetické záření a zobrazení barevného spektra viditelného záření

Tab. 3.7 Viditelné spektrum

Barva	Vlnová délka λ (nm)	Kmitočet ν (Hz)	Energie (eV)
červená	700	$4,29 \cdot 10^{14}$	1,77
oranžová	600	$5,00 \cdot 10^{14}$	2,06
žlutá	580	$5,17 \cdot 10^{14}$	2,14
zelená	525	$5,71 \cdot 10^{14}$	2,36
modrá	450	$6,66 \cdot 10^{14}$	2,75
fialová	400	$7,50 \cdot 10^{14}$	3,10



Obr. 3.18 Světlo jako elektromagnetické vlnění

Oblast kratších vlnových délek než je fialová (380 nm) se označuje jako ultrafialová (UV záření). Oblast delších vlnových délek než je červená (780 nm) se označuje jako infračervená (IR záření).

Rychlost světla ve vakuu je 299 792 458 metrů za sekundu, o něco nižší je rychlost světla ve vzduchu. Rychlost světla v jiných materiálech je podstatně nižší, což má za následek optické jevy při přechodu z jednoho prostředí do jiného, např. ze vzduchu do skla.

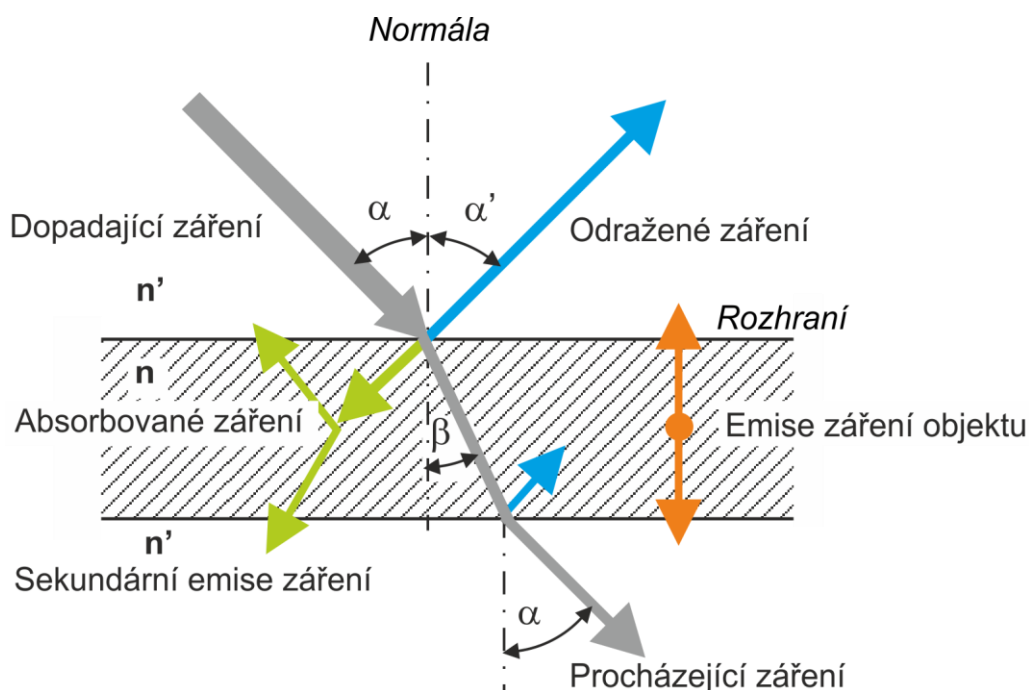
Při interakci světla se sklem se část záření od sledovaného skleněného objektu odráží, část se absorbuje, část způsobí v materiálu objektu sekundární emisi záření, část záření může projít a část záření může být emitována samotným objektem, Obr. 3.19. V následujícím textu jsou popsány některé optické vlastnosti důležité pro sklo.

3.9.1 Odraz a lom na optickém rozhraní

Dopadá-li paprsek monochromatického světla z prostředí indexu lomu n' na rozhraní, které je odděluje od prostředí indexu lomu n (sklo), dělí se obecně na dva paprsky. Jeden zůstává v prostředí indexu lomu n' (paprsek odražený) – jedná se o odraz (reflexi), druhý se láme do skla – jedná se o lom (refrakci). Úhel α , který dopadající paprsek svírá s kolmicí

vztyčenou v bodě dopadu na rozhraní je úhel dopadu, β je úhel lomu a α' úhel odrazu (Obr. 3.20). Podle zákona odrazu platí, že úhel odrazu se rovná úhlu dopadu

$$\alpha = \alpha' \quad (3.47).$$



Obr. 3.19 Interakce záření se sledovaným objektem

Lom světla je možno definovat jako změnu směru a rychlosti světelného paprsku při jeho průchodu optickým rozhraním. Matematicky lze poměr indexů lomu vyjádřit jako poměr sinu úhlu dopadu paprsku monochromatického světla a sinu úhlu lomu téhož paprsku podle Snellova zákona:

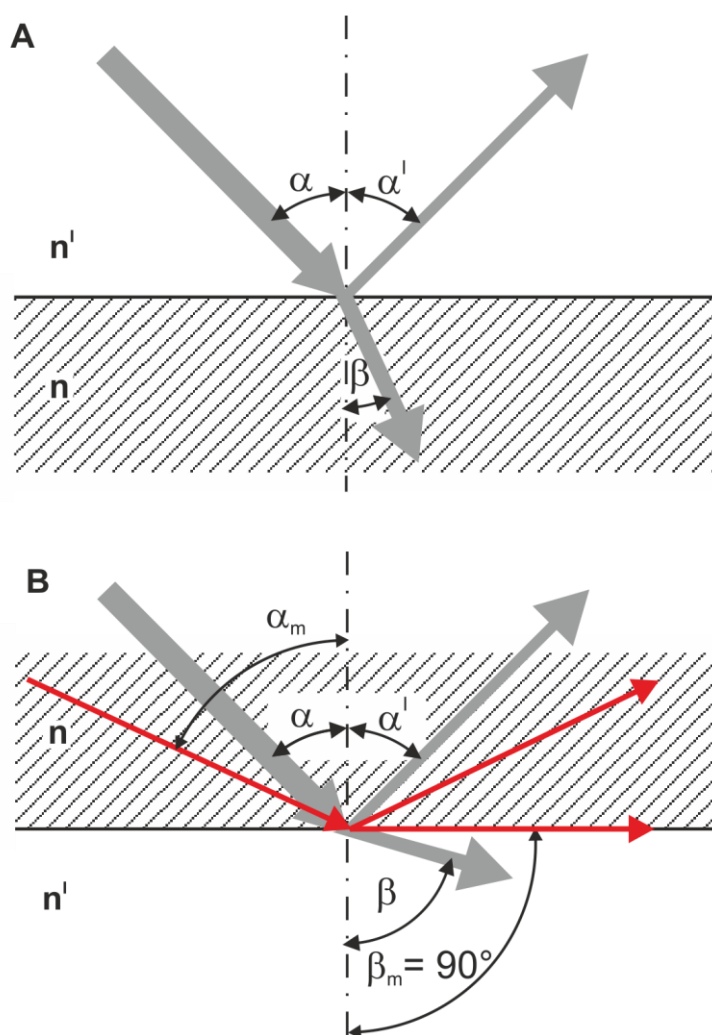
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n}{n'} \quad (3.48)$$

pro $n' = 1$, lze vztah přepsat do podoby

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}. \quad (3.49)$$

Protože je sklo obvykle obklopeno vzduchem, udává se nejčastěji index lomu skla vůči vzduchu. Je-li třeba určit index lomu skla ve vakuu, je nutno index lomu pro vzduch vynásobit koeficientem 1,00027.

Prochází-li paprsek z prostředí opticky řidšího do opticky hustšího, tedy $n' < n$, pak $\beta < \alpha$ paprsek se láme ke kolmici, Obr. 3.20 A. Naopak, prochází-li z prostředí opticky hustšího do opticky řidšího, tedy $n > n'$, pak $\beta > \alpha$ paprsek se láme od kolmice, Obr. 3.20 B. V tomto druhém případě při určitém úhlu dopadu α_m dochází k tomu, že úhel lomu je $\beta_m = 90^\circ$. Jedná se o tzv. mezní úhel dopadu nebo také kritický α_m , při kterém ještě dojde k lomu. Pro úhly dopadu větší, než je mezní úhel α_m , se veškeré světlo od rozhraní odráží; tento jev je nazýván *úplný* nebo *totální odraz*.



Obr. 3.20 Schematické znázornění lomu a odrazu: A – z opticky řidšího do opticky hustšího, B – z opticky hustšího do opticky řidšího

K odrazu a lomu dochází v rovině dopadu. Složka paprsku, která se odrazí je dána odrazivostí R a složka, která se láme a projde je dána propustností T_R . V případě, kdy světlo dopadá a odráží se ve směru normály (úhel dopadu $\alpha \approx \alpha' \approx 0$), platí pro odrazivost R_n

$$R_n = \left(\frac{n' - n}{n' + n} \right)^2. \quad (3.50)$$

Pro běžné sklo ve vzduchu platí, vzduch $n' \approx 1$ a sklo $n = 1,5$. Pak je odraženo okolo 4 % světla. Při kolmém průchodu světla skleněným předmětem (deskou) se však světlo odráží jak na povrchu při vstupu do předmětu, tak na povrchu při výstupu. Kombinaci obou odrazů R_g lze přibližně získat z rovnice:

$$R_g = \frac{2R_n}{(1+R_n)}, \quad (3.51)$$

a pak se dle výpočtu odrazí asi 7,7 % světla. I při použití velmi čistého skla (bezbarvého, bez absorpce) projde skleněnou deskou pouze asi 92,3 % kolmo dopadajícího světla. U skel s vyšším indexem lomu je množství prošlého světla ještě menší.

Odrazivost se bude zvyšovat s úhlem dopadu a bude ovlivněna i polarizací záření. Po zjednodušení Fresnelových rovnic je pro polarizované světlo v rovině kolmé na rovinu obrázku (Obr. 3.20) odrazivost dána rovnicí:

$$R_{\perp} = \left(\frac{n' \cos \alpha - n \cos \beta}{n' \cos \alpha + n \cos \beta} \right)^2 \quad (3.52)$$

a v případě, že polarizované světlo je v rovině rovnoběžné s rovinou obrázku, je odrazivost dána rovnicí:

$$R_{\parallel} = \left(\frac{n' \cos \beta - n \cos \alpha}{n' \cos \beta + n \cos \alpha} \right)^2. \quad (3.53)$$

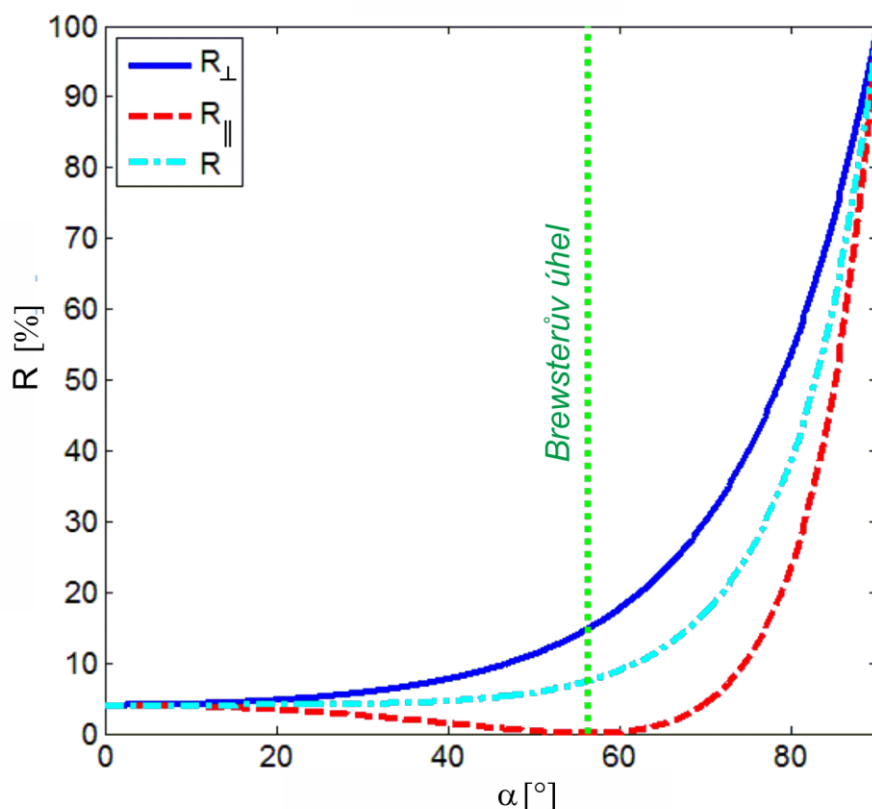
S použitím Snellova zákona:

$$\beta = \arcsin \left[\left(\frac{n'}{n} \right) \sin \alpha \right] \quad (3.54)$$

Ize odrazivost $R_{\perp}$ a $R_{\parallel}$ kompletně odvodit z úhlu dopadu α . V případě, že je světlo nepolarizované, platí:

$$R = \frac{R_{\perp} + R_{\parallel}}{2}. \quad (3.55)$$

Závislost odrazivosti na úhlu dopadu a polarizaci světla je uvedena na Obr. 3.21.



Obr. 3.21 Závislost odrazivosti R (skla na vzduchu) na úhlu dopadu α a polarizaci světla, pro $n' \approx 1$ a $n = 1,5$

V případě, že je dopadající světlo polarizováno v rovině rovnoběžné s rovinou obrázku, odrazivost $R_{\parallel}$ klesá do Brewsterova úhlu, při jehož dosažení světlo dokonale prochází skrz povrch, pak odrazivost roste. Brewsterův úhel α_B je definován vztahem

$$\alpha_B = \arctan\left(\frac{n}{n'}\right). \quad (3.56)$$

Pro rovinu povrchu skla s indexem lomu 1,5 je $\alpha_B = 56,31^\circ$.

Index lomu závisí na chemickém složení skla, na teplotě a na vlnové délce světla, které na sklo dopadá. Vzhledem k jeho závislosti na vlnové délce dopadajícího světla je nutné jej uvádět současně s udáním příslušné vlnové délky.

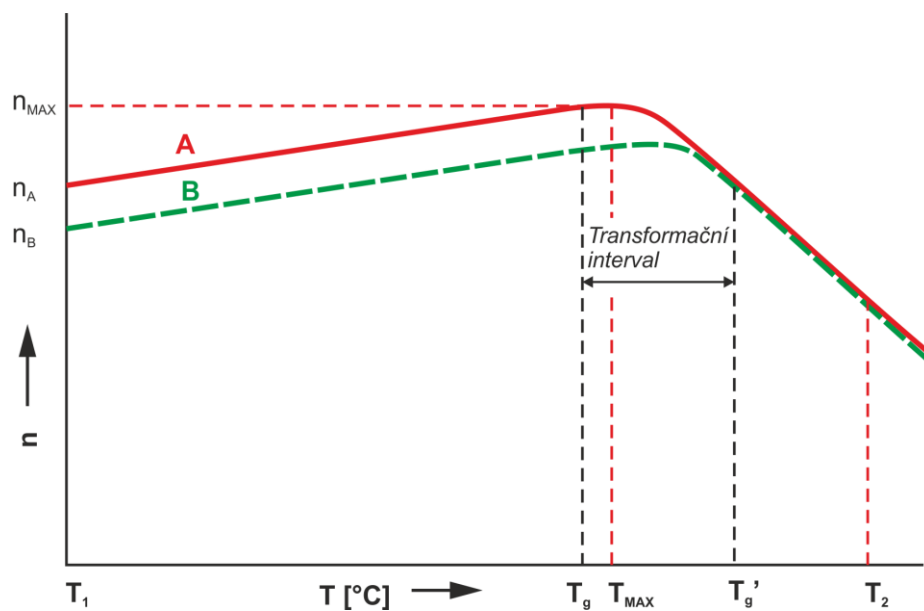
Z pohledu chemického složení se hodnoty indexu lomu u běžných křemičitých skel pohybují v rozmezí 1,48 až 1,56. Střední hodnota používaná při orientačních výpočtech je 1,5. Indexy lomu vybraných skel jsou uvedeny v Tab. 3.8.

Tab. 3.8 Indexy lomu vybraných skel pro vlnovou délku 589,3 nm

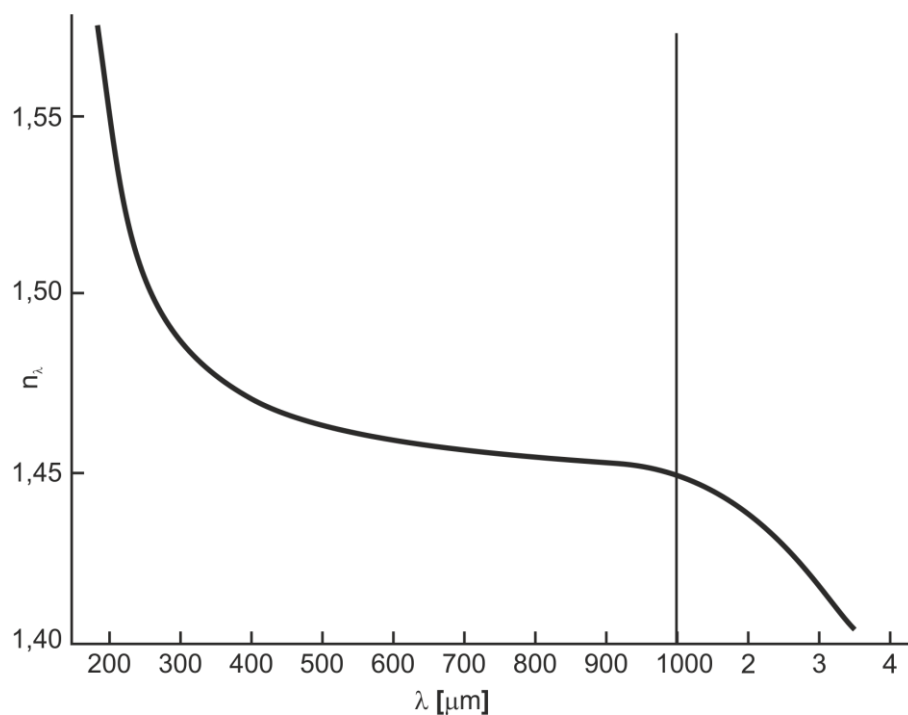
Sklo	Index lomu n
Sodnovápenatokřemičité (ploché a obalové sklo)	1,52
Boritokřemičité (tepelně odolné sklo)	1,48
Olovnatokřemičité (30 % PbO)	1,56
Olovnatý křišťál (24 % PbO)	> 1,54
E-sklo (sklo pro skleněná vlákna)	1,55
Hlinitokřemičité	1,54
Křemenné sklo	1,46

Index lomu světla se také mění s teplotou a u křemičitých skel je tato závislost většinou lineární až do transformačního intervalu, Obr. 3.22. Je-li ochlazováno křemičité sklo (křivka A) z teploty T_2 takovou rychlostí, aby v každém okamžiku docházelo k rovnovážnému stavu, vzrůstá index lomu až do teploty T_{MAX} , kdy je index lomu na maximální hodnotě n_{MAX} . V dalším průběhu index lomu klesá podle křivky A, až při teplotě T_1 dosáhne indexu lomu n_A . Probíhá-li ochlazování rychleji, že strukturní přeměny nestačí sledovat strukturní uspořádání teplot vyšších, dochází ke změně indexu lomu s teplotou podle křivky B a při teplotě T_1 bude mít sklo index lomu n_B . Index lomu je tak nižší než při pozvolném ochlazování a takové sklo je nazýváno *nestabilizovaným*. Změny indexu lomu jsou ovšem v tisícinách, což je však významné při použití v optice.

Jak již bylo zmíněno, index lomu skla závisí také na vlnové délce, příklad této závislosti je ukázán na křemenném sklu, Obr. 3.23. Z uvedené závislosti vyplývá důležitá vlastnost pro sklo – disperze.



Obr. 3.22 Schéma změny indexu lomu v závislosti na teplotě (transformačních změnách)

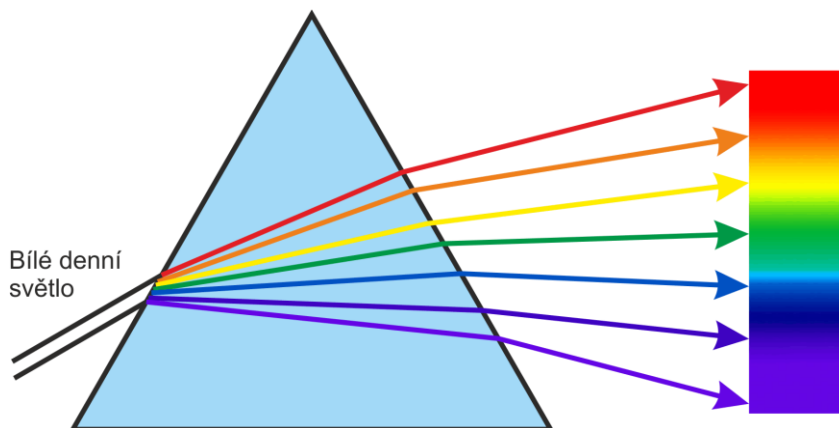


Obr. 3.23 Závislost indexu lomu na vlnové délce, tzv. disperzní křivka křemenného skla

3.9.2 Disperze světla

Disperze světla (nazývaná též chromatická disperze nebo rozklad světla) je rozklad většinou bílého denního světla podle jeho vlnové délky, tedy barvy. Obecně je index lomu v prostředí větší pro kratší vlnové délky (reprezentující např. modrou barvu) než pro delší vlnové délky (odpovídající červené). U svazku paprsků, který bude obsahovat obě složky, bude mít při lomu na rozhraní mezi vzduchem a sklem modrá složka menší úhel lomu, než

červená. Svazek bílého světla se skládá ze všech barev viditelného spektra a při lomu na rozhraní se rozkládá na jednotlivé barevné složky a vytváří „duhové spektrum“. Rozklad bílého denního světla je možné pozorovat pomocí skleněného hranolu, Obr. 3.24.



Obr. 3.24 Disperze světla v hranolu

S disperzí světla se lze setkat v běžném životě ve formě duhy. U skla je disperze ceněna především u dekorativního skla, komponent skleněné bižuterie, komponent svítidel (např. ověsy) a v optice, kde může být žádoucí nebo naopak nežádoucí.

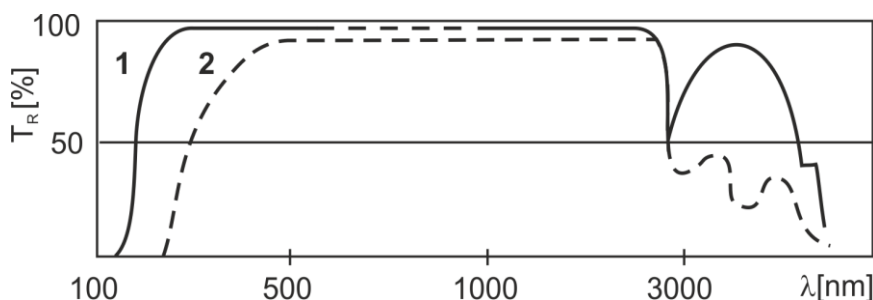
3.9.3 Absorpce záření

Intenzita světla procházejícího sklem se v důsledku jeho částečného pohlcování snižuje. Množství absorbovaného světla závisí na druhu látky, v němž k absorpci dochází a na vlnové délce světla. Jestliže k absorpci dochází rovnoměrně v celé viditelné oblasti spektra, pak se spektrální složení světla vystupujícího z látky nemění, tzn., nedochází ke změně barvy, ale pouze ke snížení intenzity světla. Jestliže ale dochází k absorpci světla pouze určité vlnové délky, pak světlo po průchodu zkoumanou látkou má odlišné spektrální složení, jinými slovy dochází ke změně barvy. Tento jev existuje u barevných skel, kde je tato selektivní absorpce způsobena obvykle již nepatrnou přísadou barvicí složky v základní hmotě skla.

Kvantitativně lze světelnou propustnost skla vyjádřit tzv. součinitelem propustnosti T_R (transmittance), který je dán poměrem intenzity světla ze vzorku vystupujícího (I) a světla vstupujícího (I_0). Vztahuje se na jednotkovou tloušťku a při vynásobení stem obdržíme světelnou propustnost skla v procentech. Příklad závislosti světelné propustnosti na vlnové délce (spektrální propustnost) je uveden na Obr. 3.25. Další příklady jsou uvedeny na Obr. 3.26.

Běžná bezbarvá plochá a obalová skla složení $\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O-CaO-MgO-SiO}_2$ propouští optické záření v rozsahu $\lambda \approx 300 \text{ nm}$ (UV záření) až $\lambda \approx 5\,000 \text{ nm}$ (IR záření). Výroba některých skel je přímo zaměřena na snižování nebo naopak na zvyšování absorpce světla v požadovaném rozsahu vlnových délek. Spektrální propustnost je u čirého křemenného skla omezena v krátkovlnné oblasti vlnovou délkou $\lambda \approx 160 \text{ nm}$ (ultrafialová oblast spektra) a v infračervené oblasti spektra vlnovou délkou $\lambda \approx 5\,000 \text{ nm}$. Ultrafialové záření o kratších

vlnových délkách propouští skla fluoridová a fosforečná. Rentgenové záření propouští skla lithnoberylnatoboritá. Naopak rentgenové záření spolu s gama zářením pohlcují skla obsahující vysoké procento oxidů těžkých kovů, hlavně PbO. Chalkogenidová skla nejsou propustná ve viditelné oblasti z důvodu posunutí dolní meze propustnosti do IR oblasti k $\lambda \approx 900$ nm, podle složení však propouštějí IR záření až do $\lambda \approx 20\,000$ nm.



Obr. 3.25 Zjednodušený průběh spektrální propustnosti skel: 1 - skelný SiO_2 , 2 – sklo soustavy $\text{Na}_2\text{O-CaO-SiO}_2$

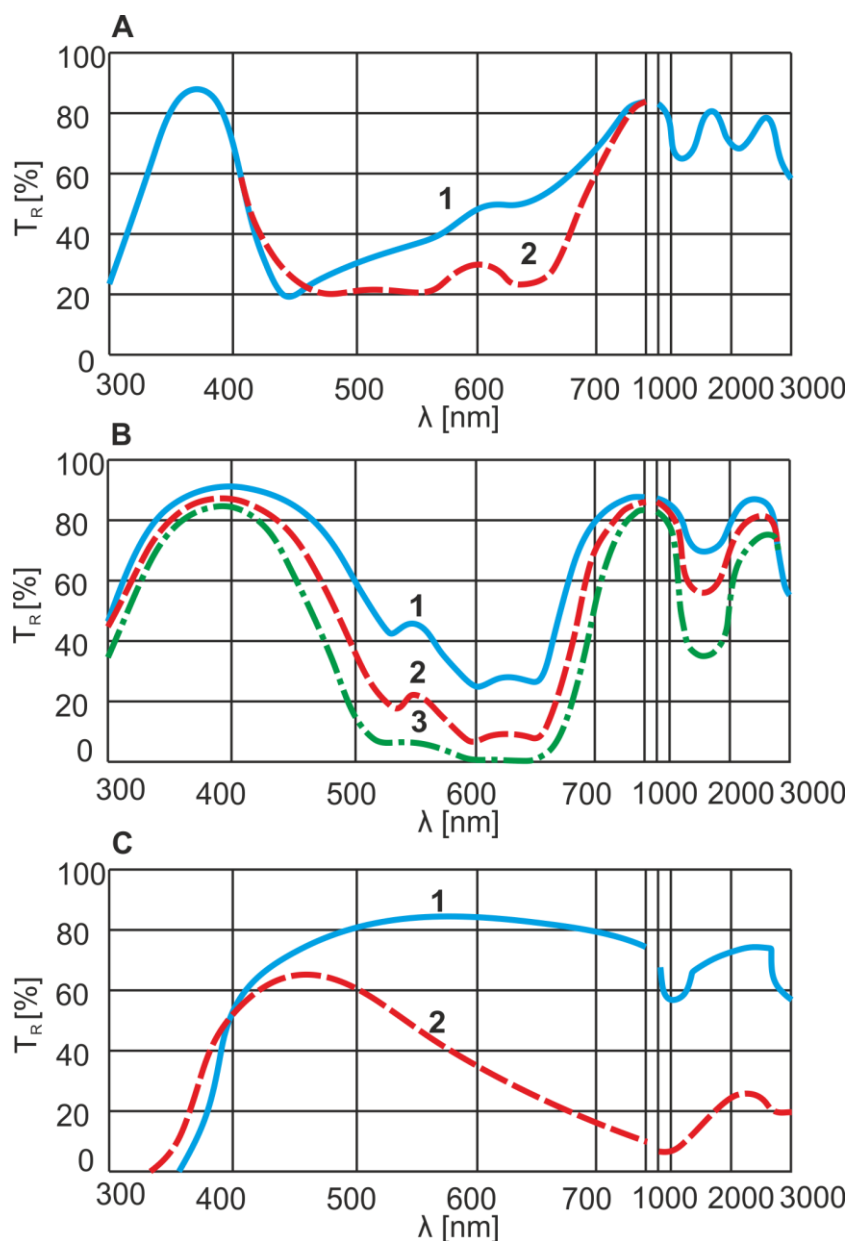
Na silné absorpci infračerveného záření kombinací barviv $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{FeO}$ se zakládá výroba determálního skla. Takové sklo se nejčastěji používá ve formě plochého skla v dopravních prostředcích a ve stavebnictví ke snížení vnitřní teploty vznikající intenzivním osvětlením na prudkém slunci.

3.9.4 Rozptyl záření

Rozptyl světla je definován jako změna směru šíření světla, které je při dopadu na rozhraní dvou prostředí nebo při průchodu prostředím rozptylováno v různých úhlech odchylujících se od původního směru. Rozptyl světla pozoroval Tyndall při průchodu světelného paprsku mikroheterogenními systémy. Tento rozptyl se projevil vytvořením tzv. světelného kužele. Rozptylový jev je způsoben ohybem světla, k němuž dochází na povrchu koloidních částic. Jako příklad Tyndallova jevu ve sklech je možno popsat rozptyl světla na koloidních částicích zlata v tzv. zlatém rubínu. Přitom je rozptyl světla závislý na velikosti koloidních částic zlata. Jestliže se jejich rozměr pohybuje v rozmezí 20 až 50 nm, rozptyl se neprojevuje a obdržíme krásné purpurové zbarvení. Při velikosti částic v rozmezí 70 až 100 nm, je možno pozorovat slabý rozptyl, který je intenzivní při rozměrech částic v rozmezí 200 až 500 nm, kdy se již projeví kovový lesk částic zlata v rozptýleném světle. Dalším příkladem je rozptyl světla v opalínech. V tomto případě je zřejmé, že míra rozptylu světla způsobená částicemi, které jsou malé ve srovnání s vlnovou délkou, je závislá na vlnové délce světla – modrá se rozptyluje více než červená. Se vzrůstajícím rozměrem částic vykazuje rozptýlené světlo stále intenzivnější namodralé zbarvení. Přitom procházející světlo má žlutý až hnědý barevný odstín.

Rozptylová centra mohou být 3 typů:

- Rayleighova typu,
- Rayleigh-Gansova typu,
- Mieova typu.



Obr. 3.26 Propustnost skleněné desky o tloušťce 2 mm,

A – při složení 0,25 % NiO:

1 – 75,3 % SiO₂, 11,7 % CaO, 13 % Na₂O,

2 – 70,6 % SiO₂, 11 % CaO, 18,4 % K₂O,

B – při složení 70,6 % SiO₂, 11 % CaO, 18,4 % K₂O:

1 – 0,05 % CoO,

2 – 0,1 % CoO,

3 – 0,2 % CoO,

C – při složení 75,3 % SiO₂, 11,7 % CaO, 13 % Na₂O:

1 – 2 % Fe₂O₃ (oxidační podmínky),

2 – 2 % FeO (redukční podmínky)

3.9.5 Luminiscence

Luminiscence je schopnost některých látek světélkovat po dodání energie v libovolné podobě, kromě energie tepelné. Proto, aby docházelo k luminiscenci u skel, musí být ve skle tzv. luminiscenční centra. Tato centra mohou být získána při dotování skel např. Mn^{2+} , Ce^{3+} , UO_2^{2+} . Luminiscenční skla je možné podle způsobu buzení rozdělit na:

- fotoluminiscenční (buzení se provádí zdrojem ultrafialového nebo viditelného záření, především u látek s malými a středními koncentracemi luminiscenčních center) a
- termoluminiscenční (buzení je vyvoláno vzrůstem teploty po předchozí excitaci).

Z hlediska doby trvání se dělí na:

- fluorescenci (po ukončení buzení luminiscence mizí) a
- fosforescenci (luminiscence trvá určitý čas i po ukončení buzení).

3.9.6 Fotosenzitivní, fotoplastická, fotochromická a polychromatická skla

U fotosenzitivních skel při expozici zářením určité vlnové délky (často UV zářením) vzniká nejdříve latentní (neviditelný) obraz, který může být dalším zpracováním vyvolán ve viditelný. Podstatou těchto skel je přítomnost tzv. fotosenzitivních prvků Au, Cu, Ag a případně jiných, které jsou přítomny v malých koncentracích. Princip je obdobný jako u fotografie.

U fotoplastických skel se po ozáření a následném tepelném zpracování vytvoří zárodky pro krystalizaci silikátů nebo fluoridů. Rychlost rozpouštění oblastí vykrystalizované hmoty v leptacích médiích (hlavně v HF) se pak liší od rychlosti rozpouštění původního skla a tak vzniká reliéf.

Fotochromická skla jsou skla, která se expozicí zářením vhodných vlnových délek zabarvují – tvoří se barevná centra. Po přerušení expozice aktivujícího záření nastává odbarvení – destrukce barevných center. Barevná centra jsou u tohoto skla metastabilní. Ve fotochromických sklech se používají především halogenidy stříbra, mědi, kadmia a dále europium a cér. Fotochromická skla se používají jako ochranná do brýlí proti UV nebo příliš intenzivnímu viditelnému záření (protisluneční skla Heliovar).

Novějším typem fotocitlivých skel jsou skla polychromatická. Při působení UV záření (300 nm) se při pokojové teplotě vytvoří nejprve latentní obraz, následuje první tepelné zpracování při teplotě 450 až 500 °C, pak konečná expozice UV záření (300 nm) a následné tepelné záření při teplotách 300 až 410 °C. Výsledkem jsou skleněné výrobky s trvale barevnými obrazci ve hmotě skla.

3.9.7 Dvojlom, polarizace a interference záření

Pro sklo je charakteristické, že je látkou izotropní, tzn., že jeho vlastnosti včetně vlastností optických, jsou ve všech směrech stejné. Jestliže je ve skle přítomno napětí, ať již způsobené nedokonalým vychlazením nebo vyvolané účinkem vnější síly, stává se sklo opticky anizotropním a vykazuje dvojlom. Znamená to, že paprsek světla dopadající na

povrch takového skla se štěpí na paprsky dva, řádný a mimořádný, které jsou polarizovány v navzájem kolmých rovinách. Následkem rozdílné rychlosti obou paprsků při průchodu sklem vzniká mezi nimi fázový posun (dráhový rozdíl), jehož velikost je přímo úměrná napětí ve skle. Tohoto jevu se v praxi využívá při zjišťování velikosti vnitřního napětí ve skle pomocí polarizačních přístrojů (kap. 10.4).

Obecně je světelné záření definováno jako elektromagnetické vlnění, šířící se přímočaře, přičemž maxima jednotlivých vln vytvářejí kolem osy směru šíření válcovou obalovou plochu. Jsou-li ale kmity záření určitým způsobem uspořádány, dostáváme co do charakteru uspořádání záření lineárně, elipticky nebo kruhově polarizované. K polarizaci světla může dojít při jeho odrazu, lomu, absorpci nebo rozptylu.

K interferenci světla dochází tehdy, jestliže dva světelné paprsky prostupují prostředím stejným směrem a kmitají v téže rovině. V důsledku jejich skládání může dojít k zesílení, zeslabení nebo ve zvláštním případě k úplnému vymizení světelné vlny.

3.10 Chemická odolnost

Chemická odolnost je důležitou vlastností skla, charakterizující rozsah jeho schopnosti odolávat korozivnímu působení různých vnějších prostředí. Koroze skla je důsledkem působení atmosféry, vody, kyselin, zásad a dalších chemikálií. V současné době hraje významnou roli i kvantitativní obsah některých látek přítomných ve výluhu, což je aktuální zejména u výrobků přicházejících do styku s potravinami a léky. Proto jsou testy odolnosti prováděny podle mezinárodně uznávaných norem.

3.10.1 Odolnost skla proti vodě

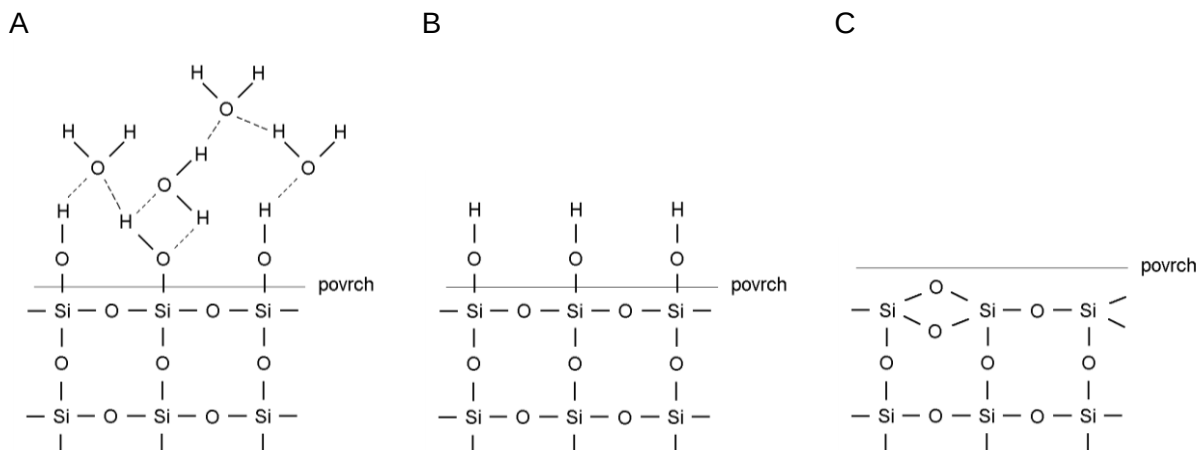
Účinek vody se rozlišuje dvojí. Buď se jedná o působení atmosférické vlhkosti, pak děj nazýváme zvětrávání, nebo o působení nadbytku vody na sklo, pak se jedná o vyluhování. Principiálně se oba děje liší tím, že v prvním případě korozní produkty zůstávají na povrchu a v druhém případě jsou z povrchu odváděny.

3.10.1.1 Působení vody na sklo

Při dynamickém působení vodného prostředí na povrch skla obecně dochází k iontové výměně alkalických kationtů Na^+ , K^+ nebo Li^+ přítomných ve skle za ionty H^+ resp. H_3O^+ z vodného prostředí. Částečně se této iontové výměny mohou účastnit i dvojmocné kationty Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Pb^{2+} a Zn^{2+} . Výsledkem této iontové výměny je vznik vrstvičky *gelu hydratovaného oxidu křemičitého* se skupinami Si-OH. Obecně jsou zpravidla ve výluhu skla obsaženy všechny jeho složky, i když většinou v poměru různém od původního skla.

Při působení vody na povrch skla převládá jako děj difúze, přičemž množství vyloužených alkalických složek ze skla, v závislosti na čase, závisí na rychlosti průchodu vrstvičkou gelu hydratovaného oxidu křemičitého, která se postupně zesiluje. Reakce složek skla s vodou je nejrychlejší v první fázi vyluhování, kdy je vrstvička gelu nejtenčí. V první hodině se s malými výjimkami vylouží převážná část celkového výluhu, přičemž podstatnou část tvoří zásaditě reagující složky, v nichž alkálie značně převládají. Ve statickém prostředí pH vody roste s množstvím vyloužených kationtů a voda pak začne působit jako alkalický roztok.

Skupiny Si-OH na povrchu skla však vznikají i u velmi chemicky odolných skel (křemenné sklo, bezalkalická skla) a jsou příčinou hydrofilního chování neupravených povrchů sklářských výrobků. Čerstvá lomová plocha skla reaguje s vodní párou za vzniku povrchových skupin Si-OH. Na tyto skupiny jsou následně vodíkovým můstkem navázány molekuly vody, které při běžných teplotách již nelze prakticky sušením odstranit. Za zvýšené teploty postupně dochází k desorpci fyzikálně vázané vody (150 až 200 °C) a eliminaci skupin Si-OH za uvolnění vody a vzniku původních vazeb Si-O-Si (nad 400 °C) Obr. 3.27.



Obr. 3.27 Poměry na povrchu křemenného skla v závislosti na okolních podmínkách: A – laboratorní podmínky, vlhký vzduch; B – teplota kolem 200 °C; C – teplota nad 700 °C

3.10.1.2 Působení vodní páry na sklo

Atmosférickou vlhkostí dochází ke „zvětrávání“ povrchu skel, přičemž nastává:

- tvorba „vodní vrstvy“ na povrchu skla,
- uvolňování alkálií z povrchu skla hydrolytickým působením,
- reakce uvolněných alkálií s CO₂ ze vzduchu na X₂CO₃,
- korozní působení vysoce koncentrovaného roztoku X₂CO₃ na povrch skla za vzniku korozních produktů.

Je-li zajištěno časté odstraňování alkálií z povrchu skla, vytvoří se na povrchu skla vrstvička s nižší koncentrací alkálií (vyšší koncentrací SiO₂), která dále působí jako ochranná bariéra proti dalšímu vyluhování.

Dochází-li ke střídavému kondenzování a odpařování vlhkosti na povrchu skla, může v některých místech povrchu dojít ke koncentraci korozních produktů a vizuálnímu zvýraznění, které se projeví „matem“ nebo „interferencí“. V krajním (ne však vzácném případě) dojde až ke slepení například nevhodně uložených plochých skel a k jejich znehodnocení, protože korozní produkty již nelze jinak než mechanicky (broušením a leštěním) beze stop odstranit.

Čím větší je povrch skla (drť, fritá), tím výraznější působení vodní páry a obecně vlhkosti na sklo lze pozorovat. Protože je „voda“ v povrchu skla vázána adsorpčními silami, nelze ji při velkém povrchu ani účinkem sušení při laboratorní teplotě odstranit.

3.10.1.3 Stanovení odolnosti proti vodě

Zkoušky jsou založeny na vyluhování:

- drtě skla vroucí vodou za normálních laboratorních podmínek,
- vnitřního povrchu výrobků za zvýšené teploty a tlaku v autoklávu.

Drťové zkoušky používají vysítovanou frakci čerstvě podrceného skla (většinou 0,3 až 0,5 mm) promytou acetonem k odstranění prachových částic. Pro běžná skla se drť louží v destilované vodě při 98 °C/ 60 minut. Pro chemicky odolná skla (například alkalickoboritokřemičitá typu Pyrex) se používá zahřívání v autoklávu při 121 °C/ 30 minut. Výluh z vnitřního povrchu výrobků se provádí v autoklávu (121 °C/ 60 minut).

Výsledný výluh se titruje kyselinou chlorovodíkovou pro stanovení vyluhovaných alkálií nebo ve speciálních případech kvantitativním stanovením vybraných složek ve výluhu. Podle spotřeby HCl nebo obsahu vybraných složek je následně sklo zařazeno do odpovídající třídy odolnosti podle příslušných norem. Pro běžnou drťovou zkoušku při 98 °C je pět tříd odolnosti (třídy HGB, třída I nejlepší, třída V nejhorší).

3.10.2 Odolnost skla proti kyselinám

Korozivní účinek kyselin na povrch skla je obdobný účinku vody, alkalické rozpouštění vrstvičky gelu kyseliny křemičité u alkalických skel je však vyloučeno a rychlost koroze skla je definována pouze difúzní rychlostí alkalických iontů ze skla do roztoku. Povrch korodovaných skel je pokryt vrstvičkou gelu kyseliny křemičité s obsahem SiO₂ asi 95 %.

Při korozi skel kyselinami se rozpouštějí některé další složky skla, např. Al³⁺, Ca²⁺ nebo Pb²⁺, takže skla s vyšším obsahem Al₂O₃ odolná proti vodě, se kyselinami vyluhují. Chemická povaha kyselin (mimo HF) velmi málo ovlivňuje korozi skla. Kromě teploty je zde pro rychlost reakce rozhodující koncentrace H⁺ iontů, tj. pH prostředí. Rychlost reakce dále ovlivňuje rozpustnost nebo nerozpustnost vzniklých reakčních produktů na povrchu skla, např. BaSO₄ nebo PbSO₄, které mohou omezovat rychlost reakce.

Obecně lze mechanismus působení kyselin na povrch skla popsat těmito pochody:

- narušení vazeb mezi alkáliemi a základními sklotvornými tetraedry [SiO₄]⁴⁻,
- vyluhování alkálií a tvorba vrstvičky gelu kyseliny křemičité,
- omezování pronikání další kyseliny k povrchu původního skla touto vrstvičkou.

Pouze kyselina fluorovodíková HF reaguje chemicky s vrstvičkou gelu kyseliny křemičité, rozpouští ji, odhaluje další povrch a proces koroze (rozpouštění) pokračuje. To je základem procesu *chemického leštění a matování skel*, kap. 11.3.1.

3.10.2.1 Stanovení odolnosti proti kyselinám

Pro stanovení odolnosti proti kyselinám se používají výrobky nebo vyleštěné výřezy z výrobků pravidelných geometrických tvarů, které se zavěsí do lázně vroucího roztoku kyseliny chlorovodíkové o koncentraci $c(\text{HCl}) = 6 \text{ mol l}^{-1}$ pod zpětný chladič na dobu 3 hodin. Podle staršího postupu se vážením stanovil rozdíl hmotnosti před a po testu a úbytek hmotnosti se přepočítal na plochu 100 cm² vzorku. Novější metoda je založena na stanovení obsahu složek (Na₂O, K₂O, případně CaO a SiO₂) ve výluhu spektrofotometricky a opět

s přepočtem na plochu 100 cm^2 vzorku. Podle úbytku hmotnosti nebo obsahu složek ve výluhu je následně sklo zařazeno do jedné ze tří tříd odolnosti.

3.10.3 Odolnost skla proti alkáliím

Koroze skel alkalickými roztoky se ve srovnání s korozí vodou a kyselinami výrazně liší jak množstvím rozpuštěného skla, tak chemickým účinkem. Alkálie rozrušují vazby Si-O-Si bez tvorby gelu kyseliny křemičité, rozpouštějí všechny složky skla a proto je jejich účinek mnohonásobně intenzivnější než u vody a kyselin.

3.10.3.1 Stanovení odolnosti proti alkáliím

Mírou odolnosti proti alkáliím je hmotnostní úbytek vzorku po tříhodinovém varu ve směsi stejných objemových dílů roztoku hydroxidu sodného o koncentraci $c(\text{NaOH}) = 1 \text{ mol.dm}^{-3}$ a roztoku uhličitanu sodného o koncentraci $c(0,5 \text{ Na}_2\text{CO}_3) = 1 \text{ mol.dm}^{-3}$ přepočtený na 100 cm^2 povrchu skla. Podle úbytku hmotnosti je následně sklo zařazeno do jedné ze tří tříd odolnosti.

4 Sklářské suroviny

Sklářské suroviny jsou základem pro tavení skla a jejich vzájemný poměr ovlivňuje výsledné vlastnosti skla, ekonomickou náročnost tavení skla, ovlivňuje teploty tvarování, má vliv na zpracování a zušlechťení, tím pádem má složení skla vliv na životnost strojů a zařízení, na životní prostředí a další. Čistota sklářských surovin a homogenita jejich složení ovlivňuje výslednou kvalitu skla.

V průběhu let názor na vliv surovin pro jednotlivé oblasti prošel vývojem. Vzrostla čistota umělých surovin, do výroby byly postupně zaváděny další přírodní suroviny, rozšiřuje se využívání odpadů a recyklovaných surovin (především střepů). V průmyslové výrobě skla je používáno 50 až 100 sklářských surovin, které vnášejí do různých skel okolo 40 prvků.

Mezi jednotlivými surovinami je výrazný kvantitativní rozdíl. 90 až 95 % spotřeby všech sklářských surovin tvoří dohromady písek, soda, vápenec, dolomit, živec (ev. znělec) a střepy. Zbytek jsou borité suroviny, potaš, sulfát, hydrát hlinitý, suroviny olovnaté, barnaté, zinečnaté. Spotřeba ostatních surovin nepřesahuje 1 až 2 % celkové spotřeby. Proto se občas dělí suroviny na velkotonážní a malotonážní, což však nevypovídá nic o jejich důležitosti.

Praktičtější rozdělení sklářských surovin je možno provést buď podle chemických prvků jimi vnášených nebo s ohledem na jejich funkci ve vsázce při tavení skla. Druhá možnost lépe vystihuje význam surovin pro sklářskou technologii a lze podle ní rozdělit suroviny do devíti skupin:

- suroviny, kterými se vnášejí do skla sklotvorné oxidy,
- suroviny, kterými se vnášejí do skla oxidy Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , SnO_2 ,
- suroviny, kterými se vnášejí do skla oxidy kovů žíravých zemin a kovů stabilizujících sklovinu,
- suroviny, kterými se vnášejí do skla oxidy alkalických kovů,
- suroviny barvicí,
- suroviny kalící,
- suroviny čeřící,
- urychlovače tavení,
- skleněné střepy.

4.1 Krátce z historie sklářských surovin

Bez vhodných surovin nelze vyrobit žádný výrobek, proto byly vhodné suroviny jednou z podmínek úspěchu už u dávných sklářů. Výběr nejlepšího křemene, zpracování dřevěného popelu a především další přísady do skla byly důležitým know-how středověkých huťmistrů. Používaly se především suroviny z bezprostředního okolí hutí, ale již ve 14. a 15. století lze předpokládat obchod se surovinami, dopravovanými i z větší vzdálenosti (manganové minerály, arsenik, barvicí složky). V 19. století se začínají postupně používat upravené suroviny. Nejdříve se dřevěný popel rafinoval pro získání K_2CO_3 , pak byl nahrazován syntetickou sodou nebo síranem sodným, ostatní suroviny se braly stále z nejbližšího okolí. Teprve koncem 19. století dochází k růstu počtu sklářských surovin i ke specializaci na jejich

těžbu i výrobu. Jsou otevřena ložiska čistého písku, rostoucí chemický průmysl dodává v přijatelných cenách sodu, dusičnany, olovnaté a zinečnaté sloučeniny a další. Světová dopravní síť dovoluje dovážet borité suroviny, sodný ledek a další, dříve exotické suroviny.

Začátkem 20. století vrcholí dávný sklářský zvyk - přidávat do skla kde který nově objevený prvek či nově vyrobenou sloučeninu. Po vědecké linii lze vystopovat kořeny u Faradaye, Harcourta a především Schotta, po praktické linii to je série patentů a starých receptů na odbarvení a barvení skla selenem a vzácnými zeminami, až k patentu na barvení skla indiem. A tak se v té době pro skláře vyrábí "didymoxid"² a sloučeniny selenu, skláři živí výrobu uranových solí, skláři dovážejí kryolit až z Gronska.

Meziválečné údobí se začínalo orientovat také na základní suroviny a na jejich čistotu, pomalu končilo použití místních surovin (písků), otevíraly se specializované pískovny a začínala první jednoduchá úprava písku plavením. Objevily se první normy a prohlubovala se kontrola surovin.

Válečný nedostatek potom obnovil v Evropě zájem o náhradní suroviny a o suroviny tuzemské. Zkoumaly se živce, rozvíjelo se použití žnělce a dalších horninových surovin. Velký kvantitativní rozvoj sklářství vyžadoval velká množství základních surovin, čistá ložiska nestačila, rozvíjelo se úpravnictví, především u písku. Z nových surovin se zaváděly urychlovače tavení – kazivec (CaF_2) a vysokopecní struska.

Poslední léta jsou ve znamení ekologie a ekonomie. Je to hlavně masivní použití recyklovaných střepek v obalovém skle, výhodné ekologicky i ekonomicky, které mělo za následek podstatný pokles spotřeby některých surovin. Ekonomické požadavky preferují místní suroviny (písky, horninové suroviny aj.), protože dopravní náklady jsou stále vyšší. Přírodní soda vytlačuje sodu Solvay, místo boraxu se často používají přírodní borité minerály (colemanit). Roste použití odpadních surovin a levnějších vedlejších produktů průmyslu. Stoupá rozsah úpravy surovin a jejich čistota. Snaha zvyšovat tavicí výkony pecí tlačí na zjemnění surovin, přechází se na použití nesusušených surovin. Ekologické a hygienické požadavky se zpřísňují.

4.2 Požadavky na sklářské suroviny

Požadavky na sklářské suroviny lze rozdělit do několika skupin:

- ekonomické a obchodně strategické požadavky,
- ekologické a hygienické požadavky,
- chemické složení,
- cizorodé příměsi v surovinách,
- zrnitost sklářských surovin,
- manipulační vlastnosti sklářských surovin.

Ekonomické a obchodně strategické požadavky, zahrnují samotnou cenu, dopravní náklady, strategickou jistotu dodávek a předpoklad stability ceny a spolehlivosti dodavatele.

² Směs oxidu praseodymitého a oxidu neodymitého

Úspory či vícenáklady na suroviny jsou jednoznačné, zatímco úspory na nákladech tavení při použití různých surovin mohou být ovlivněny dalšími faktory a nemusí v konečném důsledku k úsporám dojít. U velkoobjemových výrob, jako je ploché a obalové sklo, se zásadně sleduje cena surovin. U speciální výroby, jako jsou křišťály nebo technická skla, si lze vzhledem k vyšší kilogramové ceně výrobků dovolit vyšší ceny surovin. Velmi důležité jsou dopravní náklady, které mohou například u písku, dolomitu a živce překročit cenu samotné suroviny. Skladové zásoby tvoří především rezervu v případě neočekávaných výpadků v zásobování a u hlavních surovin činí zásobu na 5 až 15 dní, u minoritních surovin činí 3 a více týdnů. Skladové zásoby by měly být na úrovni rezervy a neměly by být zbytečně vyšší, neboť váží finanční prostředky podniku a zvyšují náklady (např. náklady na skladování).

Ekologické a hygienické požadavky je třeba dodržovat, protože většina sklářských surovin může za určitých okolností poškodit lidské zdraví a některé jsou jedovaté. Mezi zvlášť nebezpečné jedy patří:

- arsen a jeho sloučeniny,
- kyanidy kovů,
- oxid seleničitý,
- selenan sodný,
- thalium a jeho sloučeniny,
- vinan antimonylodraselný.

Mezi ostatní jedy patří:

- sloučeniny antimonu,
- sloučeniny barya (síran barnatý není jedem),
- dusičnan stříbrný,
- dusitany,
- fluoridy (fluorid hlinitý, kryolit a kazivec nejsou jedy),
- fluorokřemičitany,
- sloučeniny olova (sulfid olovnatý není jedem),
- seleničitany,
- síran měďnatý,
- sloučeniny teluru,
- sloučeniny uranu,
- sloučeniny kadmia.

Ostatní suroviny nejsou sice jedy, ale jsou často zdraví škodlivé. Proto při práci v kmenárnách je třeba dodržovat pracovní řád, pracovat v často praném pracovním oděvu, v nutných případech použít respirátor, rukavice a brýle.

Ekologickým problémem, které musí sklárny řešit, jsou výpary surovin během tavení, obaly a jejich likvidace, odpady surovin, jejich rozprach, smetky, vadné dávky kmene a znečištěné suroviny.

Chemické složení sklářských surovin se uvádí v hmotnostních procentech a je nutné ho znát u každé suroviny. Složky každé suroviny lze přibližně rozdělit do tří skupin:

- účinné složky tvoří požadovanou část surovin (např. Na_2O u sody, SiO_2 u písku, Se v seleničitanu, SO_3 v čeřivech, ...),
- balastní složky nepřecházejí do skla nebo ve skle nehrají výraznější roli (např. vlhkost, CO_2 , ...),
- škodlivé složky zhoršují vlastnosti skla, což jsou obvykle barvicí oxidy (např. FeO , Fe_2O_3 , ...) a ekologicky nežádoucí prvky (např. F, Cl, ...).

Logické je požadovat surovinu s co nejvyšší účinnou složkou, rozhodující je ale také cena a požadavky na konečnou kvalitu skla. Není ekonomické nakupovat dražší suroviny s vyšší účinnou složkou pro výrobu obalového skla, kde požadavky zákazníků nejsou ve srovnání s jinými výrobky ze skla vysoké.

Cizorodé příměsi v surovinách jsou drobné, odlišné vměstky, obvykle nepostihnutelné běžnou analýzou, ale schopné způsobit závažné závady při výrobě. Pocházejí z ložiska surovin (např. těžené minerály v písku), ale častěji se do surovin dostávají během jejich úpravy, dopravy, skladování (např. otěr železa). Podle působení je lze rozdělit na:

- těžkotavitelné minerály, způsobující kamínky a šlíry,
- barvicí prvky, vytvářející barevné šlíry a zabarvení skla (typicky železné vměstky ve střepech),
- redoxaktivní materiály, vytvářející bubliny ve skle (např. karbidy, kovy, hliník, organické materiály).

Cizorodé příměsi jsou většinou náhodné a lze je přičíst především na vrub lidskému faktoru (špatně oddělené suroviny, špatně vyčištěné vagóny, odhozené odpadky v surovinách, neodborná manipulace, nedodržení technologických postupů při úpravě surovin,...).

Zrnitost sklářských surovin se obvykle zajišťuje síťováním. Normy předepisují obsahy jednotlivých dohodnutých frakcí a pro charakterizaci zrnitosti surovin je vhodné používat součtové křivky. Zrnitost surovin přímo ovlivňuje přípravu sklářského kmene, jeho vlastnosti (např. sklon k odmísení) a také samotný průběh tavení (lépe tavitelné jsou suroviny o jemnější zrnitosti, ale vysoká jemnost způsobuje prášivost surovin a obtížnější čeření).

Manipulační vlastnosti sklářských surovin zahrnují balení, dopravní spojení, sypnost surovin, možnost pneutransportu, abrazivnost. Suroviny používané ve velkém množství (písek, dolomit, vápenec, živec, znělec, ...) jsou dodávány volně ložené, obvykle v pendlujících vagonech, nákladních autech nebo lodích. Používají se uzavřené přepravní prostory, jako jsou například uzavřené vagony nosnosti až 100 t se spodním vyprazdňováním nebo cisternové vagony (auta), upravené pro pneutransport. Suroviny používané v menších množstvích, jsou dodávány v obřích pytlích (vacích), pytlích, sudech, plastových a plechových obalech, často na paletách pro snadnější manipulaci ve sklárně.

4.3 Suroviny, kterými se vnášejí do skla sklotvorné oxidy

Sklotvorné oxidy vystupují ve skle ve formě komplexních jednotek (např. tetraedry SiO_4^{4-}) a svojí schopností vázat se prostřednictvím „můstkových“ kyslíků vytvářejí základ vnitřní nepravidelné struktury skla.

4.3.1 Oxid křemičitý SiO_2

Zemská kůra obsahuje 59 % SiO_2 , v čemž je asi 12 % křemene, ale ložiska křemene s obsahem nad 98 % SiO_2 jsou vzácná. Právě takovéto křemičité suroviny jsou potřeba ve sklářství. Běžně vyráběná skla (na bázi SiO_2) obsahují 60 až 80 % SiO_2 a je tak tato surovina nejobjemnější složkou kmene.

Oxid křemičitý ve skle příznivě ovlivňuje chemickou odolnost, mechanické vlastnosti a teplotní roztažnost. Současně zvyšuje tavicí teploty, zvyšuje viskozitu, zvětšuje sklon k odsakelnosti, snižuje elektrickou vodivost.

Jako surovina se v minulosti používal horský křišťál a kusový křemen. Horský křišťál a křemen jsou stále hlavní surovinou pro výrobu křemenného skla nebo vysoce kvalitního optického skla. Pro výrobu běžných křemičitých skel se používá téměř výhradně sklářský tavný písek, určitá část SiO_2 se vnáší dalšími surovinami (živec apod.). Křemenné písky vznikly zvětráváním hornin, následným transportem, rozdělením zvětraného materiálu a jeho usazením. Těžba se nad hladinou spodní vody provádí často odstřechem, pod hladinou spodní vody pomocí plovoucích bagrů. Následuje plavení a praní, otírání zrn, protiproudé třídění, magnetická separace, následovat může flotace, chemické čištění. Poté se provádí odvodnění a sušení. Úpravou se sleduje snížení obsahu, případně odstranění nežádoucích příměsí, získání dané granulometrie a vlhkosti.

Střední velikost zrna písku je rozhodující pro dobu tavení a se snižující se velikostí se snižuje i teoretická doba tavení. V praxi ovšem o celkové době tavení rozhoduje především vyčerení skloviny.

Sklářské tavné písky se získávají těžbou a úpravou surových písků. Největším ložiskem kvalitních sklářských písků v České republice je Střeleč u Jičína. Méně kvalitní druhy sklářského písku s vyšším obsahem železa pocházejí i z ložisek Provozdín a Srní u České Lípy. V případě chemického složení existují normy, které upravují složení sklářských písků. V normách je uváděn **obsah SiO_2** , který má spíše nepřímý význam – čím je vyšší tím menší je možnost kolísání obsahu ostatních oxidů. Písky pro křišťálové sklo obsahují obvykle nad 99 % SiO_2 , písky pro bílé obalové a ploché sklo nad 98 % SiO_2 , písky pro barevné obalové sklo od 93 do 95 % SiO_2 . **Obsah Al_2O_3** v písku v zásadě nevadí, ale neměl by příliš kolísat tak, aby nekolísala homogenita skla (uváděno do $\pm 0,1$ %). Nejdůležitější charakteristikou sklářských písků je celkový obsah železa vyjádřený jako **Fe_2O_3** . Jeho přípustná hodnota záleží na přípustné barvě utaveného skla. Např. pro optické sklo je uváděno 0,001 až 0,012 % Fe_2O_3 , pro kvalitní křišťálové sklo 0,008 až 0,015 % Fe_2O_3 , pro bílé obalové sklo a ploché sklo 0,020 až 0,050 % Fe_2O_3 , pro ambr a zelené obalové sklo 0,010 až 1,000 % Fe_2O_3 . Železo může být v písku přítomno ve více podobách, např. jako strukturní složka křemenných zrn, jako součást minerálů písek provázejících, jako součást povrchových vrstviček na zrnech písku nebo jako složka jílových minerálů, které se v ložiskách písků vyskytují. **Obsah TiO_2** je v běžném sklu do 0,10 % neškodný, protože se

ve skle dobře rozpouští. Vadí však ve vysoce kvalitních nebo optických sklech, protože zvýrazňuje zbarvení způsobené železem (kombinací Fe + Ti vzniká hnědé zbarvení).

Pro deklarování požadovaného složení je v odborné literatuře často uváděna norma ČSN 72 1202 (je často nahrazena podnikovou normou, jako je například PN-01-2014 používaná firmou Sklopísek Střeleč). Podle normy ČSN 72 1202 se jednotlivé druhy označují TS, následuje číslo udávající tisícinásobek povoleného maxima obsahu Fe_2O_3 (v %) a za lomíčí čarou velikost maximálního zrna v desetinách mm. Chemické složení a zrnitost sklářských tavných písků jsou uvedeny v tabulkách (Tab. 4.1, Tab. 4.2). Vlastnosti písků jsou uvedeny v Tab. 4.3.

Tab. 4.1 Chemické složení normovaných jakostí písku podle ČSN 72 1202 (v % hmotnostních)

Druh	SiO_2 min.	Fe_2O_3 max.	TiO_2 max.	Al_2O_3 max.
TS 15/08	99,3	0,015	0,05	0,2
TS 21/10	99,0	0,021	0,10	0,2
TS 23/10	99,0	0,023	0,13	0,3
TS 25/06	99,0	0,025	0,15	0,3
TS 40/10	98,5	0,040	0,15	0,4
TS 40/13	98,5	0,040	0,15	0,4
TS 70/10	97,0	0,070	nevymezeno	1,5
TS 100/13	97,0	0,100	nevymezeno	1,5
KS 20/13	99,2	0,020	0,10	0,2

Tab. 4.2 Zrnitost normovaných jakostí písků podle ČSN 72 1202 (v %)

Zrnitost (mm)	Druh písku								
	TS 15/08	TS 21/10	TS 23/10	TS 25/06	TS 40/10	TS 40/13	TS 70/10	TS 100/13	KS 20/13
pod 0,1	max. 1,0	max. 1,0	max. 1,0	max. 2,0	max. 3,0	max. 1,5	max. 5,0	max. 5,0	max. 5,0
0,1 - 0,315	min. 84,0	min. 94,0	min. 94,0	min. 89,0	min. 92,0	min. 90,0	min. 89,5	min. 84,5	min. 85,0
0,315 - 0,5				max. 8,0					
0,5 - 0,63				max. 1,0					
0,63 - 0,8	max. 1,0	max. 5,0	max. 5,0	0,0	max. 5,0	max. 8,0	max. 5,5	max. 10,0	max. 10,0
0,8 - 1,0	0,0			0,00					
1,0 - 1,25	0,00	0,0	0,0		0,0	max. 0,2	0,0	max. 0,5	max. 0,2
1,25 - 1,60	žádná zrna	0,00	0,00		0,00	0,0	0,00	0,0	0,0
1,60 - 1,80		žádná zrna	žádná zrna		žádná zrna	0,00	žádná zrna	0,00	0,00
nad 1,80									

Poznámka k Tab. 4.1 a Tab. 4.2: sklářský tavný písek označený v ČSN jako KS 20/13 se používá pro výrobu opakního (neprůhledného) křemenného skla.

Tab. 4.3 Vlastnosti písků

Hustota	2 600 až 2 650 kg/m ³
Sypná hmotnost (v setřeseném stavu):	1 570 ± 50 kg/m ³
Měrný povrch	od 8 do 20 m ² /kg, průměr kolem 14 m ² /kg
Tvrdost	7 podle Mohsovy stupnice
Index lomu	1,54 až 1,55
Sypný úhel v suchém stavu	30 až 35°
Bod tání	1 710 °C
Slinování	1 550 až 1 600 °C

4.3.2 Oxid boritý B₂O₃

Průměrný obsah boru v zemské kůře odpovídá asi 10 ppm B₂O₃. Bor je mimo jiné používán ve sklářství a oxid boritý je sklotvorným oxidem.

Oxid boritý zvyšuje tahovou pevnost skla, snižuje hustotu, zlepšuje chemickou odolnost a podstatně snižuje teplotní roztažnost, což zlepšuje tepelnou odolnost. Při tavení téká s vodní parou, takže dochází k jeho ztrátám. Z technologického hlediska usnadňuje tavení a je používán jako tavivo, které jako jediné nezhoršuje žádnou jinou vlastnost skla. Využití nalézá zejména při výrobě skel se zvýšenou tepelnou a chemickou odolností a skleněných vláken. Skla mají také zlepšenou odolnost vůči poškrábání. Bor zlepšuje propustnost skla v UV oblasti.

V současné době se bor používá ve čtyřech skupinách skleněných výrobků: boritokřemičitá skla (o obsahu 1 až 20 % B₂O₃, jako např. Simax, Pyrex), izolační vlákna (s obsahem do 6 % B₂O₃), E-sklo (s obsahem 7 až 14 % B₂O₃ používané pro výrobu textilních vláken) a dále pro frity a glazury.

Mezi nejvýznamnější suroviny patří tetraboritan disodný – borax (Na₂B₄O₇·10H₂O), borax pentahydrát (Na₂B₄O₇·5H₂O), borax bezvodý (Na₂B₄O₇), kyselina boritá (H₃BO₃ – sassolin) a colemanit (Ca₂B₆O₁₁·5H₂O). Hlavní světová naleziště boritanů jsou v USA a v Turecku, podstatně méně se těží v Kazachstánu, Chile, Peru, v rostoucí míře i v Číně. V Rusku se zpracovávají boritokřemičitany (datolit, danburit) na borax a kyselinu boritou. Mimo colemanitu se používají suroviny vyrábějí synteticky. U nás se ložiska boritých minerálů nevyskytují.

4.3.3 Oxid fosforečný P₂O₅

Dalším sklotvorným oxidem je oxid fosforečný. V křemičitých sklech se rozpouští jen do 1,5 až 3 % P₂O₅, ale nad přibližně 0,5 % tvoří při ochlazování nebo při následném zahřátí zákaly, kap. 3.3. Toho je využíváno u kapénkového zákalu, tzv. opalínu. Fosforečnany se přidávají také do nabíhavých skel, například do rubínu, protože usnadňují nabíhání. Fosforečnany se používají spolu s fluoridy jako kalivo do bižuterních nebo osvětlovacích skel.

Skla na bázi oxidu fosforečného (bez oxidu křemičitého) jsou vesměs velmi dobře propustná v UV oblasti, kdežto v IČ oblasti jsou nepropustná. Jsou zajímavá odolností proti HF a také se používají jako speciální optická a zátavová skla.

Samotný fosfor může za určitých podmínek tvořit sklo, jedná se o sklotvorný prvek. Sklo může také tvořit ve spojení se selenem.

Jako surovina se používá přírodní apatit $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)\text{F}$, syntetický fosforečnan vápenatý, kostní popel a případně další syntetické suroviny (kyselina fosforečná apod.). Největší zásoby fosforečnanových minerálů jsou v Maroku, USA, Austrálii a v Rusku (poloostrov Kola).

4.4 Suroviny, kterými se vnášejí oxidy Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , SnO_2

4.4.1 Oxid hlinitý

Zemská kůra obsahuje 16 % Al_2O_3 , který je oxidem intermediárním. Ionty Al^{3+} mohou izomorfně nahrazovat ionty Si^{4+} v tetraedrech. Tetraedry AlO_4 a SiO_4 jsou velikostí blízké, takže čtyřstěny hliníku mohou izomorfně částečně zastupovat v křemičité síti tetraedry křemíku. Do běžných průmyslově vyráběných skel se proto hliník vnáší náhradou za křemík.

Přídavky hliníku zvyšují odolnost skla vůči odskelnění, zlepšují mechanické vlastnosti (zvyšuje modul pružnosti skla, vrypovou pevnost) a chemickou odolnost (do 0,8 do 2 % Al_2O_3 u plochého a částečně i užitkového skla, v případě obalového skla i více). Sklo je také „delší“. Přídavky Al_2O_3 silně zvyšují povrchové napětí skla, proto se hlinité šlíry špatně homogenizují.

Jako surovina se používají nejvíce živce (pro sklářský průmysl mají praktický význam hlavně živce obsahující alkálie, což je živec draselný, ortoklas nebo mikroklin, $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ a dále živec sodný, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ albit, který tvoří izomorfní řadu se živcem vápenatým, anorthitem $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ nazývanou souhrnně plagioklasy), nefelinsyenit, znělec, pegmatit a v menším rozsahu celá plejáda hornin včetně kaolinu. Pro sklářský průmysl v ČR mají největší význam ložiska živce v Halámkách (mikroklin, ortoklas) a mezi Krásnem a Slavkovem (Vysoký Kámen, albit a ortoklas). Z uměle připravených se nejčastěji používá hydrát hlinitý $\text{Al}(\text{OH})_3$. Používají se i hlinité odpadní suroviny, nejčastěji vysokopecní strusky. Hliník je přítomen i v dalších surovinách, proto skla tavená bez samostatných hlinitých surovin stejně obsahují 0,15 až 0,30 % Al_2O_3 .

4.4.2 Oxid titaničitý

Jeho přítomnost ve skle snižuje viskozitu, zlepšuje tavitelnost a chemickou odolnost. Jeho využití je zanedbatelné.

4.4.3 Oxid zirkoničitý

Výrazně snižuje součinitel teplotní roztažnosti a zvyšuje chemickou odolnost skla, především vůči alkáliím. Používá se jen zřídka, nejčastěji používanou surovinou je zirkon ZrSiO_4 . Význam má hlavně jako nukleátor při výrobě skelně krystalických hmot. Určitý nízký obsah ZrO_2 ve sklech bývá přítomen z koroze zirkoničitých žáromateriálů.

4.4.4 Oxid cíničitý

Nepřináší sklu žádné významné vlastnosti, jeho cena je vysoká, jako kalicí surovina je drahý. Význam má jako materiál pro výrobu elektrod, s kovovým elementárním cínem se

rovněž setkáváme při výrobě plaveného skla. Oxid ciničitý se také používá jako přísada při barvení skla koloidními barvivy.

4.5 Suroviny, kterými se vnášejí oxidy kovů alkalických zemin a kovů stabilizujících sklovinu

Do této skupiny se řadí CaO, MgO, PbO, BaO, ZnO a SrO.

4.5.1 Oxid vápenatý

Vápníku je v zemské kůře 3,4 hmotn. %, což odpovídá přibližně 4,7 hmotn. % CaO. Vápník je hlavní složkou celé řady minerálů, ovšem stejně jako u jiných surovin je kladen velký požadavek na jejich čistotu, takže použitelných surovin je podstatně nižší podíl.

Oxid vápenatý zpevňuje strukturu skla, proto se používá jako stabilizátor. Výrazně zvyšuje chemickou odolnost sodnodraselnokřemičitého skla vůči vodě, alkáliím i kyselinám. U těchto skel (náhradou za SiO₂) zvyšuje hustotu, teplotní roztažnost a index lomu, snižuje ovšem světelnou disperzi. Jeho vliv na viskozitu je složitější – při vyšších teplotách ji snižuje, naopak při nižších teplotách viskozita stoupá, sklo se stává „krátkým“. Zvyšuje modul pružnosti a také tvrdost skla a při náhradě za Na₂O zvyšuje mechanickou a vrypovou pevnost.

Jako surovina pro vnášení CaO se používá hlavně dolomit a vápenec, v malém množství i přírodní sádrovec nebo anhydrit (CaSO₄) z odsiřování elektráren. CaO je obsažen i v některých dalších surovinách, jako je apatit (zdroj P₂O₅) nebo fluorit (zdroj fluoru).

Vápenec, chemicky CaCO₃, je běžný minerál, jehož ložiska jsou značně rozšířena. Rozhodujícím ukazatelem vhodnosti jeho použití při výrobě skla je obsah železa, který je různý pro vyráběná skla, limity pro různé složení skla jsou uvedeny v kap. 4.7.2.5. Doprava do sklárny je buď po železnici nebo autocisternami.

Dolomit je minerál chemického vzorce CaMg(CO₃)₂. Touto surovinou se do skla vnášejí současně oxidy vápenatý CaO a hořečnatý MgO. Hmotnostní poměr těchto dvou oxidů zůstává zachován i po utavení skla, a pokud je nutné tento poměr změnit, musí být použity další suroviny, např. vápenec CaCO₃ nebo magnezit MgCO₃. Ložiska dolomitu v kvalitě použitelné pro výrobu skla se nacházejí téměř ve všech světadílech. Nejdůležitější charakteristikou chemického složení je opět obsah železa, limity pro různé složení skla jsou uvedeny v kap. 4.7.2.5. Po vytěžení se dolomit dopravuje do skláren volně ložený po železnici. Do ČR se většina nejkvalitnějšího dolomitu pro sklářské účely dováží ze Slovenska (ložisko Malé Kršteňany).

4.5.2 Oxid hořečnatý

Hořčíku je v zemské kůře 2,4 hmotn. %, což odpovídá přibližně 3,9 hmotn. % MgO. Hořčík je hlavní složkou řady minerálů, ovšem stejně jako u jiných surovin je kladen velký požadavek na jejich čistotu, takže použitelných surovin je mnohem méně.

Zvýšení obsahu MgO snižuje hustotu skel a také teplotní roztažnost. MgO „prodlužuje“ sklovinu a zlepšuje její zpracovatelnost. Zvyšuje také povrchové napětí, zvyšuje vrypovou

tvrdost, snižuje index lomu a u skloviny její zpracovatelnost. Pravděpodobně příznivě ovlivňuje chemickou odolnost.

Jako surovina se používá nejčastěji dolomit, kde je přítomen současně s CaO, kap. 4.5.1. Dále se v omezené míře využívá magnezit (MgCO_3), oxid hořečnatý a mastek.

4.5.3 Oxid olovnatý

Průměrný obsah olova v zemské kůře je pouze 0,0013 %, je však koncentrováno v ložiscích s dalšími kovy (Zn, Cu apod.). Sloučeniny olova se přidávají do skla od 17. století (Anglie) a používají se hlavně pro 24% a 30% olovnatý křišťál, optická a technická skla. Lze se setkat i se skly s 80 % PbO , která jsou používána z důvodu absorpce ionizačního záření (kap. 3.9.3). Olovo a jeho sloučeniny jsou toxické. V současné době se olovo ve skle nahrazuje jinými prvky z důvodu ekologických a zdravotních. Množství uvolněného olova ze struktury skla z hotového výrobku do požívatin je však velmi nízké a není podle výzkumů zdraví škodlivá.

Ionty olova jsou snadno „deformovatelné“ a snadno se přizpůsobí ve struktuře skla. Olovnatá skla mají níže položenou viskozitní křivku (jsou „měkká“), jsou proto snadněji tavitelná. Při tavení se ale oxidy olova mohou redukovat až na kovové olovo, které klesá ke dnu a silně koroduje vyzdívku tavicího agregátu. Pro úspěšné tavení olovnatých skel je podmínkou oxidační prostředí. Za redukčních podmínek se na povrchu výrobků může objevit vyredukované kovové olovo. PbO silně snižuje povrchové napětí. Olovnatá skla mají vysoký index lomu, disperzi, třpyt a jiskrnost, což vynikne především u členitých povrchů získaných nejčastěji broušením. Tato skla mají i relativně nízkou brusnou tvrdost, takže se snadno brousí. Díky snížení modulu pružnosti mají olovnatá skla pěkný zvuk. Díky hustotě samotného olova, zvyšuje PbO hustotu skla.

Pro vnášení olova do skla se výhradně používají průmyslově vyráběné sloučeniny v dostatečné čistotě. Nejčastější surovinou je suřík (minium) Pb_3O_4 (těžký červený prášek). Další surovinou je klejt PbO , který je často dodáván ve formě granulí.

4.5.4 Oxid barnatý

V zemské kůře je přítomno asi 0,04 % barya. Baryum spolu se stronciem je do určité míry možné použít jako náhradu za olovo. V případě BaO je sklo nazýváno krystalin, jeho index lomu se pohybuje okolo hodnoty 1,52.

Baryum výrazně zvyšuje hustotu skla a mírně zvyšuje teplotní roztažnost. Chemická odolnost barnatých skel je vyšší než u skel olovnatých, ale nižší než u skel vápenatých. Přídavky BaO stoupá modul pružnosti, proto barnatá skla při úderu zvoní, což se cení u stolního skla. Barnatá skla jsou výrazně „měkká“ a „dlouhá“. Sklon k odskelnění je u barnatých skel nižší než u skel vápenatých. Na rozdíl od PbO nezvyšuje BaO disperzi, proto barnatá skla nejeví ceněnou „hru barev“, která je typická pro olovnatá skla, naopak představují ideální optická skla bez chromatické vady.

Pro vnášení BaO do skla se používá převážně uhličitán barnatý (BaCO_3), který je dodáván výhradně uměle připravený a je dodáván ve formě jemného prášku nebo granulí. Další omezeně používanou surovinou je síran barnatý (BaSO_4), který je dodáván jako přírodní z nejlepších ložisek s nízkým obsahem Fe_2O_3 .

4.5.5 Oxid zinečnatý

ZnO snižuje u skla součinitel teplotní roztažnosti, zlepšuje tavitelnost skloviny a její čerení. Má význam především pro výrobu skel technických a speciálních optických. Do skloviny se dodává výhradně jako syntetický ZnO.

4.5.6 Oxid strontnatý

Mezi další suroviny patří syntetický uhličitán strontnatý, který se používá k vnášení oxidu strontnatého SrO do speciálních skel, například pro výrobu televizních obrazovek pro barevnou televizi.

4.6 Suroviny, kterými se vnášejí oxidy alkalických kovů

Patří sem zejména oxid sodný Na_2O , oxid draselný K_2O a oxid lithný Li_2O , které mají podobné vlastnosti.

4.6.1 Oxid sodný

Sodík je obsažen v zemské kůře zhruba 2,4 hmotn. %, což odpovídá přibližně 3,2 % Na_2O . Sodík je hlavní složkou řady minerálů včetně horninotvorných, ovšem stejně jako u jiných surovin je kladen velký požadavek na jejich čistotu, takže přírodních použitelných surovin je mnohem méně a u kvalitnějších sklovin převažují syntetické suroviny (hlavně soda).

V běžných sklech má sodík (i draslík) největší vliv na vlastnosti i cenu skla. U běžných skel činí náklady na sodu asi 70 až 80 % nákladů na suroviny, proto již při volbě složení se obsah Na_2O volí co nejnižší. Jako složka skla se vyskytuje běžně. Jeho přítomnost usnadňuje tavení, snižuje tavicí teploty, zvyšuje součinitel teplotní roztažnosti a snižuje chemickou odolnost skla. Přídavky Na_2O snižují viskozitu v celém teplotním rozsahu. Jeho přítomnost silně zvyšuje elektrickou vodivost skloviny, čehož se v praxi využívá při tavení skla přímým průchodem elektrického proudu. Na_2O snižuje dále hustotu, index lomu, modul pružnosti, tvrdost a také materiálovou pevnost skla (bez závislosti na kvalitě povrchu).

Jako surovina běžných i kvalitnějších skel se používá průmyslově vyráběná bezvodá soda (Na_2CO_3) získaná solvayovým procesem. Podle výsledné formy (sypné hmotnosti a prašnosti) se rozlišuje lehká a těžká soda, vyráběná z lehké sody monohydrátovým způsobem. Rozdíl mezi těžkou a lehkou sodou je v její ceně, kdy těžká je dražší, ale na druhou stranu se s ní lépe manipuluje, má nižší prašnost, méně se spéká a vlhne. V USA se používá i přírodní trona ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), která je ekonomicky, energeticky a obvykle i ekologicky výhodnější než výroba procesem Solvay. Další používané syntetické suroviny jsou Na_2SO_4 a NaNO_3 .

Pro levné skloviny (barevné obalové apod.) se běžně používají komplexní přírodní suroviny současně vnášející vedle Al_2O_3 a SiO_2 i určitou část Na_2O (živce sodný, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ albit, který tvoří izomorfní řadu se živcem vápenatým, anorthitem $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ nazývanou souhrnně plagioklasy, nefelinsyenit, znělec, pegmatit apod.).

Suroviny se přepravují v cisternách, vyprazdňování a doprava do zásobníků je prováděna tlakovým vzduchem. Problémem sody je její vlhnutí a vyšší cena.

4.6.2 Oxid draselný

Draslík je obsažen v zemské kůře zhruba 1,8 hmotn. %, což odpovídá přibližně 2,2 % K_2O . Draslík je hlavní složkou řady minerálů, ale přímo využitelný je pro levnější druhy skla pouze živec draselný, $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ orthoklas. Potaš (K_2CO_3) jako hlavní sklářská surovina draslíku je vyráběn z draselných solí, které se vyskytují společně se sodnými solemi.

K_2O je základní alkalickou surovinou olovnatých křišťálů. Byl také důležitou složkou historického českého křišťálu. Draselná skla dávají barevně čistší odstíny a sklo se dobře odbarvuje.

Draselná skla jsou „krátká“, dobře se brousí, oxid draselný snižuje hustotu, modul pružnosti a pevnosti. Skla sodno-draselná mají menší sklon k odsakelnosti a lepší odolnost vůči vodě. Pro svou vysokou cenu se K_2O používá jen tam, kde je jeho přísada zdůvodněna (uváděna 3 až 4krát vyšší cena potaše než sody).

Malá množství K_2O se do levnějších skel vnášejí surovinami jako je živec (orthoklas z ložiska Halámky) nebo znělec. Surovinou pro vnášení většího množství je především potaš K_2CO_3 , někdy také dusičnan draselný KNO_3 . Nevýhodou potaše je její hygroskopičnost (sklon k vlhnutí).

V dřívějších dobách se pro výrobu „českého křišťálu“, historického draselnovápenatokřemičitého skla z oblasti českých zemí, vyráběla alkalická surovina zvaná „salajka“ s obsahem 10 až 25 % K_2O , jejíž hlavní součástí byla potaš. Salajka se získávala vyluhováním popela dřeva, které bylo za tímto účelem ve velkém spalováno. Činnost historických sklárů byla proto také důvodem vysoké míry odlesnění českých zemí ve středověku a sklárny se často stěhovaly, když ve svém okolí spotřebovaly stromy na výrobu dřevěného uhlí a salajky.

4.6.3 Oxid lithný

Průměrný obsah lithia jako oxidu se v zemské kůře uvádí 0,014 % Li_2O . Lithium se vyskytuje ve formě křemičitanů, hlinitokřemičitanů nebo fosforečnanů.

Oxid lithný je neúčinnějším tavivem a to i při malých množstvích, urychluje a usnadňuje sklotvorné reakce, snižuje vysokoteplotní viskozitu a povrchové napětí, prodlužuje sklo. Li_2O snižuje hustotu a tepelní roztažnost. Lithná skla mají menší index lomu i disperzi než skla sodná nebo draselná a propouštějí více krátkovlnných paprsků. Li_2O již v minimálních množstvích (od 0,05 %) příznivě ovlivňuje některé vlastnosti skla, je ale drahý a výsledný efekt je neekonomický. Významný obsah Li_2O je v některých speciálních sklech a dále ve skelně krystalických hmotách systému $Li_2O-Al_2O_3-SiO_2$ vyznačujících se extrémně nízkou teplotní roztažností (varné desky, tepelné výměníky, součásti dalekohledů, hlavice raket apod.).

Hlavním těženým minerálem je spodumen, ze kterého se získává uhličitan lithný (Li_2CO_3), což je hlavní čistá surovina.

4.7 Barvicí suroviny

Jedná se o suroviny, které sklu dodávají žádoucí zabarvení. Barvicí částice mohou být ve skle přítomny ve formě iontů či molekul (velikost < 1 nm), jako koloidy (velikost 1 až 500 nm) anebo jako větší shluky způsobující až zákal. Výsledné zabarvení závisí na více činitelích, zejména je to:

- koncentrace barvicích látek,
- chemické složení základního skla,
- redox stav skla, který závisí na přítomnosti oxidovadel a redukovadel a na podmínkách tavení,
- způsob tepelného zpracování (u barev nabíhavých).

Barviva iontová se dělí podle jejich účinků

- a) ionty, které se vyskytují ve skle v jednom oxidačním stupni (Ni, Co),
- b) ionty, které se vyskytují ve skle ve dvou nebo více oxidačních stupních (Cr, Fe, Mn, V, U, ...).

4.7.1 Barviva iontová s jedním oxidačním stupněm

4.7.1.1 Sloučeniny niklu

Nikl se ve skle vyskytuje pouze v jednom oxidačním stupni a barva tak nezáleží na oxidačně-redukčních podmínkách (redox stavu). Ionty Ni^{2+} barví sklo podle jeho základního složení. Sodná skla barví podle koncentrace od lehce šedé (0,5 % NiO), přes tmavě červenošedou (3 %) až po tmavě hnědočervenou (8 %). U draselných skel od fialové s odstínem do modra (0,5 %), přes zářivě fialovou (1 %) a tmavě fialovou (2 %) až černou (8 %). Surovinou je převážně oxid nikelnatý NiO.

4.7.1.2 Sloučeniny kobaltu

Ionty Co^{2+} barví skla modrofialově, draselná skla s odstínem do modra, sodná a boritokřemičitá s odstínem do červena. Kobalt je jedním z nejintenzivněji barvicích prvků používaných ve sklářství, sytého zabarvení se dosahuje již při koncentraci 0,02 % CoO a při koncentraci nad 1 % je sklo neprůhledné. Surovinou je nejčastěji oxid kobaltnatý CoO.

4.7.2 Barviva iontová se dvěma a více oxidačními stupni

4.7.2.1 Sloučeniny chromu

Chrom bývá ve skle přítomen ve dvou oxidačních stupních, jako Cr^{3+} a Cr^{6+} . Zbarvení závisí především na přítomnosti dalších iontů a minimálně na podmínkách tavení. Trojmocný iont obvykle převládá a barví skla převážně modrozeleně. Skla barvená Cr^{6+} jsou zabarvena žlutozeleně až žlutě, v olovnatých sklech oranžově až červeně a výrazně absorbují ultrafialové záření. Chrom barví sklo vcelku intenzivně. Sodná skla jsou zabarvena od 0,005 % Cr_2O_3 , silné zabarvení (májová zeleň) je získána při koncentraci 0,2 % Cr_2O_3 . Pro barvení zeleného obalového skla se jako surovina používá přírodní upravený chromit, případně druhotné suroviny.

4.7.2.2 Sloučeniny manganu

Mangan se ve skle vyskytuje ve dvou oxidačních stupních jako Mn^{2+} a Mn^{3+} . Skla obsahující pouze Mn^{2+} jsou bezbarvá, oxidují se však při chladnutí, takže konečné zabarvení bývá žluté až hnědavé. Mn^{3+} barví sklo intenzivně fialově. Vzhledem k citlivosti na oxidační podmínky je reprodukovatelnost zabarvení obtížná. Zřetelné zabarvení je zhruba od 1 %, při 5 % je zabarvení silné, použití je především v kombinaci s dalšími barvivy. Jako suroviny se používá burel (MnO_2).

4.7.2.3 Sloučeniny vanadu

Vanad se ve skle vyskytuje jako V^{3+} , který způsobuje zelené zabarvení, VO^{2+} , který je málo barvicí ve viditelné oblasti, ale silně absorbuje v UV oblasti, a V^{5+} , který barví žlutě až hnědě. Obvykle jsou ve skle přítomny všechny tři valence v různém poměru. Zabarování není příliš intenzivní (300krát menší než u CoO), používají se přídavky mezi 2 až 5 %. Nad 5 % je zabarování olivově hnědé. Vanadová skla absorbují dobře UV záření při značné propustnosti viditelného záření. Uplatnění je tak při výrobě skel zeleného odstínu se zvýšenou absorpcí ultrafialového záření a pro svářečská skla. Surovinou je oxid vanadičný V_2O_5 a vanadičnan amonný NH_4VO_3 .

4.7.2.4 Sloučeniny uranu

Barvení skla uranem je atraktivní, neboť uranová skla mají významnou fluorescenci, vyvolanou ultrafialovým zářením (kap. 3.9.5). V procházejícím světle jsou tato skla světle žlutá a v odraženém zelená. Uran se ve skle vyskytuje jako čtyřmocný a především jako šestimocný (kationt uranylový UO_2^{2+}). Pro požadované zabarování se používá koncentrace do 4 % U_3O_8 . Jako surovina se používá diuranan sodný (uranová žluť, $Na_2U_2O_7$), oxid uraničito-uranový (U_3O_8) a uhličitan uranylo-sodný ($UO_2Na_4(CO_3)_3$). V minulosti byl výhradním dodavatelem uranových barev pro sklářství Jáchymov v Krušných horách, kde se rudy uranu těžily a také zpracovávaly.

4.7.2.5 Sloučeniny železa

Železo se vyskytuje ve skle ve formě iontů Fe^{2+} (FeO) a Fe^{3+} (Fe_2O_3). Ve skle jsou vždy přítomny oba ionty, jejich vzájemný poměr je dán podmínkami tavení, příp. přítomností oxidovadel, resp. redukovadel. Ion Fe^{2+} barví sklo modrozeleně (při redukčních podmínkách) a je 10 až 15krát intenzivnější než Fe^{3+} . Ion Fe^{3+} barví sklo žlutozeleně až žlutě (při oxidačních podmínkách). První pozorovatelné zabarování je při obsahu 0,01 % Fe_2O_3 a při obsahu kolem 0,05 % Fe_2O_3 (celkového železa) je zelenavý odstín zcela zřetelný.

Sloučeniny železa se pro barvení skla používají minimálně. Prakticky jen u plochého skla, kde se využívá zvýšené absorpce tepelného záření ve skle vlivem dvojmocného železa (výroba detemálních skel) a u vláken, kde přídavek okolo 0,4 % pomáhá tažení vláken.

U většiny skel je zabarování železem spíše závadou. Pro různé druhy skel jsou značně rozdílné požadavky na obsah železa, který pochází hlavně ze surovin, Tab. 4.4. Snahou je proto množství železa minimalizovat použitím kvalitních surovin s nízkým obsahem železa, vhodným skladováním, minimalizací kontaktu s železnými povrchy, účinným separováním kousků železa magnety. Úplné odstranění železa, není prakticky možné, a proto je jeho zabarování odstraňováno odbarvováním.

Tab. 4.4 Požadavky na obsah železa pro různé typy skel

Sklo	% Fe ₂ O ₃
Optické sklo	0,001 až 0,012
Křišťálové sklo	0,008 až 0,015
Kvalitní bílé obalové sklo	0,020 až 0,050
Ploché sklo	0,020 až 0,100
Zelené obalové sklo	0,1 až 1,0

4.7.2.6 Odbarvování skla

Vedle železa mohou barvit i další prvky vnášené především surovinami a rozpouštěním žárovzdorných materiálů.

Při odbarvování skla je možno vycházet ze dvou odlišných principů, které se v praxi mohou kombinovat.

Odbarvování chemické představuje využití oxidovadel, případně oxidačního prostředí při tavení, kdy se rovnováha mezi ionty Fe²⁺ a Fe³⁺ posunuje na stranu iontu železitého, tedy iontu, který způsobuje zabarvení o nižší intenzitě. Jako chemická odbarviva se používají síran sodný (Na₂SO₄), dále oxid arzenitý (As₂O₃) a antimonitý (Sb₂O₃) spolu s dusičnanem sodným (NaNO₃). Uvedené odbarviva slouží ve sklovině také k čerění, kap. 4.9. Jako odbarvivo je používán také oxid ceričitý (CeO₂).

Chemickým odbarvením lze sice intenzitu zabarvení skla snížit, ale nikoliv odstranit, neboť vzniklé ionty Fe³⁺ způsobují žlutozelené zabarvení. Slabé žlutozelené zabarvení, které má sklo odbarvené chemicky, není žádoucí, proto se dále odbarvuje fyzikálně.

Odbarvování fyzikální využívá principu sčítání vlnových délek světla příslušejícího určité barvě, přičemž se volí přibarvování skla na barvu doplňkovou (komplementární), která dává s nežádoucím odstínem neutrální šed', Obr. 4.1. Doplnkovým zbarvením k žlutozelenému odstínu je barva fialově růžová – tento odstín se historicky získával pomocí sloučenin manganu (MnO₂ nebo KMnO₄), v současné době se používá oxid nikelnatý (NiO), event. sloučeniny selenu a vzácných zemin.

Co nejmenší obsah železa ve skle je nezbytný pro minimalizaci dávkovaných barviv, aby výsledný podíl šedi byl co nejmenší a výrobky měly co nejvyšší kvalitu.

4.7.3 Barviva molekulární

U těchto barviv je výsledné zabarvení skla způsobeno přítomností jejich molekul. Hlavní rozdíl mezi těmito barvivy a barvivy koloidními spočívá ve velikosti barvicích částic. Do skupiny molekulárních barviv se řadí zejména síra, selen a jejich sloučeniny.

4.7.3.1 Sloučeniny síry a uhlíku

Nejznámější je uhlíková žlut' – ambr. Toto zbarvení je podle současných poznatků způsobeno iontem Fe³⁺ v tetraedrické koordinaci se třemi kyslíkovými anionty O²⁻ a jedním sulfidovým iontem S²⁻. Zabarování je velmi ovlivněno redox stavem, nadměrná oxidace i redukce způsobí odbarvení. Uhlík zde má funkci regulátoru redox-rovnováhy, ambrové

zabarvení je nejstabilnější při slabě oxidačním režimu spalování v peci. Právě hnědé obalové sklo je barveno přísadou uhlíku a síry. Jako surovina se používá síran sodný (Na_2SO_4), pyrit (FeS_2) a grafit, koksový prach, ... Lze se setkat i s použitím mouky (žitné, pšeničné), prosa, škrobu a cukru.



Obr. 4.1 Grafické znázornění fyzikálního způsobu odbarvování, barevný kruh s vyznačením příkladu komplementárních barev

4.7.3.2 Barvení selenem a jeho sloučeninami

Podstatou růžového zbarvení skla barveného selenem (selenového rosalinu) je elementární selen. V přítomnosti těžkých kovů však vznikají tmavě zbarvené selenidy, tomu lze zabránit přidávkou ZnO do skla. Mnohem významnější je však odbarvování selenem, protože růžové zbarvení je komplementární k žlutozelenému zbarvení způsobenému malým množstvím železa.

Jako suroviny selenu se používá kovový selen nebo seleničitany (barnatý, zinečnatý nebo sodný).

4.7.4 Barviva koloidní

Přesycené roztoky některých kovů ve sklovině se chovají tak, že při ochlazování vylučují kovové částice ve formě krystalitů tvořených větším počtem atomů. Při velikosti těchto částic pod 5 nm zůstávají skla bezbarvá. Dalším tepelným zpracováním, tzv. nabíháním, dochází ke zvětšování shluků, provázenému vznikem zabarvení, až při dosažení velikosti 70 až 100 nm lze pozorovat ve skle zákal.

4.7.4.1 Barvení zlatem

Jako příklad je možno uvést barvení skla zlatem. Zabarvení zlatem patří k nejkrásnějším barvám. Výsledný odstín je ovlivněn chemickým složením základního skla, tavícím, chladícím, ale zejména nabíhacím postupem. Podstatou zabarvení jsou krystalky zlata velikosti od 5 do 60 nm. Větší částice již způsobují zákal. Barva je ovlivněna mimo jiné

množstvím a velikostí částic zlata. Krystalky velikosti pod 5 nm dávají skla bezbarvá až světle žlutá, částice velikosti kolem 10 nm skla růžová, částice rozměru 10 až 20 nm skla nafialověle červená a při velikosti částic 20 až 50 nm vzniká krásný purpurový rubín. Při velikosti nad 70 nm je sklo zakalené až neprůhledné. Vybarvení je podporováno přidávky nukleačních činidel např. selenu, dále pak SnO_2 , PbO , CaF_2 . Jako suroviny se používá výhradně chlorid zlatitý ($\text{AuCl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Potřebné dávky zlata tvoří 1 až 20 g na 100 kg skla, protože je množství malé, aplikuje se často jako vodný roztok.

4.7.4.2 Další koloidní barviva

Dalším příkladem koloidního barviva je sulfoselenid kademnatý $\text{Cd}(\text{S}, \text{Se})$, který barví skla podle poměru síry a selenu do žluta až do červena. Jako surovina se používá přímo sulfoselenid kademnatý a je nutné tavit sklo za mírně redukčních podmínek, ale vzhledem k ekologické závadnosti surovin a tavby je použití potlačováno. Přesto je stále využíván jak v bižuterii, tak hlavně pro signální skla.

4.8 Kalicí suroviny

Zakalená skla je označení pro skla neprůhledná (opakní). Podle podstaty zakalující přísady rozdělujeme zákaly na krystalické, kapénkové a plynné.

Krystalické zákaly jsou vyvolány především sloučeninami fluoru, které se ve sklovině dobře rozpouštějí, ale při ochlazení z ní krystalují fluoridy, hlavně CaF_2 (opálové sklo pro osvětlovací techniku), u olovnatých skel se používá oxid arzenitý a krystaluje arzeničnan olovnatý.

Kapénkové zákaly vznikají na obdobném principu. Kalivo se za vysokých teplot ve sklovině dobře rozpouští, ale při ochlazení se z ní vyloučí ve formě emulze. Při dalším ochlazování tyto kapénky zkrystalují. Řadí se sem fosforečnanové (kap. 4.3.3), fluor-fosforečné a síranové kalení.

Plynné zákaly nejsou ve sklářství běžné. Příkladem může být opakní křemenné sklo, jehož opacita je způsobena jemně rozptýlenými bublinkami vzduchu, které se v průběhu tavení v důsledku vysoké viskozity taveniny nedostaly na povrch skla a nemohly uniknout do atmosféry.

4.8.1 Fluoridy

Fluoridy výrazně snižují viskozitu v celém teplotním rozsahu, snižují teplotu liquidus a také hustotu. V opálových sklech je obsah fluoridů 2 až 6 % F. Při nižších obsazích než 2 % F lze fluoridů použít i jako čeřivo a urychlovač tavení. Nevýhodou fluoridů je vyšší koroze žárovzodorných materiálů a kovových forem. Ve snaze snížit obsah škodlivých fluoridů je upřednostňováno fluor-fosforečné kalení.

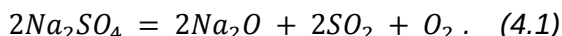
Pro výrobu opálového skla se používá kazivec (fluorit, obsah CaF_2 nad 95 %) a fluorokřemičitan sodný (Na_2SiF_6). Jako urychlovač a čeřivo se fluoridy v současné době již příliš nepoužívají vzhledem k jejich závadnosti a ekologicky problematické tavbě (především exhalace).

4.9 Čeřicí suroviny

Účelem čeření je zbavit utavenou sklovinu bublin a současně ji promíchat. Čeřivo z tohoto pohledu je látka uvolňující při vysoké teplotě značné množství bublin plynů, které se při výstupu na hladinu spojují a zvětšují. Čeřivo začíná fungovat až při zvýšené teplotě, často nad 1200 °C. Plyn uvolňovaný čeřivem musí být ve sklovině rozpustný, aby po ukončení čeření došlo k rozpuštění zbylých nejmenších bublinek (kyšpy, prach). Různá skla potřebují různá čeřiva, není univerzální čeřivo. Podle mechanismu působení je možno čeřiva rozdělit do několika skupin obdobného působení.

4.9.1 Síranové čeření

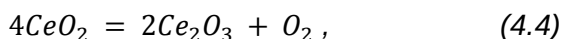
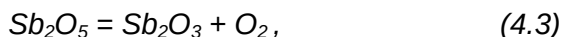
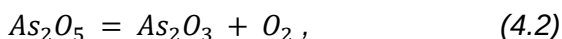
Podstatou tohoto způsobu čeření je rozklad síranu sodného podle rovnice



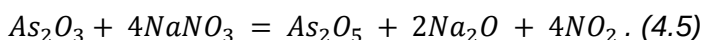
K rozkladu dochází v rozmezí teplot 1200 až 1400 °C. Podobně se chovají i další sírany (vápenatý, barnatý, hořečnatý, amonný). Síranové čeření je hlavní metodou čeření skla. Používá se mimo jiné při výrobě plochého i obalového skla. Použití síranů je omezeno u olovnatých skel. Při síranovém čeření je třeba zajistit redukci síranů, které barví sklo, což se provádí přidávkou uhlíku, grafitu, ... Množství SO_3 ve skle je doporučováno na úrovni 0,4 %, ale mohou být i 1,4 %.

4.9.2 Oxidové čeření

Je obdobou předchozího způsobu s tou odlišností, že čeřicí kyslík se uvolňuje z oxidů. Mezi oxidová čeřiva se řadí oxid arsenitý (As_2O_3), oxid antimonitý (Sb_2O_3) a oxid ceričitý (CeO_2). Oxidové čeření je zřejmé z následujících rovnic



Pokud se nepoužívají arzeničnany nebo antimoničnany, je nutno přidávat do vsázky dusičnan sodný, který při nižších teplotách oxiduje třímocný arsen (nebo antimon) na pětímocný. Pak chemismus vypadá následovně



Přitom Sb_2O_5 se rozkládá při nejnižší teplotě a CeO_2 při nejvyšší teplotě.

Tradiční surovinou pro čeření je antimon s dávkováním od 0,05 do 0,5 % na utavenou sklovinu. Oxid antimonitý a antimoničnany jsou modernějším čeřivem a dávkování je uváděno mezi 0,3 až 0,5 %. Oxid ceričitý se používá ojediněle, neboť převažuje oxidační účinek nad čeřícím.

Kromě výše uvedených čeřiv se někdy používají halogenidy nebo samotné dusičnany.

4.10 Urychlovače tavení

Mezi urychlovače tavení se řadí látky, které svým účinkem snižují dobu tavení. Jejich působení může být trojího charakteru:

- vlastní urychlení chemických reakcí vytvořením agresivní taveniny, naleptáním povrchu pískových zrn,
- vytvoření dobře tekuté taveniny již při nízké teplotě, čímž probíhají rozpouštěcí reakce rychleji,
- lepší spojení reagujících surovin navzájem, ještě před začátkem tavení.

Nejčastěji se jako urychlovače tavení používají fluoridy, chloridy, sírany, siřníky, ale patří sem i voda, jejíž obsah ve vsázce se pohybuje v optimálním případě mezi 2 % až 4 %.

4.11 Střepy

Použití skleněných střepů při tavení přináší řadu výhod, jako jsou urychlení tavicího procesu, úspora surovin, úspora energie, ekologie, úspora nákladů na dovoz a likvidaci odpadů. Část energie nutná pro průběh chemických reakcí a dějů mezi složkami kmene je ve střepích již obsažena. Na druhou stranu se zvyšují náklady svozem a recyklací střepů. U běžných tavicích agregátů je uváděna úspora při použití 1 tuny střepů 2 GJ energie. U vlastních i cizích střepů je důležitá čistota, která je ovlivněna především střepovým hospodářstvím, které zajišťuje sběr a úpravu před zakládáním do pece. Více v kap. 5.6.

4.12 Příklady složení skla

Jak vyplývá z výše uvedeného, chemické složení skla může být velmi rozmanité, nicméně velké objemy některých typů skleněných výrobků jsou vyráběny ze skla podobného chemického složení. V následující tabulce (Tab. 4.5) jsou uvedeny (s určitým zjednodušením a zaokrouhlením) příklady chemického složení vybraných skel.

Tab. 4.5 Chemické složení skel (v % hmotnostních)

Složka	Ploché sklo	Obalové sklo zelené	Olovnatý křišťál	Sklo SIMAX
SiO ₂	72,2	71,8	57,5	80,6
Al ₂ O ₃	0,9	2,0	–	2,1
Fe ₂ O ₃	0,1	0,4	–	–
CaO	8,7	10,1	3,2	–
MgO	4,0	1,9	–	–
Na ₂ O	13,6	12,7	10,4	3,7
K ₂ O	0,3	0,8	3,9	1,1
SO ₃	0,2	0,1	–	–
Cr ₂ O ₃	–	0,2	–	–
PbO	–	–	25,0	–
B ₂ O ₃	–	–	–	12,5

5 Příprava sklářského kmene a vsázky

Základem sklářské výroby jsou sklářské suroviny o potřebné čistotě a jejich správný poměr. Před zakládáním do sklářské pece jsou suroviny míseny do tzv. kmene nebo vsázky.³ Homogenita kmene ovlivňuje ve značné míře i homogenitu skloviny, proto základní požadavky na sklářský kmen jsou následující: homogenita, nízká prašnost, minimální sklon k odmísení.⁴

Suroviny jsou nejprve dopraveny do sklárny, následně manipulací přemístěny do skladu, skladovány, případně upraveny, váženy, následně míseny a nakonec mohou být ještě upravovány. Velká část těchto operací se provádí v kmenárnách, které disponují potřebným vybavením. Mezi základní vybavení kmenáren patří zásobníky surovin, vážicí zařízení, mísiče a systémy zajišťující dopravu jak jednotlivých surovin, tak hotového kmene.

Mechanizace v kmenárnách se objevuje od druhé poloviny 19. století a tak je dnes možné se jen výjimečně setkat s kmenárnou bez strojního vybavení. Proces je dnes ve středních a velkých kmenárnách převážně automatizován. Znamená to, že vzájemný poměr surovin nebo samotná hmotnost těchto surovin je zadávána přímo z počítače.

5.1 Kontrola a přejímka surovin

Velké sklárny spotřebovávají denně stovky tun několika málo surovin a detailní kontrola každého vagónu není možná a ani účinná. Výhodnější je volit spolehlivého dodavatele s konstantní a dlouhodobou kvalitou.

Přejímka surovin se provádí u každého vagónu, auta, palety, obalu. Jejím cílem je zamezit použití dodávek, které by mohly způsobit ztráty ve výrobě. V podstatě spočívá ve vizuální kontrole (zda jde o danou surovinu, kontroluje se hrubé znečištění, smíchání s jiným materiálem, zrnitost, barva, ...) a v jednoduchých zkouškách (sítování,...).

Kontrola surovin se provádí podle určeného kontrolního plánu na vzorcích z části dodávek, zjišťuje se chemické složení a granulometrie. Úplná kontrola se provádí i u zásilek pozastavených při přejímce.

U malotonážních surovin pro výrobu jakostních skel (např. křišťálu a technického skla) se provádí přejímka s kontrolou u každé dodávky.

5.2 Skladování a manipulace se sklářskými surovinami

Jednotlivé suroviny se dodávají do sklárny běžnými způsoby. Některé volně ložené (písek), jiné v obalech. Způsob dopravy surovin do sklárny se řídí jejich charakterem.

³ Sklářský kmen je homogenizovaná směs sklářských surovin bez střeptů. Sklářský kmen se střepty připravený k zakládání do pecí se nazývá vsázka.

⁴ Odmísení je porušení homogenity (rovnoměrného rozložení surovin) v kmeni a možnost následného vzniku nehomogenních oblastí ve sklovině v důsledku rozdílné hustoty a granulometrie surovin zvláště působením otřesů.

Transport se provádí nejčastěji po železnici pomocí vagónů přizpůsobených možnostem mechanického vykládání (např. písek, dolomit a další), také pomocí autocisteren s následnou možností pneumatického transportu, např. soda, eventuálně v menších obalech, jedná-li se o minoritní složky.

Do oblasti manipulace se sklářskými surovinami se zahrnuje jejich doprava, přejímka, uskladnění a střepevé hospodářství.

Doprava surovin ve sklárně je prováděna pomocí:

- pásových dopravníků,
- pneumatické dopravy (pneutransportu),
- kontejnerů,
- palet,
- vibračních dopravníků,
- šnekových dopravníků,
- další použitelné mechanizace.

V současné době jsou nejčastěji dopravovány suroviny na pásových dopravnících a pomocí pneumatické dopravy. Pásový dopravník je dostatečně známý a v praxi často používaný prostředek k přepravě sypkých materiálů. Pneumatická doprava je uzavřený dopravní systém, který je využíván pro přepravu sypkých materiálů na vzdálenosti od desítek až po stovky metrů. Obecně lze pneumatickou dopravu rozdělit na přetlakovou nebo podtlakovou (vakuovou). Výhodou pneumatické dopravy oproti mechanické je, mimo jiné, minimální počet pohyblivých částí a tím i nízké nároky na údržbu. Pneumatická doprava je málo náročná na obsluhu a snadno se instaluje. Vzhledem k tomu, že se jedná o uzavřený dopravní systém, je pneumatická doprava bezprašná. Naopak nevýhodou je vysoká energetická náročnost, dochází také k abrazi potrubí a použitý vzduch musí být odprášen.

Uskladnění surovin se provádí podle objemu jejich dodávky a požadovaného předzásobení. Sklady mohou být sýpkové, představující volné uložení v oddělených krytých boxech (např. pro písek, střepy), dále jsou to sklady silového typu, minoritní složky kmene mohou být skladovány v menších obalech v uzamykatelných objektech. Nejjednodušší je skladovat suroviny v sílech nad váhami, což výrazně omezuje manipulaci se surovinami, ale vyžaduje zcela přesnou dodávku surovin, obvykle suchých. Pokud jsou síla nad váhami malá, je nutno používat zvláštní skladovací zásobníky a sklady. Všechny suroviny se zásadně skladují pod střechou, výjimka je možná jen u neupravených střepů.

Při skladování a následném vážení se dává přednost válcovým silům - zásobníkům s kuželovým zúžením ve spodní části (u hranatých profilů sil dochází vždy ke vzniku mrtvých koutů). Při dávkování do vážicího zařízení suroviny klesají vlastní tíhou, pokles je podporován např. příložitými vibrátory. Materiálem pro výrobu zásobníků je ocelový plech opatřený na vnitřní straně odolnou vrstvou. Zásobníky mohou být vybaveny stavoznakem pro kontrolu obsahu suroviny, nověji se používá umístění zásobníků na tenzometrických váhách a plynulé sledování hmotnosti obsahu.

Z ekonomických důvodů je třeba skladovat co nejmenší množství surovin, ovšem na druhou stranu je třeba zajistit výrobu i v případě očekávaných i neočekávaných situací. Celkové zásoby surovin jsou součtem běžné a pojistné zásoby, na což musí být

dimenzovány i zásobníky a sklady. Velikost běžné zásoby je dána dohodou s dodavatelem o velikosti a frekvenci dodávek a odpovídá velikosti jedné dodávky. Pojistná zásoba musí být schopna pokrýt výpadky dodávek v důsledku vlivu počasí, svátků a dovolených, ale i politických a průmyslových potíží. V zemích, kde je možno suroviny běžně dodávat, se volí zásoba surovin na 5 až 15 dní, u minoritních na 3 týdny i více.

5.3 Úprava surovin

Úprava surovin se v minulosti často prováděla, ale v současné době jsou do skláren dodávány převážně upravené suroviny. Úpravy surovin lze rozdělit na:

- sušení – rotační sušící bubny, fluidní sušárny atd.,
- prosívání – zajištění potřebné granulometrie pomocí soustavy sít,
- drcení a mletí - v případě dodávek kusových surovin (vápenec, dolomit aj.),
- magnetické třídění zaměřené na separaci především ocelových částic.

Sušící buben je kontinuální zařízení, které zajišťuje sušení surovin pomocí spalín, které jsou do něj přiváděny. Při sušení se buben otáčí kolem své osy a dochází tak k promísení surovin, které jsou na jednom konci do něj sypány a na druhém vysypány. Buben může být nakloněný směrem od vstupu surovin k výstupu, může mít zabudovány vestavby, které zvětšují styčný povrch sušené suroviny. Provedení je většinou protiproudé, tedy proti surovině proudí spaliny. Sušící buben se odvaluje po ocelových kruhových drahách. Přenos krouticího momentu je proveden přes hnané odvalovací kladky nebo přes článkový řetěz obepínající segmentové řetězové kolo přišroubované na plášti sušícího bubnu anebo přes ozubené kolo poháněné pastorkem. Tepelné ztráty jsou sníženy tepelnou izolací válcové části sušícího bubnu. Rotační část sušícího bubnu je uložena v podstavné konstrukci, na kterou jsou dále připevněny stacionární díly vstupu a výstupu materiálu.

Jako zástupce strojů používaných pro drcení surovin je možné uvést čelistový dvouvzpěrný drtič a pro mletí kolíkový dezintegrátor. Jak již bylo zmíněno, do skláren jsou dodávány již upravené suroviny a uvedené drcení a mletí se používá spíše výjimečně.

Magnetické třídění a separace ocelových částí a částíček se provádí v průběhu přípravy kmene a vsázky na několika místech, minimálně na konci kmenárenské linky. Používají se jak permanentní magnety, tak elektromagnety.

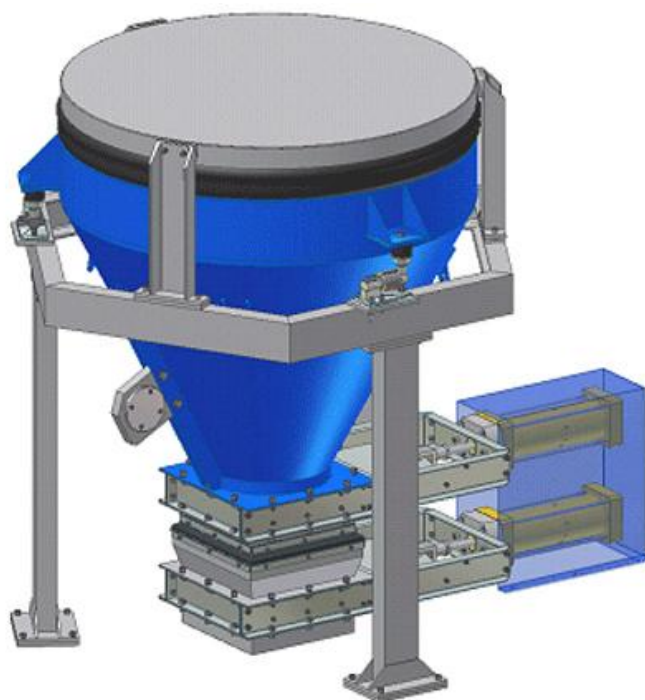
5.4 Vážení a dávkování surovin

Po úpravě surovin následuje jejich vážení a mísení. U nejmenších skláren s pánvovými pecemi se postupně navažování jednotlivých surovin provádí ručně do pohyblivého zásobníku (kontejneru). Dnes je však dávkování a vážení surovin ve většině kmenáren mechanizováno a automatizováno.

U moderních kmenáren je každý zásobník opatřen pod výpustí váhami, které umožňují programem stanovené navážení potřebné dávky. Dříve se používaly váhy mechanické, dnes

jsou téměř výhradně používány váhy tenzometrické⁵, kde vázní nádoba je umístěna většinou na třech tenzometrických snímačích. Pracují tak bez pohybu a oproti mechanickým váhám, jsou spolehlivější a levnější.

Příklad provedení váhy je na Obr. 5.1. V tomto případě je vážicí zásobník kuželového tvaru zavěšen na třech tenzometrických snímačích síly. Tenzometrické snímače jsou upevněny na ocelovém nosném rámu z válcovaných ocelových profilů. Na spodní straně vah je osazena výklopná pneumaticky ovládaná klapka. Váhy jsou vyrobeny z plechů a profilů z běžné konstrukční oceli.



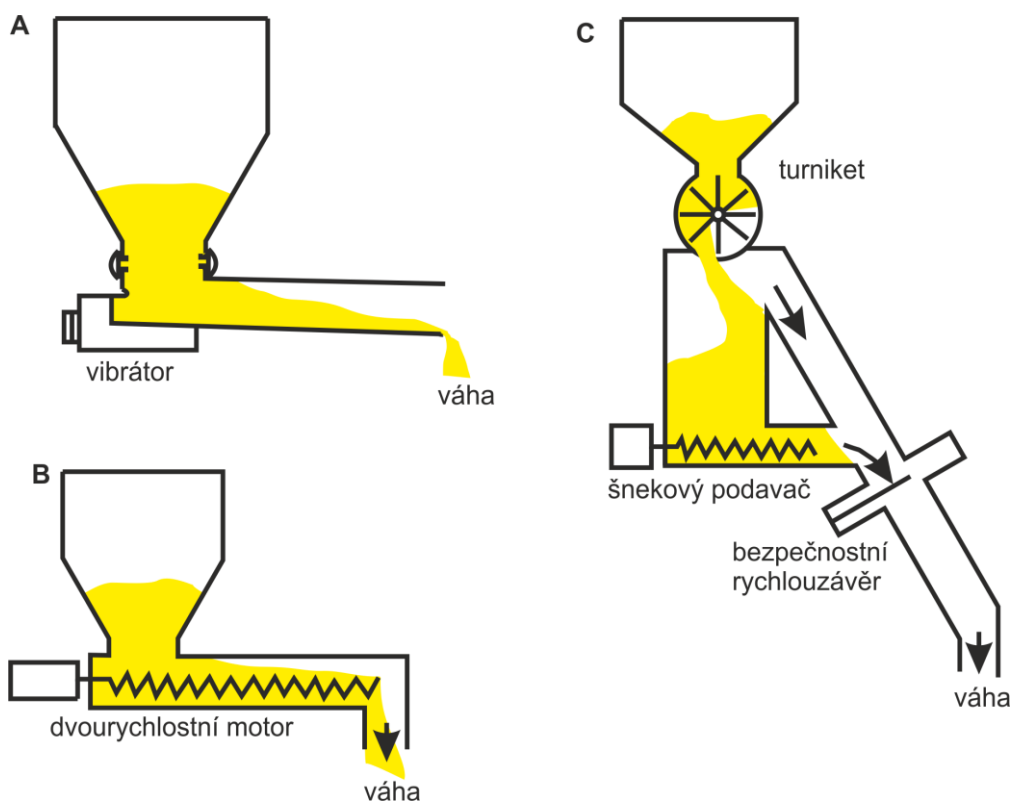
Obr. 5.1 3D model váhy na vápenec (zdroj: Dites spol. s r.o.)

Pro rychle a přesné navažování jsou ve výpusti zabudovány turniketové, vibrační nebo šnekové podavače s plynule měnitelnou rychlostí dávkování, Obr. 5.2. Dávkování surovin pak může být:

- jednorychlostní, toho se používá především u minoritních surovin,
- dvourychlostní, uplatňované u velkoobjemových surovin; vysokou rychlostí dávkuje větší část navážky (90-95 %) a zhruba desetinovou rychlostí zbytek až do přesného vyvážení ($\pm 0,1 \%$ až $\pm 0,5 \%$).

Pohled na skutečnou část kmenárny je na Obr. 5.3.

⁵ Tenzometrické váhy jsou založeny na deformaci způsobené tíhou váženého objektu. Deformace se většinou měří pomocí piezoelektrického jevu, což je schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformování (nejznámější piezoelektrickou látkou je monokrystalický křemen). Nezanedbatelnou výhodou tenzometrických vah je okolnost, že mohou být propojeny s počítačem, který zajišťuje registraci a další zpracování naměřených hodnot.



Obr. 5.2 Podavače surovin od síla do váhy: A – jednorychlostní vibrační podavač, B – dvourychlostní šnekový podavač, C – dvourychlostní kombinovaný podavač s turniketem pro rychlé podávání a šnekem pro přesné navážení



Obr. 5.3 Pohled na skutečnou část strojního vybavení kmenárny, spodní část zásobníků, dávkovače surovin, váha, kontejner (zdroj: Dites spol. s r.o.)

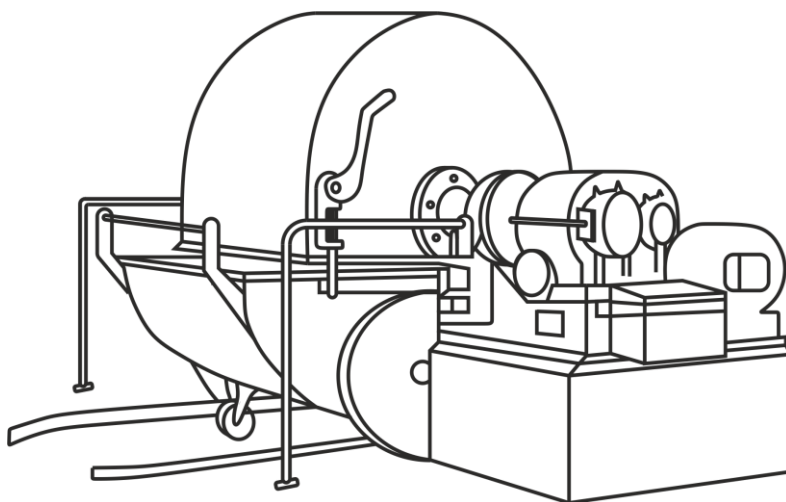
5.5 Mísení kmene

Po navážení a dávkování následuje mísení kmene. Cílem je dokonalé promísení surovin sklářského kmene a úprava jeho vlhkosti. Provedení mísiče může být podle konstrukce:

- šnekové,
- gravitační,
- talířové.

Šnekové mísiče používají jako homogenizačního nástroje šnek nebo stejně uspořádané lopatky. Tento typ mísičů se již nepoužívá, protože je energeticky náročný a nedává dobrou homogenitu kmene.

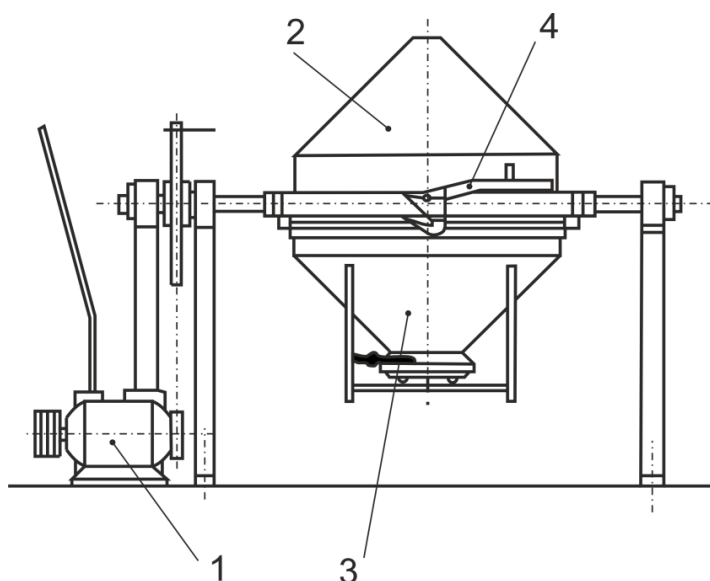
Gravitační mísiče fungují na podobném principu jako betonářské míchačky. Jedná se nejčastěji o nádoby, které se otáčejí kolem vodorovné osy, vložené přepážky pomáhají promísení kmene. Historickým modelem jsou dnes mísiče Saxonie (Obr. 5.4), které se skládají z pojezdného zásobníku (kontejneru), do kterého se navažuje kmen, krytu kolébky a pohonu mísiče. Doba mísení se uvádí 5 minut. Dnes jsou častým mísičem v malých a středních sklárnách tzv. kontejnerové mísiče (Obr. 5.5). Je opět využíváno kontejneru, do kterého jsou naváženy suroviny. Kontejner je kuželového tvaru, směrem dolů se zužuje a slouží také k dopravě a skladování kmene. Příklad kontejneru je zobrazen na Obr. 5.5. Kontejner se zaveze do mísiče, zaklopí a pákou uzavře a spolu s uzávěrem rotuje kolem vodorovné osy po dobu 15 minut.



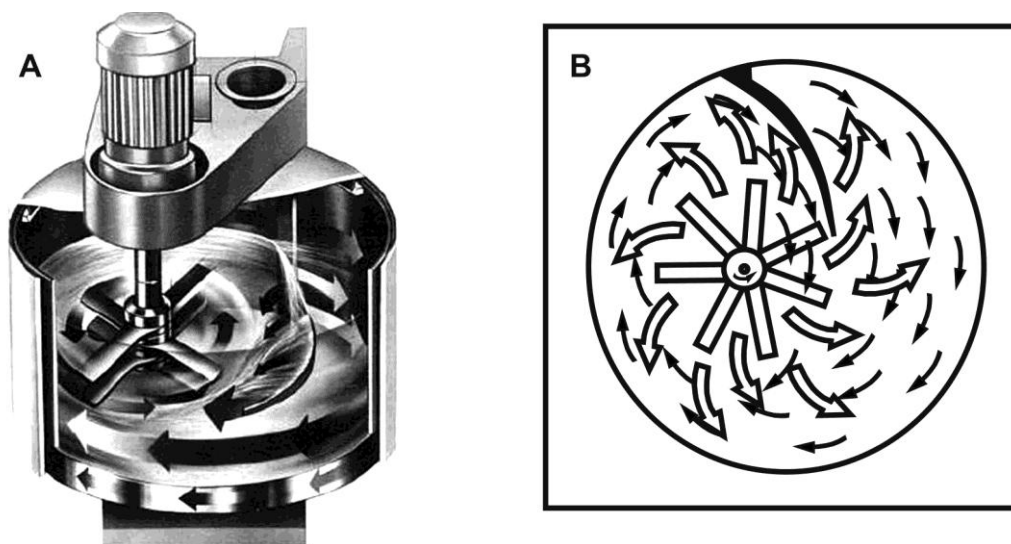
Obr. 5.4 Schéma historického mísiče Saxonie

Nejčastěji se používají talířové mísiče (Obr. 5.6). Mísič se vyznačuje horizontálně uloženým talířem a mísicími nástroji, kterými jsou hvězda a víříč. Talíř se otáčí ve směru hodinových ručiček a víříč opačně. Mísicích nástrojů může být více a mohou se otáčet různou rychlostí a na různých poloměrech. Díky vhodně volenému poměru rychlostí talíře a mísicího nástroje je dosaženo rychlé homogenizace. Jako statický prvek působí pevně umístěná stěrka, která za chodu čistí stěny a dno talíře a usměřňuje materiál do oblasti víříče. Mísení nemá mrtvé kouty a je rychlé. Mísič se plní shora a vyprazdňuje výpustí ve

středu dna, přičemž obě tyto operace probíhají za chodu mísiče. Talířové mísiče se vyrábějí o užitečném obsahu 500 až 3 000 litrů s výkonem 7,5 až 45 t/hod. Naplnění a vypuštění mísiče trvá asi 1 minutu a doba mísení se volí 2 až 3 minuty, podle požadavku na homogenitu a kvalitu kmene. Pro bezprašný provoz je mísič vybaven expanzní trubicou.



Obr. 5.5 Schéma kontejnerového mísiče: 1 – elektromotor, 2- víko mísiče, 3 – kontejner, 4 – páka pro uzavření mísiče



Obr. 5.6 Schéma talířového mísiče: A – 3D zobrazení, B – naznačení funkce mísiče (pohyb kmene uvnitř mísiče)

Při mísení kmene je často kmen vlhčen na vlhkost 2 až 4 %. Vlhčí se vodou nebo párou.

5.6 Střepové hospodářství, recyklace

Využití střepů je ekonomickou nutností při většině výrob. Většinou se jedná o využití střepů vlastních, kap. 4.11. Zdroji této suroviny jsou:

- technologický odpad,
- vadné výrobky,
- střepy získané sběrem.

První dva zdroje střepů jsou označovány jako vlastní střepy. Vznikají většinou přímo ve sklárně nebo u zpracovatelů. Pro většinu technologií jsou použitelné pouze střepy vlastní a využívají je prakticky všechny sklárny s jakýmkoliv výrobním sortimentem. U vlastních střepů se vždy jedná o materiál, který byl již jednou utaven, ale nebyl prodán ve formě výrobku a je tedy ztrátou. Pokud by se však tento materiál nevyužil, ztráta by byla logicky větší. U obalového skla se používá 10 až 20 % vlastních střepů, které odpovídají ztrátám. V užitkovém skle při ruční výrobě je uváděno 40 až 50 % vlastních střepů z celkového objemu. Při automatické výrobě užitkového skla vzniká až 60 % vlastních střepů (foukané výrobky s kopnou).

Střepy získané sběrem jsou označovány jako cizí střepy a nelze je použít pro všechny typy sklářských výrobků. Cizí střepy se využívají při výrobě obalového skla, vláken a dalších typů výrobků, kde nevadí mírné změny ve složení střepů. V případě cizích střepů lze mluvit jednoznačně o úsporách při tavení. Využití cizích střepů (získaných sběrem nebo zakoupených) je uplatněno především při výrobě obalového skla. Podíl střepů pak může činit 70 % ve vsázce a v případě zeleného obalového skla nad 80 %, krátkodobě i 100 %.

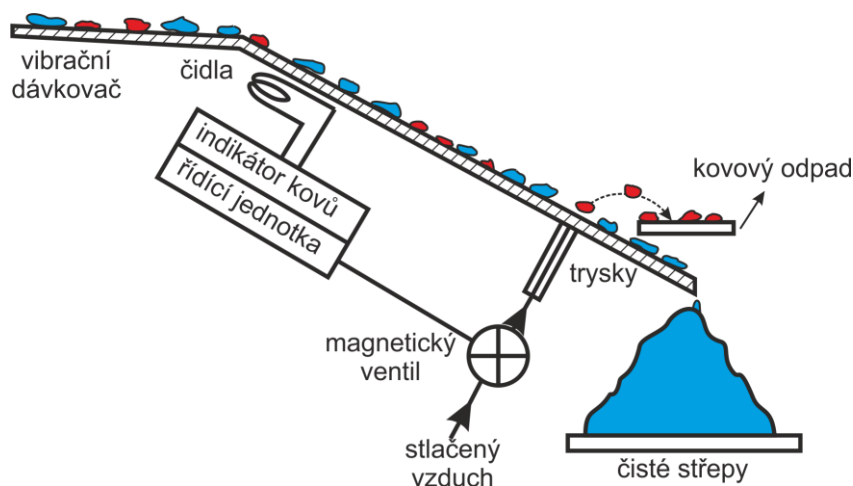
Součástí moderních linek je systém pro získání a transport technologického odpadu. Tyto střepy jsou nejdříve ochlazovány (pokud je to třeba) a většinou pod výrobní linkou transportovány pásovými dopravníky do kmenárny, kde mohou být ještě drceny (například kladivovým drtičem), prosívány na danou velikost a jsou z nich separovány nečistoty. Přísně je třeba sledovat oddělení, zpracování a skladování střepů při výrobě skla barveného ve hmotě.

Při drcení skla se uplatňují především tzv. kladivové drtiče, které drtí selektivně pouze křehký materiál. Rychle rotující kladiva v drtiči metají střepy na nárazové desky, kde se drtí. Kladiva a nárazové desky jsou většinou z tvrdé nitridované oceli.

Pro síťování jsou používána jednosítová nebo dvousítová zařízení, která odstraňují vždy hrubý podíl nad 25 mm a někdy i jemný podíl pod zhruba 5 mm, protože v těchto frakcích se koncentrují nečistoty. Síta jsou otřasná a mají plochu 2 až 3 m². Při síťování se aplikuje i odsávání, které zbavuje střepy prachu a v případě recyklovaného skla také papíru, uvolněných hliníkových fólií a dalších nečistot.

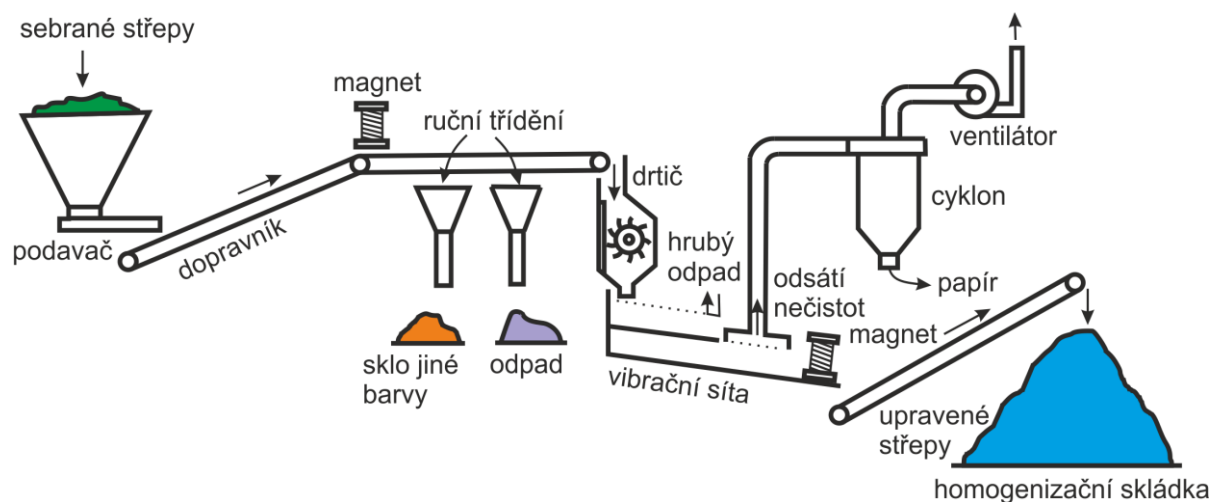
Velmi často je prováděna magnetická i nemagnetická separace s cílem odstranit nečistoty, které by mohly být při tavení zdrojem vad. Tyto operace se provádí především u cizích střepů, ale lze se s nimi setkat i u vlastních střepů (především s magnetickou separací). Pro magnetickou separaci se používají permanentní magnety a elektromagnety. Účinnost separátorů je dána tloušťkou vrstvy střepů. Separace se provádí dvakrát tak, aby se střepy promíchaly, magnetické části uvolnily a dostaly k povrchu. Pro separaci

nemagnetických složek, jako je hliník, olovo, keramika a další, se používá indukčních detektorů kovů, detektorů na principu vířivých proudů, optických senzorů a obecně kamer. Příklad použití indikátoru kovů je na Obr. 5.7. Střepy přicházejí vibračním dávkovačem na široký šikmý pás rozdělený do pruhů, kde elektromagnetický indikátor kovů detekuje kovové části. Signál z indikátorů je vyhodnocen počítačem, který s daným zpožděním ovládá elektromagnetickou trysku. Účinnost tohoto separátoru je uváděna na úrovni 90 %.



Obr. 5.7 Schéma separátoru neželezných kovů

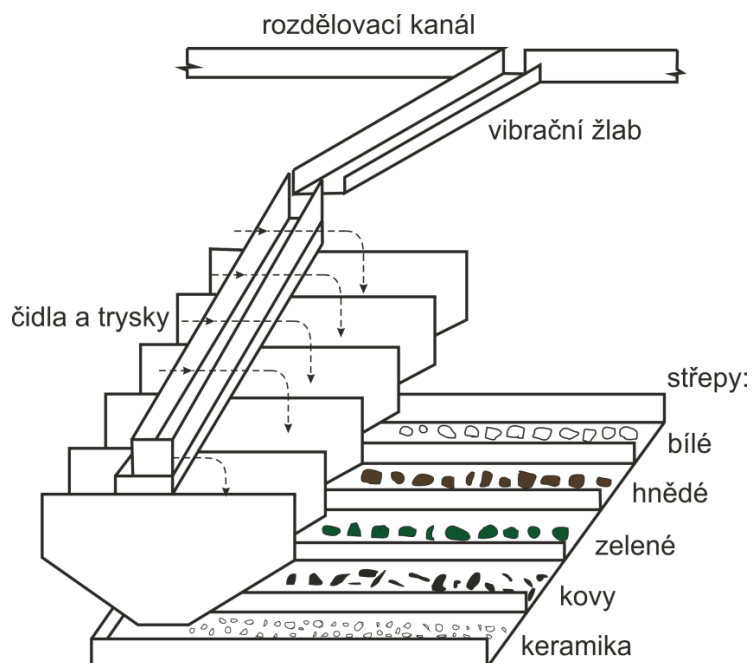
Uspořádání linek na úpravu cizích střepů je velmi často podobné. Příklad je uveden na Obr. 5.8. Linka začíná násypkou, ze které jsou střepy vibračním podavačem dávkovány na dopravní pás, přitom jsou střepy vlhčeny k zamezení prášení. Následuje první magnetická separace, ruční třídění, drcení, síťování a odsávání, druhá magnetická separace a konečně upravené střepy.



Obr. 5.8 Schéma standardní linky na úpravu střepů

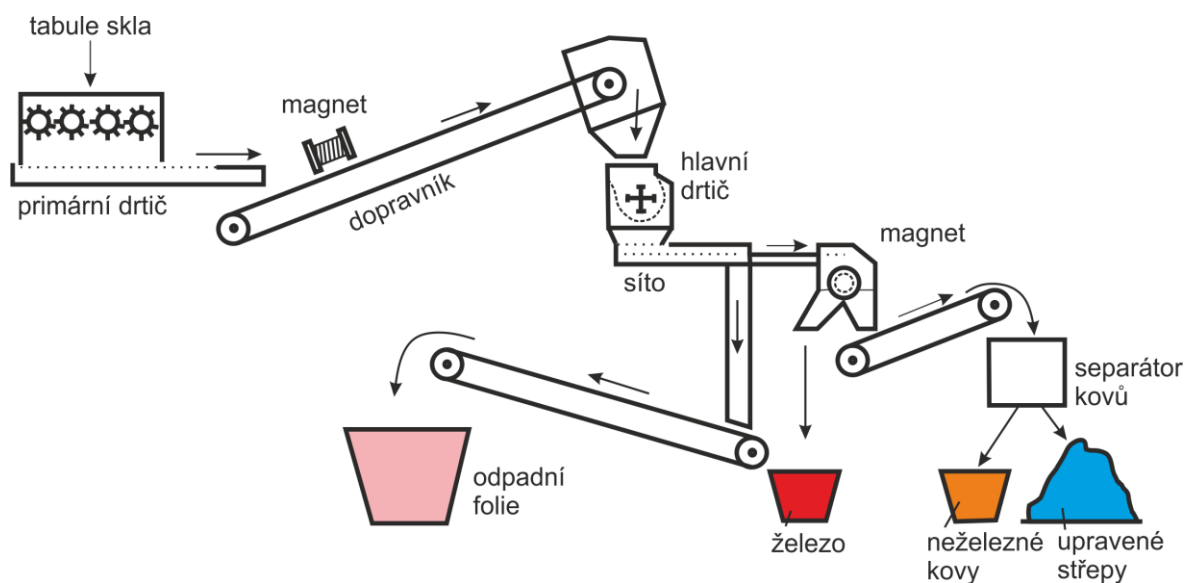
Existují také automatické systémy pro třídění střepů. Příklad optoelektrické třídící linky je na Obr. 5.9. Střepy upravené standardním způsobem a rozdrcené na velikost 8 až 40 mm jsou rozděleny do několika desítek třídících kanálů. Každý kanál obsahuje několik indukčních

a optických čidel, která dávají impuls k odfouknutí nečistot. Linky umožňují třídít i podle barvy. Účinnost separace kovů a keramiky je uváděna nejméně 99,5 % a účinnost barevného třídění se udává na úrovni 99,7 %.



Obr. 5.9 Schéma automatické třídící linky na střepey

Pro zpracování vrstveného skla a drátoskla se používá například linka na Obr. 5.10. Tabule skla se drtí nejprve v primárním drtiči, který je tvořen několika páry lámacích válců opatřených trny s nezávislým pohonem. Drť po magnetické separaci přichází do hlavního drtiče, což je kladivový drtič, který oddělí fólii nebo drát od skla. Fólie či drát se od skla oddělí na vibračním sítu. Následuje druhý magnetický separátor a podle potřeby i odlučovač neželezných kovů. Fólie i drát jsou také následně recyklovány.



Obr. 5.10 Schéma linky na zpracování střepek vrstveného skla a drátoskla

Střepy se většinou přidávají až na konci přípravy vsázky, často přímo na pás, který odváží vsázku k zakladačům nebo na konci mísení. Důvodem je především vysoce abrazivní účinek střepů na zařízení kmenáren. Běžně vyráběná skla mají tvrdost v rozsahu 5 až 7 stupňů Mohsovy stupnice tvrdosti a jejich tvrdost je srovnatelná s kalenou ocelí (kap. 3.6.4). Tyto vlastnosti střepů způsobují rychlé opotřebení dílů, které s nimi přicházejí do styku. Také se zvyšuje podíl kovů, které se uvolnily vlivem odírání střepů.

5.7 Úprava kmene

V současné době se lze setkat s některými způsoby dodatečné úpravy sklářského kmene. Rozdělit je můžeme do dvou skupin. Jsou to jednak metody aglomerace, jednak předehtřívání.

Aglomerace sklářského kmene představuje postup, kdy se z práškovité směsi vytvoří aglomeráty typu granulí, tablet, či briket. Význam těchto postupů představuje snížení prašnosti a rizika odmísení při přepravě i na větší vzdálenosti, dále energetické úspory při vlastním tavení, neboť se předpokládá intenzivnější průběh reakcí a pochodů probíhajících v tavicí peci.

Předehtřívání představuje další variantu zužitkování tepla odcházejících spalin. Podle používaných způsobů je možno provést následující klasifikaci předehtřívacích systémů:

- podle charakteru kontaktu mezi spalinami a vsázkou:
 - přímý kontakt,
 - vsázka a spaliny jsou navzájem odděleny,
- podle předehtřívání materiálu (příklad je na Obr. 5.11):
 - předehtřívání vsázky,
 - předehtřívání kmene nebo střepů.

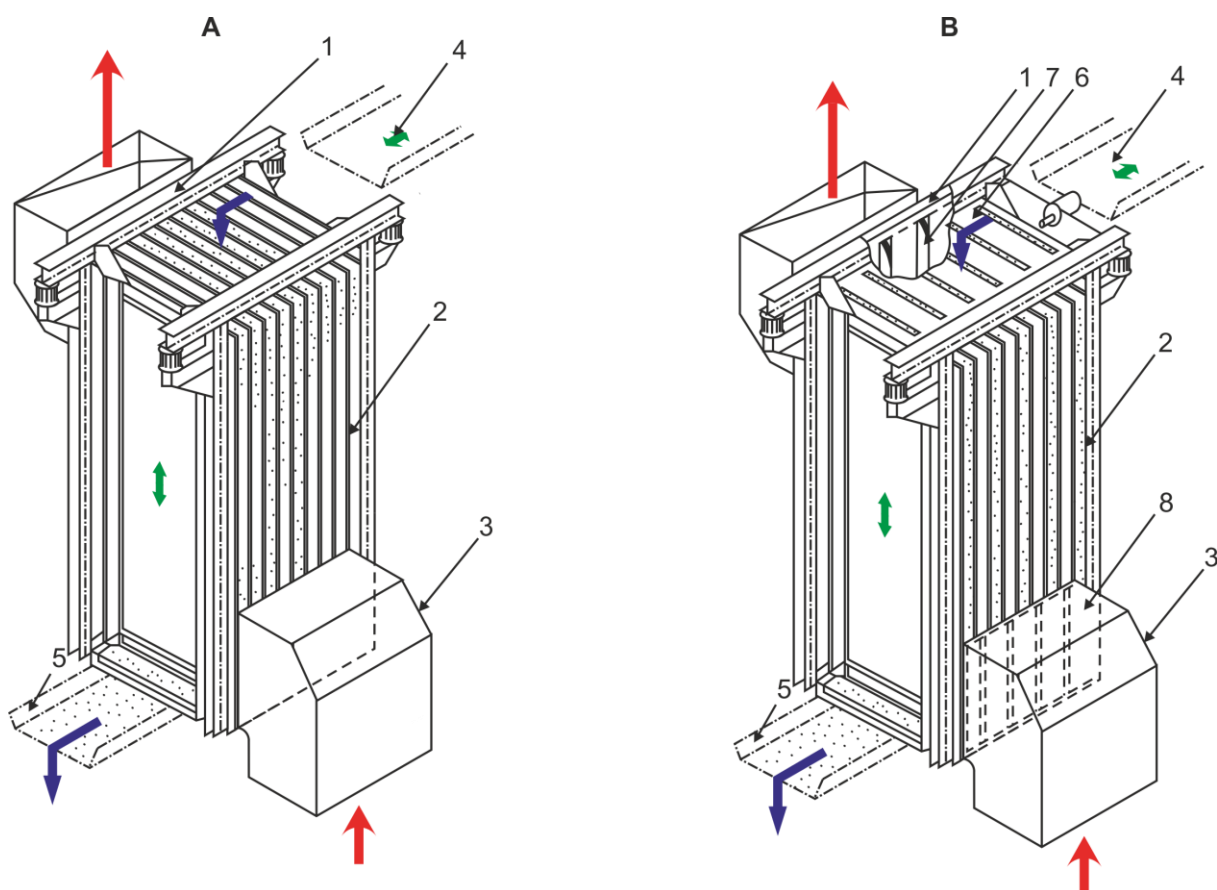
5.8 Kmenárny

Vlastní příprava kmene probíhá obvykle v oddělených objektech – v kmenárnách. Technologie, stroje a zařízení kmenáren musí splňovat:

- kvantitativní hledisko, tedy musí produkovat potřebné množství kmene s přiměřenou rezervou,
- kvalitativní hledisko, tedy produkovat kmen požadovaného složení s co nejvyšší homogenitou,
- ekonomické hledisko, tedy připravovat kmen při minimalizaci nákladů na jeho výrobu: minimalizace investičních nákladů (cena všech zařízení a budov) a provozních nákladů (např. obsluha kmenárny),
- ekologické a hygienické hledisko, tedy minimalizace prašnosti, odpadů a dalších vlivů na pracovní a životní prostředí.

Kmenárny se liší svoji velikostí a složitostí především s ohledem na počet připravovaných receptur (složení kmene), na objem připravovaného kmene, na vlastnosti používaných surovin a na místní podmínky. Snahou je minimalizovat manipulaci se surovinami a hotovým kmenem. V případě přípravy velkých objemů kmene jsou voleny

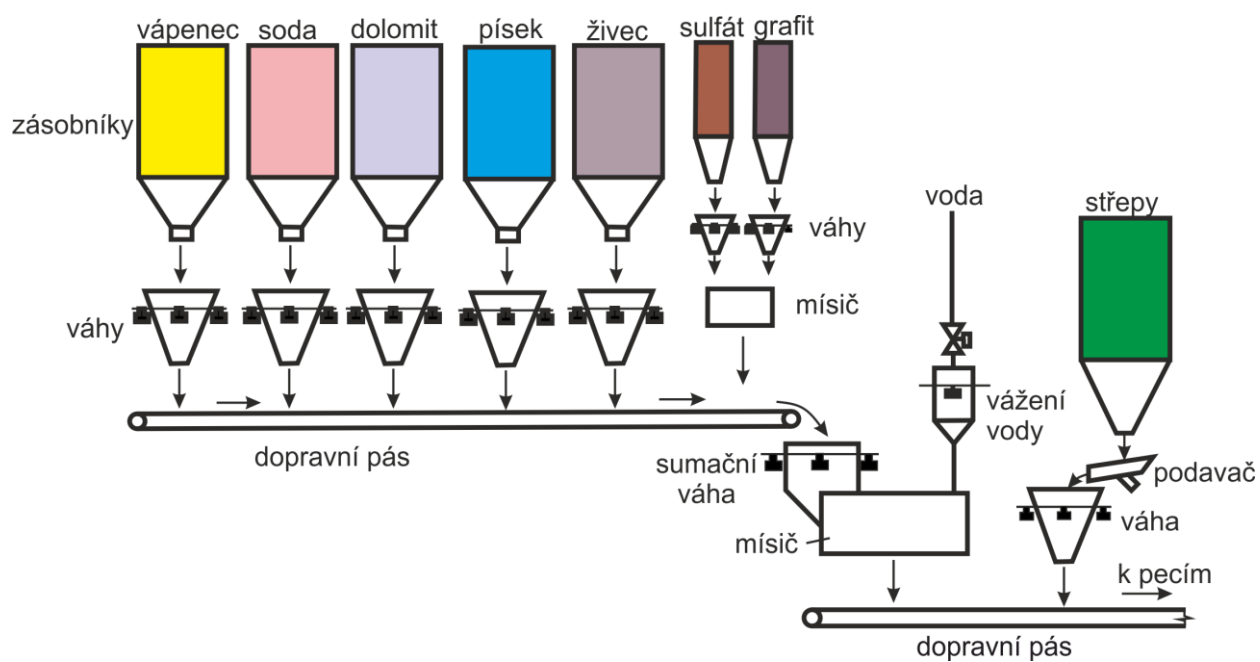
kmenárny věžové s uspořádáním *do řady*, Obr. 5.12. *Jednotlivé suroviny jsou nejdříve navažovány na pás, minoritní složky se mísí jako předsměs. Sumační váha je umístěna před mísičem a střepy jsou přidávány až na pás vedoucí k pecím. 3D model kmenárny je uveden na Obr. 5.13.*



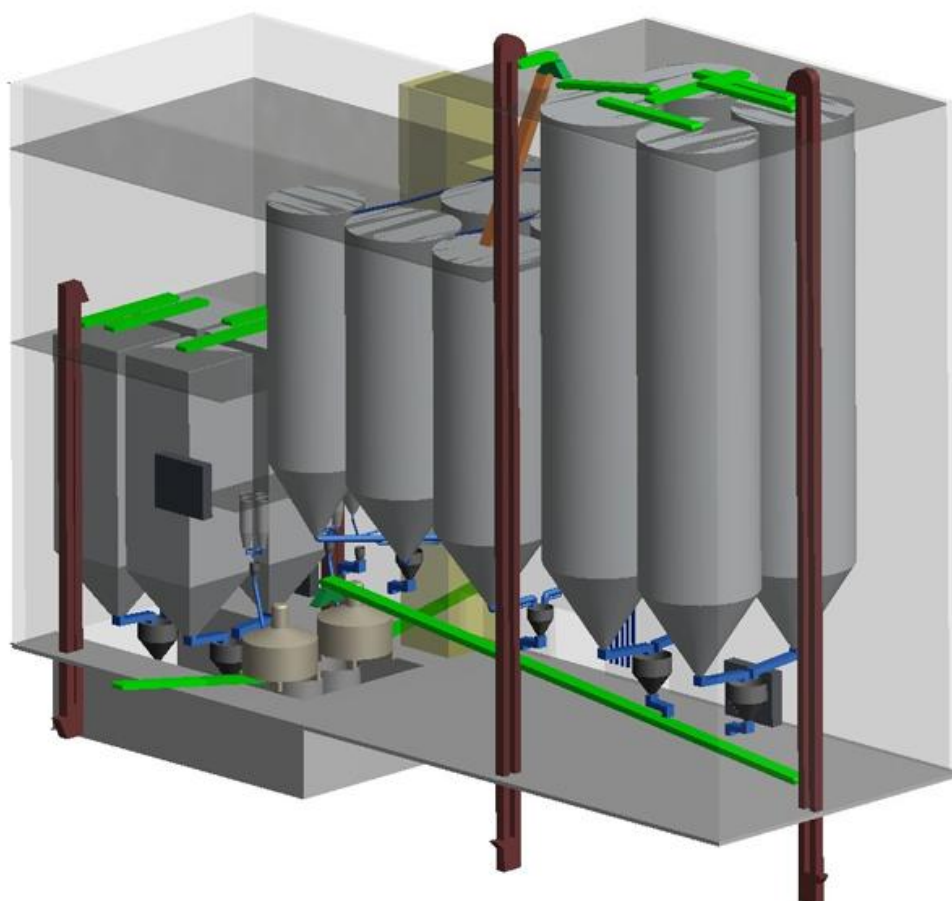
Obr. 5.11 Lamelový předehříváč: A – střepů s přímým stykem spalin se střepy, B – kmene s ohřevem přes stěnu, 1 – rám předehříváče, 2 – lamely, mezi kterými propadá ohříváný materiál (prostor je z vnějšku uzavřen plechem), 3 – přívod spalin, 4 – přívod předehříváného materiálu, 5 – výstup předehřátého materiálu, 6 – oddělovací plech pro přívod kmene mezi vybrané lamely, 7, 8 – oddělení lamel pro odvod resp. přívod spalin

Střední a malé sklárny mají většinou širší sortiment receptur. Často jsou voleny centrální kmenárny pro více pecí, kde kmen je přepravován v kontejnerech po aglomeraci tak, aby nedocházelo k odmísení. Přípravu kmene do kontejneru lze rozdělit na

- jednokontejnerový způsob,
- vícekontejnerový způsob.



Obr. 5.12 Schéma řadové kmenárny s jednokomponentními váhami

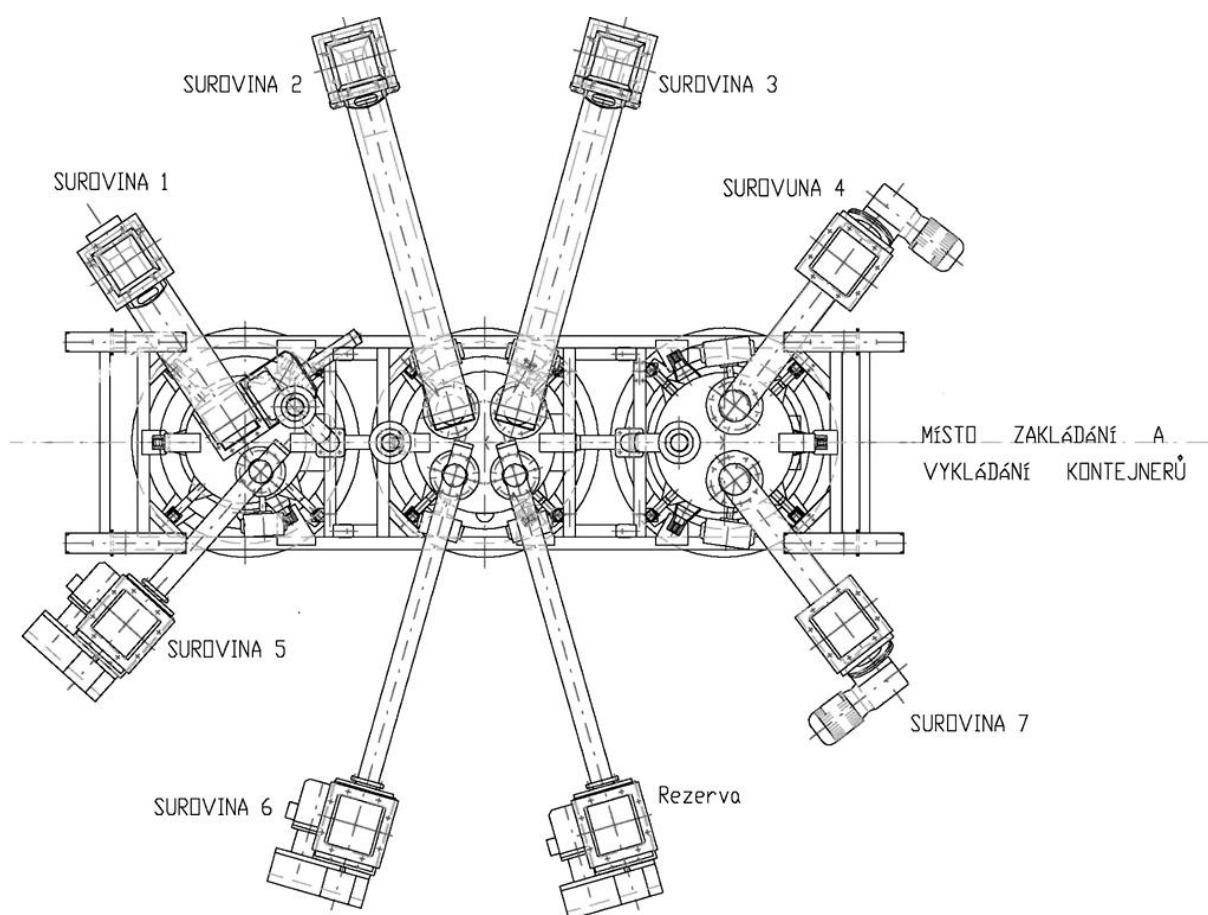


Obr. 5.13 3D model kmenárny (zdroj: Dites spol. s r.o.)

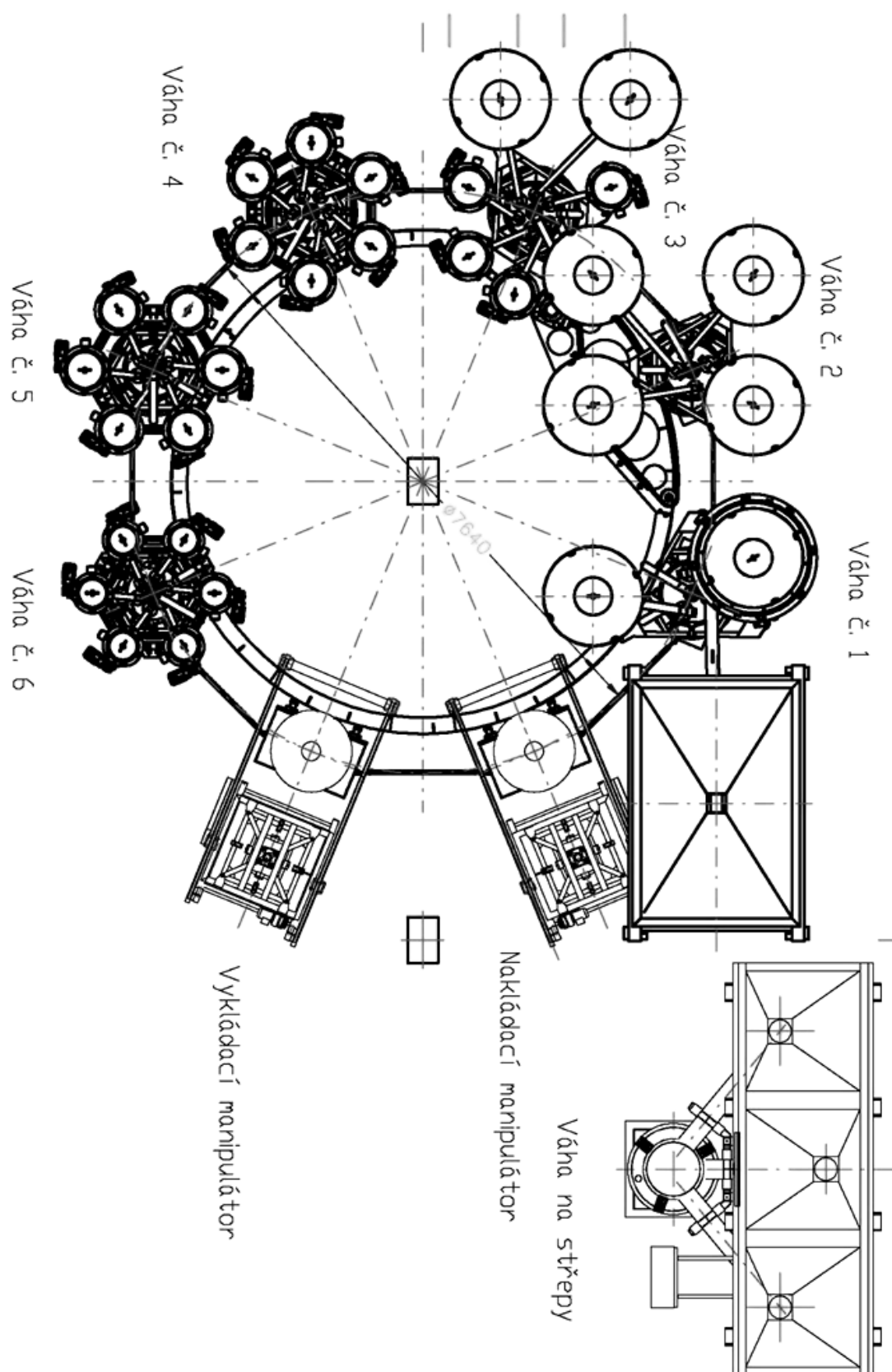
Výkresové sestavy půdorysu provedení těchto kmenáren jsou uvedeny na Obr. 5.14 a na Obr. 5.15. V případě jednokontejnerového způsobu jsou do jednoho kontejneru postupně navažovány suroviny na více pozicích (také Obr. 5.3). V případě vícekontejnerového způsobu může být navažováno více kontejnerů najednou. Tento způsob je určen pro větší objemy a širokou škálu receptur kmene. V obou případech je manipulace s kontejnerem při vážení a dávkování mechanizována, založení kontejneru do první pozice a následná manipulace je často prováděna obsluhou paletizačním vozíkem nebo vysokozdvihem.

U nejmenších sklárén je v současné době trend nákupu již hotového kmene nebo vsázky ve formě pelet, briket apod. Vlastní kmenárny pro malé objemy nejsou ekonomické.

Vývojové trendy v oblasti kmenáren jsou vcelku jednoznačné. Jedná se o plnou automatizaci přípravy kmene, kmenárny jsou stále větší, přesnější, univerzálnější a výkonnější. Přes všechny pokrok se bude nejspíš i nadále používat (zde popsán) přetržitá příprava kmene.



Obr. 5.14 Jednokontejnerový způsob přípravy kmene (zdroj: Dites spol. s r.o.)



Obr. 5.15 Vícekontejnerový způsob přípravy kmene (zdroj: Dites spol. s r.o.)

6 Zakládání vsázky

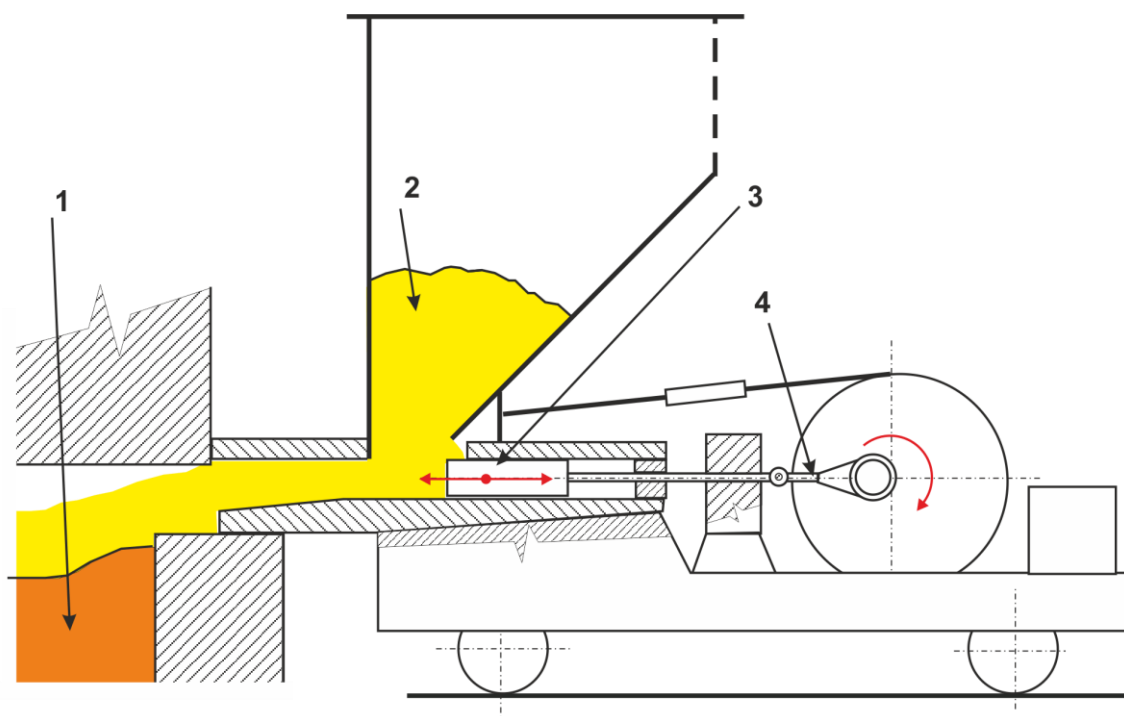
Zakládání sklářské vsázky do tavicích agregátů prodělalo, stejně jako další operace, dlouhodobý vývoj. Od ručního zakládání do pánvových tavicích pecí byly u kontinuálních STA (sklářských tavicích agregátů) zavedeny mechanické resp. automatické principy strojního zakládání, tzv. zakladače. Zakladače jsou strojním vybavením STA, které slouží k založení vsázky dopravené z kmenárny.

Způsoby zakládání sklářské vsázky jsou odlišné podle typu tavicích pecí. Pro pánvové pece se používají mechanické lžíce, pro kontinuální STA se zakládání liší podle způsobu vytápění pecí (kap. 7.4).

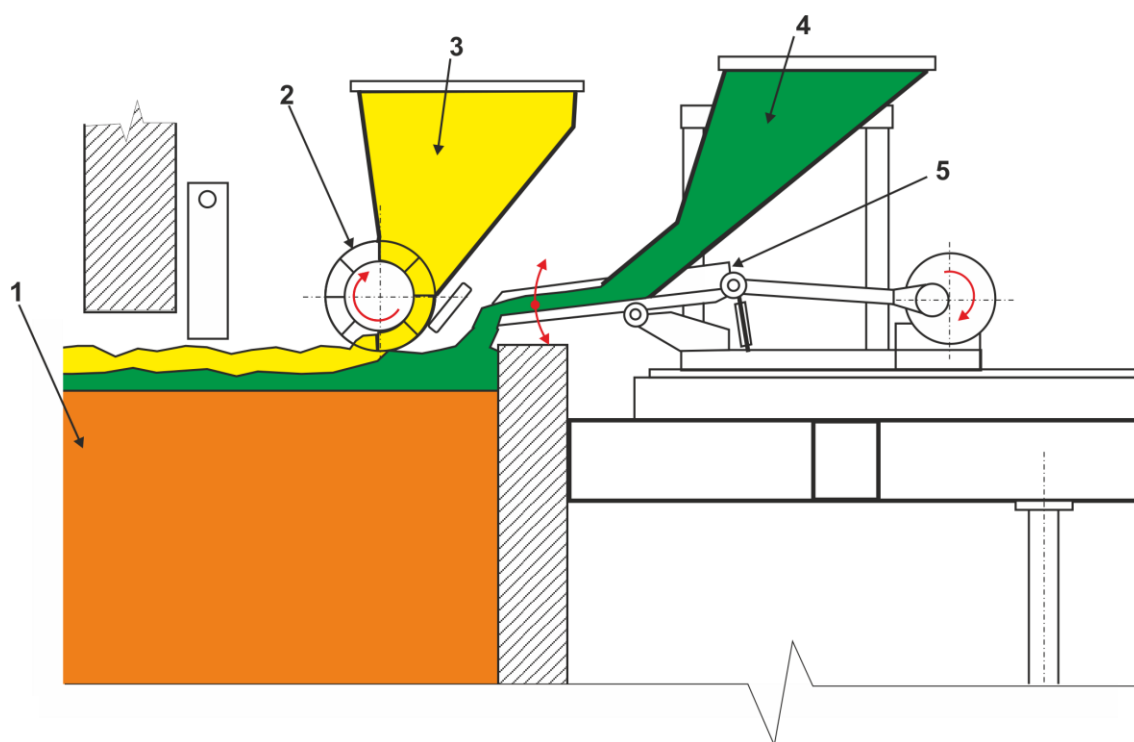
Pro pece plamenné se používají nejčastěji **zakladače zakládající vsázku v celé šířce** tavicí části:

- pístové systémy, příklad pístového zakladače je na Obr. 6.1,
- systémy s vibračním skluzem se stavitelným úhlem skluzu,
- zvláštním případem konstrukce je zakladač válcový (Obr. 6.2), který zakládá ve dvou vrstvách odděleně sklářský kmen a střepy.

Lze se také setkat se systémy zakládání ve velkých dávkách a početnějších malých dávkách.



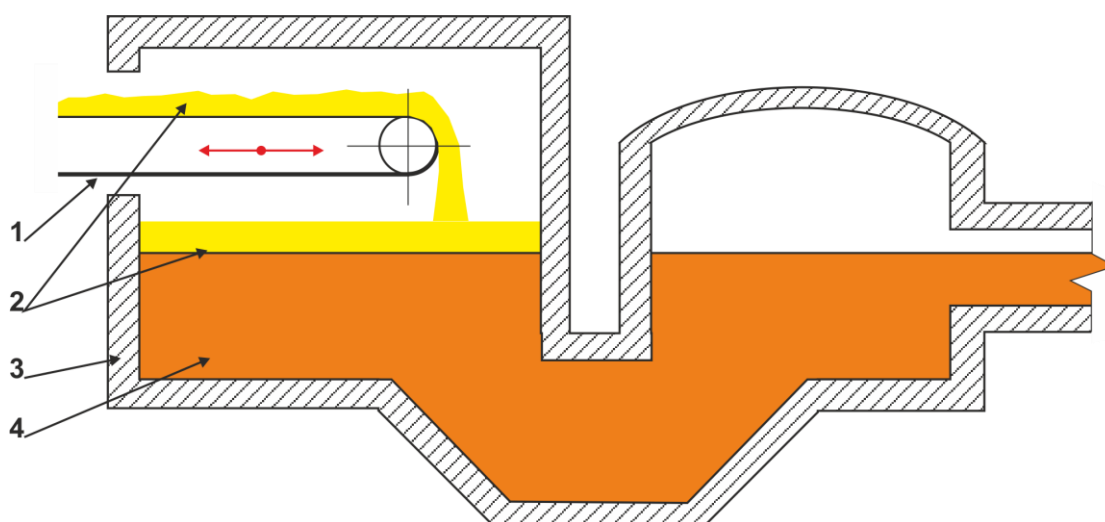
Obr. 6.1 Pístový zakladač: 1 – roztavená sklovina, 2 – vsázka, 3 – píst s vyznačením pohybu, 4 – mechanismus pohybu pístu



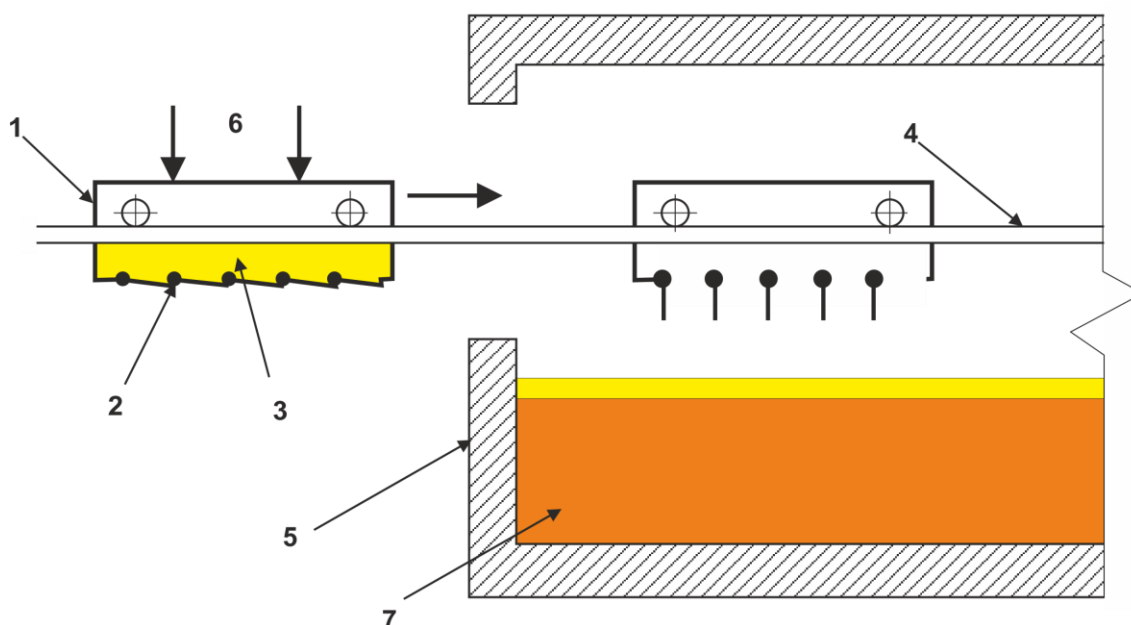
Obr. 6.2 Válcový zakladač: 1 – roztavená sklovina, 2 – podávací válec, 3 – kmen, 4 – střepy, 5 – stršasací mechanismus

Pro pece s celoelektrickým tavením, kde topné elementy jsou umístěny pod hladinou roztavené skloviny, jsou využívány **zakladače, které pokrývají rovnoměrně hladinu roztavené skloviny**:

- zakladače pásové (Obr. 6.3),
- zakladače žaluziové používané pro menší pece (Obr. 6.4).



Obr. 6.3 Pásový zakladač: 1 – pás, 2 – vsázka, 3 – vana, 4 – roztavená sklovina



Obr. 6.4 Žaluziový zakladač: 1 – vozík, 2 – žaluzie, 3 – vsázka, 4 – kolejnice, 5 – vana, 6 – vsázka nakládaná na vozík, 7 – roztavená sklovina

Zakladače odpovídají požadavkům zajištění potřebného výkonu, řízení zakládky a požadovanému objemu utavené skloviny na pracovním konci vany. Dimenzování zakladače vychází jednak z požadavků na množství utavené skloviny, ale i ze „ztrát“, ke kterým dochází během tavení. Jedná se o „ztráty“ způsobené chemickými reakcemi během tavení, které jsou okolo 20 % při tavení pouze z kmene. Další ztráty mohou být způsobenytékáním některých složek při vysoké teplotě a mechanickým úletem jemných prachových podílů některých surovin tvořících vsázku v důsledku proudění pecní atmosféry.

Příkladem špičkového zakladače pro velké objemy vsázky (např. pro výrobu plochého skla plavením) je zakladač firmy Zimmermann-Jansen GmbH. Tento zakladač zabezpečuje plynulé zakládání sklářské vsázky prostřednictvím dvou zakládacích stolů shora prakticky po celé šířce tavicí části vanové pece. Zásobování zakladače vsázkou je realizováno pomocí transportních pásových dopravníků, které vsázku přivádějí z kmenárny. Výkon zakladače je řízen počítačem podle okamžitého odběru utavené skloviny, v případě potřeby může být zakladač ovládán ručně. Vzhledem k vysokým teplotám, které panují v oblasti zakládání, jsou některé konstrukční prvky zakladače intenzivně ochlazovány. Hlavní části zakladače jsou následující:

- rám, jehož konstrukce nese zásobníky vsázky, zakládací stoly, pohony a další obslužné prvky,
- pojezdy, které umožňují ustavení zakladače do správné pozice,
- zásobník vsázky rozdělený do 8 sekcí,
- klapky, pomocí kterých je nastavována tloušťka vrstvy zakládané vsázky,
- dva zakládací stoly vyrobené ze žárovzdorného materiálu, jejichž přední část je chráněna navařeným tepelným štítem, který je za provozu intenzivně ochlazován. Nastavení sklonu stolů se provádí podpěrnými pákami a kyvnými podpěrami,

- vzduchové ochlazování, které tvoří dva radiální ventilátory a rozvod chladicího vzduchu,
- pohon, který je zabezpečován dvěma elektromotory, které jsou se stoly spojeny klikou s táhlem.



Obr. 6.5 Zakladač pro velké objemy vsázky (zdroj: Zimmermann-Jansen GmbH)

Základní technické údaje výše popsaného zakladače jsou následující:

- | | |
|-------------------------------|--|
| • max.výkon | 620 t/24hod |
| • objemová kapacita zásobníků | 13,5 m ³ |
| • výška zásobníků | 1650 mm |
| • šířka zakladače | 12000 mm |
| • počet stolů | 2 ks |
| • počet pohonů | 2 ks |
| • šířka stolů | 5675 mm |
| • mezera mezi stoly | 150 mm |
| • počet zdvihů | od 0,456 min ⁻¹ do 4,56 min ⁻¹ |
| • délka zdvihu | nastavitelná 175 mm, 210 mm, 250 mm |

7 Tavení skla

Tavení skla je prováděno ve sklářských tavicích pecích, odborně řečeno ve sklářských tavicích agregátech (STA). STA zahrnují celou škálu zařízení pro tavení skloviny a jsou chemickými reaktory, v jejichž prostoru dochází jak ke zvyšování teploty, tak i k chemickým reakcím, bez kterých by nevznikla sklovina.

Na úvod je vhodné zmínit historický vývoj STA, který vysvětluje současnou složitost těchto zařízení a jejich výrobní kapacity.

7.1 Vývoj STA v historickém kontextu

Sklářské pece byly zpočátku velmi jednoduchým zařízením pro tavení skla, ale s vcelku složitou technologií výroby. Ta zahrnovala několikafázový postup přípravy nízkotavitelné skloviny a vcelku komplikovaný způsob jejího nanášení na hliněná jádra. Sklářské pece se postupem času stávaly vcelku komplikovaným a drahým zařízením. Pece měly spojenou tavicí a chladicí část. Před průmyslovou revolucí je možné se již setkat s vylepšenou tavicí pecí na dřevo, která byla nazývána česká pec. Díky vylepšenému systému spalování dřeva bylo možné dosahovat teplot 1 300 až 1 400 °C, oproti starším pecím, které umožňovaly dosáhnout teplot 1 100 až 1 320 °C. V české peci pak již nebylo nutné provádět vícefázové tavení. Přesto tavba v té době trvala běžně 24 až 26 hodin, dílo sklářů do vypracování všech pánví dále zabralo obvykle kolem 12 hodin, ale s přestávkami až 18 hodin. Je uváděno, že typ české sklářské pece se stal základním a technicky nejdokonalějším typem pece na přímý otop dřevem ve střední Evropě v průběhu 17. až 19. století.

Nové podmínky umožněné průmyslovou revolucí⁶ ve druhé polovině 19. století, tedy přechod na otop uhlím, nová dopravní síť, těžba a výroba kvalitnějších a lacinějších surovin včetně žárovzdorných materiálů atd. se ve spojení s konjunkturou v sedmdesátých letech 19. století projevil oživením sklářského průmyslu a novou vlnou zakládání sklářských hutí.

Otop sklářských pecí dřevem byl nejprve nahrazován uhlím. Hlavním důvodem bylo omezení a zákazy těžby dřeva. Přímý otop uhlím nebyl zpočátku příliš efektivní, produkoval sklo nízké kvality a životnost pecí byla krátká. Postupem času byly pece na otop černým a hnědým uhlím zdokonalovány. Vedle hnědého a černého uhlí se jako palivo dále používalo dřevo, rašelina a lignit. Nicméně, provozní podmínky se značně zlepšily až zavedením tzv. poloplynového topení, které bylo přechodem k vývoji generátorů pro zplynování tuhých paliv.

U všech výše uvedených zdrojů tepla byly spaliny odváděny bez dalšího zužitkování tepla, které obsahují. Zásadní obrát v konstrukci pecí znamenal vynález využívající tepla

⁶ Průmyslovou revolucí je označováno období od konce 18. do konce 19. století, kdy se zásadně proměnilo zemědělství, výroba, těžba, doprava a další hospodářské sektory. Počátek průmyslové revoluce je úzce spjat s přechodem od manufakturní výroby s dominantním podílem ruční práce, k tovární strojní velkovýrobě, která dokázala dosavadní produkci zněkolikanásobit. Docházelo k vzrůstající dělbě práce a specializaci. Průmyslová revoluce byla umožněna rostoucím tempem průmyslové, obchodní a technologické činnosti přibližně od 11. století.

odcházejících spalin, takzvaného systému regenerace, který si nechal patentovat Friedrich Siemens v Anglii a Rakousko-Uhersku v roce 1856. Tento systém je založen na vyhřívání vyzdívkou regenerátorů teplem ze spalin a následnou reverzací (změnou směru hoření) je toto teplo předáváno přehřívávanému vzduchu a plynu (více v kap. 7.3.2). Regenerační systém znamenal úsporu paliva 30 až 50 %. Vedle systému regenerace byl v roce 1874 G. Nehsem vyvinut systém rekuperace, který funguje bez změny směru hoření, spaliny jsou odděleny od vyhřívávaného vzduchu a plynu stěnou (kap. 7.3.2).

První skutečně kontinuální STA byl uveden do provozu v roce 1867 v Drážďanech opět Friedrichem Siemensem. Zavedení kontinuálních tavicích vanových pecí vedlo k podstatně vyšším objemům výroby, vyšší efektivitě výroby a snížení ceny na jednotku vyrobeného skla. Lze říci, že tyto STA byly základem pro průmyslovou výrobu skla.

S novými pecemi dochází také k oddělení chladicích pecí od pecí tavicích. Chladicí pece již nejsou vázány na odpadní teplo z tavicích pecí. Nadále jsou konstruovány jako samostatné pece, nejprve komorové (kap. 10.2.1) a následně tunelové (pásové, kap. 10.2.2). Otop byl realizován nejprve pevnými palivy a následně pomocí generátorového plynu.

Na přelomu 19. a 20. století se stává nejvýkonnější a nejehospodárnější pánvovou pecí tzv. Siemens-Siebertova dolnoplamenná pec (vylepšená Siemensova pec) a v období 1. světové války dochází v Českých zemích k postupné unifikaci na tento typ a několik z nich dokonce přetrvává do začátku 21. století.

U stavby pecí dochází po roce 1946 k uplatnění nových materiálů, např. zásadité žárovzdorné materiály (MgO od 45 % až 95 % a Cr_2O_3 od 0 do 35 %) nebo elektrotavené žárovzdorné materiály (charakteristické technologií odlévání z taveniny). Výkony kontinuálních STA stále rostou a v roce 2013 se pohybovaly na maximu 1000 t/den (výroba plochého skla technologií plavení – FLOAT, kap. 9.6.3). Stále více se uplatňuje tavení při spalování plyných paliv kyslíkem.

7.2 Úvod do teorie tavení skla

Při tavení dochází k dějům, které lze definovat jako fyzikální, chemické a fyzikálně chemické pochody:

- a) Přeměny ve složkách sklářského kmene (polymorfnní přeměny, tepelné rozklady, přechod v taveninu).
- b) Reakce probíhající mezi složkami sklářského kmene:
 - reakce v pevné fázi za vzniku pevných produktů,
 - reakce v pevné fázi za vzniku taveniny, reakce pevné látky s taveninou za vzniku kapalného produktu, např. rozpouštění zbytků pevných látek (SiO_2) v tavenině,
 - vzájemné reakce některých složek v tavenině, např. oxidačněredukční pochody,
 - reakce složek taveniny s plyny nebo za vzniku plynů, např. reakce probíhající při čerání.

- c) Vyrovnávání koncentračních rozdílů difúzí. Tyto rozdíly mohou být způsobeny heterogenitou sklářské vsázky a dalšími vlivy (odmísení, koroze vyzdívky, tékání složek apod.).
- d) Proudění skloviny vyvolané dávkováním vsázky a odběrem skloviny, teplotními gradienty ve sklovině, čeřením apod.
- e) Vzestup bublin plynů doprovázený obvykle difúzními pochody (rozpuštění plynů v tavenině nebo naopak uvolňování plynů z taveniny).

Tyto všechny pochody probíhají obvykle souběžně, takže není možno je sledovat izolovaně. Dále je třeba si uvědomit, že většina chemických reakcí probíhá za podmínek, kdy o směru jejich průběhu sice rozhodují hodnoty termodynamických veličin, ale řídicím dějem je kinematika doprovodných fyzikálních dějů. Proto je třeba se věnovat geometrii rozložení jednotlivých reagujících látek, difúzním koeficientům, viskozitám vznikajících kapalných fází a smáčivosti pevných reagentů těmito taveninami.

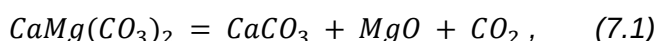
Tavicí proces tvoří tři bezprostředně na sebe navazující fáze:

- vlastní tavení, tj. přeměna směsi surovin v taveninu,
- čeření a homogenizace, které představují odplynění skloviny a její homogenizaci z hlediska chemického složení a teploty,
- sejítí, jinými slovy snížení teploty skloviny tak, aby byla vhodná pro dávkování a následné tvarování.

Tato tři stadia probíhají při kontinuálním tavení současně, ale v různých částech tavicího agregátu. Při tavení přetržitým způsobem (v pánvích) probíhají na stejném místě, ale v určitém časovém sledu.

7.2.1 Vlastní tavení

Při vlastním tavení je proces ovlivněn nejdříve vlastním zakládáním vsázky (kmene). První důsledky zvyšování teploty jsou vysušování kmene a rozklad případných organických příměsí. Následují fázové přeměny a tepelné rozklady. Vedle vypařování vody, které je také fázovou přeměnou a vyžaduje značné množství energie, dochází při teplotě 573 °C k přechodu nízkoteplotního křemene na vysokoteplotní. Tento děj nemá přímý technologický význam, ale při tomto přechodu dochází k rozvolnění mřížky, takže křemen je přístupnější pro reakce v pevné fázi. Dochází také k praskání zrněk, což může zvýšit reaktivitu. Významnou fázovou přeměnou je tepelný rozklad dolomitu a vápence



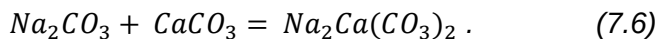
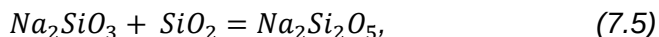
Proces tavení pokračuje slinováním, při kterém srůstá a zpevňuje se disperzní systém. Vztah mezi teplotou tání a teplotou slinování je pro silikáty

$$T_{\text{slin}} = 0,8 - 0,9 T_{\text{tání}}, \quad (7.3)$$

kde T_{slin} [K] je teplota slinování a

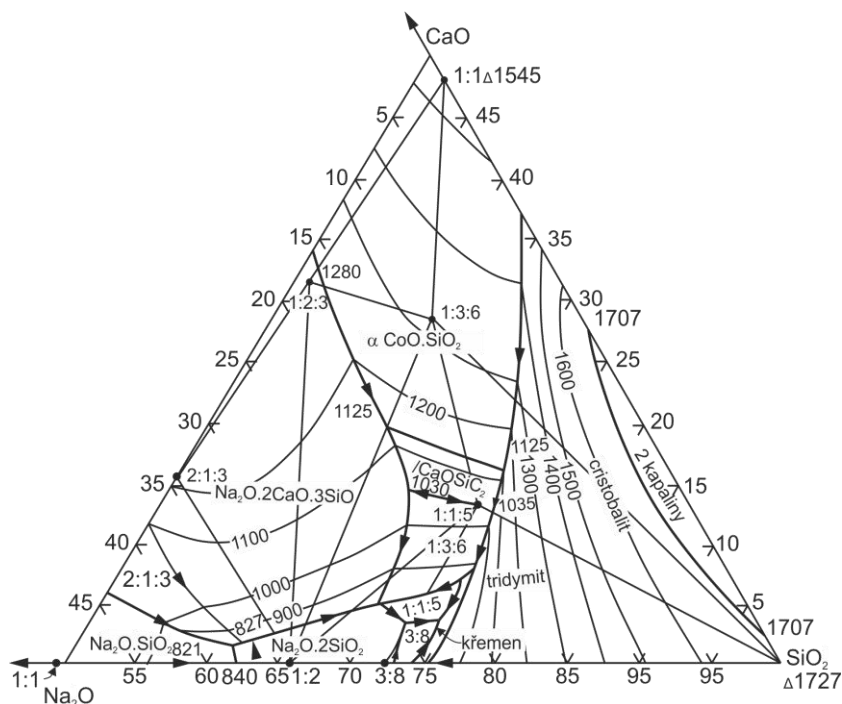
$T_{\text{tání}}$ [K] je teplota tání.

Na začátku tavení probíhají také reakce v pevné fázi, kde je rozhodujícím faktorem difúze v pevné fázi. Rychlost reakce tak závisí na množství kontaktních míst mezi zrny příslušných komponent. Příklady reakce v pevné fázi jsou:



Uvedené příklady reakcí se odehrávají ve většině běžných sklovin, neboť ty se taví (mimo jiné) ze sody (Na_2CO_3 , kap. 4.6.1), vápence (CaCO_3 , kap. 0) a písku (SiO_2 , kap. 4.3.1). Sodnovápenatokřemičité sklo je používáno pro výrobu plochého a obalového skla. Vztah mezi jednotlivými oxidy v této soustavě z hlediska teploty liquidus (maximální teploty, při které při daném chemickém složení může existovat stabilní krystalická fáze) lze vyjádřit pomocí tzv. ternárního diagramu, Obr. 7.1. Pro sklářskou výrobu jsou důležité i další soustavy oxidů jako $\text{K}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O} - \text{PbO} - \text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ a další.

Při pokračování tavení dochází na povrchu zrn jednotlivých složek k reakcím za vzniku kapalné fáze (např. produkt reakce 7.6). Mimo jiné se také tvoří krystalický metakřemičitan sodný (Na_2SiO_3 , produkt reakce 7.4), který dále reaguje za vzniku taveniny. Po reakcích v pevné fázi a za vzniku taveniny následují vzájemné reakce v tavenině. Uvádí se, že během 15 až 20 minut vznikne z 80 až 90 % kmene tavenina a zbývajících 10 až 20 % jsou ojedinělá nerozpuštěná zrna. K jejich rozpuštění dojde v poslední fázi vlastního tavení během 1 až 2 hodin a následuje čření. Celkově je sklovina udržována na vysoké teplotě několik hodin, ale během prvních 45 až 60 minut se sklovině dodá 75 až 90 % celkové tepelné energie. Tavení jako celek je endotermní reakce, což ale nevylučuje možnost existence dílčích exotermických reakcí.



Obr. 7.1 Ternární diagram soustavy $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} - \text{CaO}$

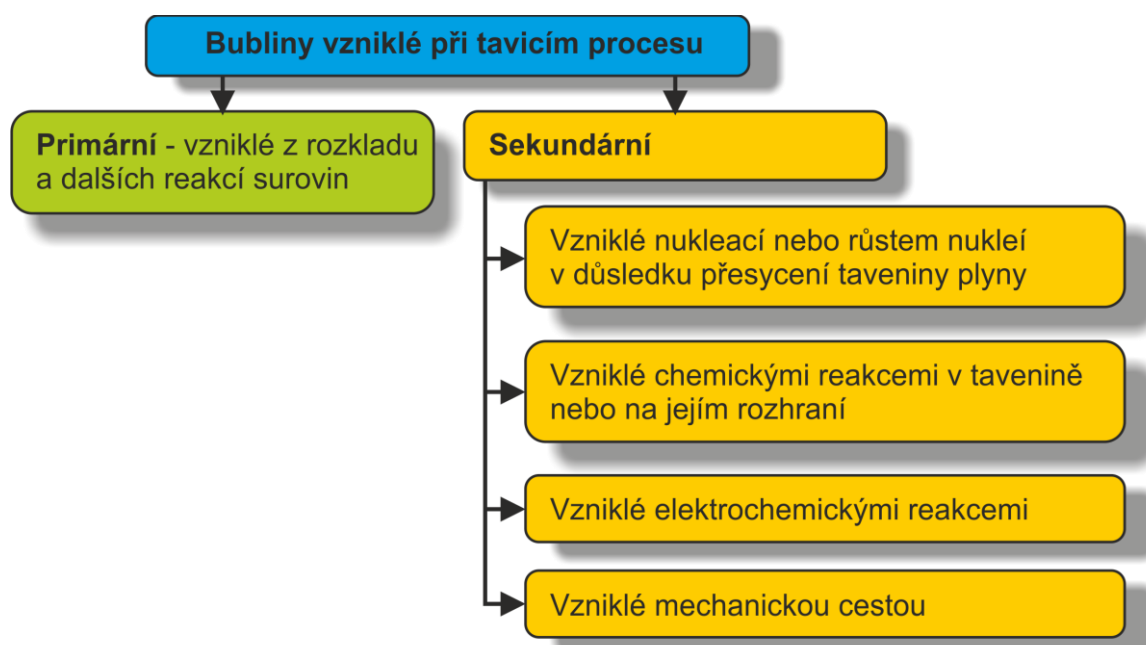
7.2.2 Čeření skloviny

V průběhu celého procesu tavení dochází také k uvolňování plynů jako produktů chemických reakcí, uvolňování plynů, které byly vneseny vsázkou a dalšími procesy. Plyny, jako je především oxid uhličitý, oxid uhelnatý, dusík, vodní pára, kyslík, oxid siřičitý a argon, vytváří ve sklovině bubliny, které, pokud by se neodstranily, zůstanou v konečných výrobcích. Bubliny přítomné ve skle jsou významným a nejčastějším defektem. Následuje proto čeření skloviny, což je vžitý název pro odstraňování bublin ze skloviny.

Z pohledu mechanismů tvorby bublin při tavení je možné je rozdělit do pěti tříd, Obr. 7.2. Všechny bublinky nad určitý minimální rozměr a počet na danou jednotku objemu musí být odstraněny a to bez ohledu na mechanismus vzniku. Mechanismus jejich vzniku rozhoduje o snadnosti/komplikovanosti jejich odstranění.

Čeření se provádí:

- zvýšením teploty (snížení viskozity skloviny),
- přísadou čeřiv do sklářského kmene,
- zaváděním plynů do skloviny (bubbling).



Obr. 7.2 Rozdělení bublin podle mechanismu jejich vzniku při tavení skloviny

Velice často se jednotlivé účinky kombinují. Mechanizmy, kterými je čeření umožněno, jsou:

- podpora vzestupu bublin na hladinu skloviny,
- spojování malých bublin s většími,
- podpora vzestupného proudění,
- difúzní pochody (rozpouštění bublin ve sklovině).

Zvýšení teploty skloviny lze označit za fyzikální princip, kdy snížení viskozity umožní rychlejší vzestup bublin na hladinu skloviny. Snížení viskozity se provádí zhruba na úroveň 10 Pa·s, což odpovídá zvýšení teploty u běžných skel pro výrobu obalového a plochého skla na hodnoty v rozmezí 1 400 až 1 500 °C. Nižší viskozita snižuje odpor skloviny vůči stoupajícím bublinám. Rychlost výstupu bublin v [m·s⁻¹] je dána vztahem

$$v = \frac{1}{3} \cdot r^2 \cdot g \cdot \frac{\Delta\rho}{\eta} \quad (7.7)$$

kde r je poloměr bublin [m],

g – tíhové zrychlení [m·s⁻²],

$\Delta\rho$ – rozdíl hustoty skloviny a plynu [kg·m⁻³],

η – viskozita skloviny [Pa·s].

Ze vztahu vyplývá, že vedle viskozity je důležitá i velikost bublin, větší se odstraňují rychleji, protože jejich rychlost stoupání ve sklovině je vyšší, Tab. 7.1. Dalšími faktory jsou při zvýšení teploty skloviny zvětšování objemu plynů (bubliny s teplotou zvětšují objem) a snižování rozpustnosti plynů ve sklovině (bubliny rostou dalšími podíly nerozpuštěných plynů).

Tab. 7.1 Vypočtená rychlost vzestupu bublin ve sklovině o viskozitě 10 Pa·s

Průměr [mm]	Rychlost [mm·s ⁻¹]	Doba vzestupu po dráze 1 000 mm [h:min:s]
4	3,270	0:05:06
2	0,817	0:20:24
1	0,204	1:21:42
0,5	0,051	5:26:48
0,2	0,008	34:43:20

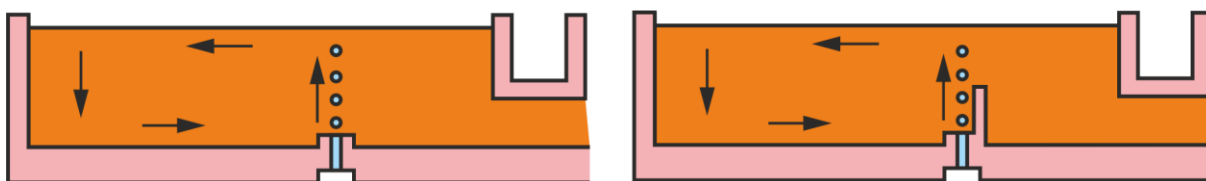
Jak je zřejmé, drobné bublinky se odstraňují podstatně hůře a samotné snížení viskozity (zvýšení teploty) na běžné hodnoty čerení je většinou nedostatečné, proto se do vsázky **přidávají čeřiva**. Samotná čeřiva se v počátku samotného tavení reakcí neúčastní nebo jen minimálně. Samotné čerení je spuštěno překročením teploty čerení, kdy se z čeřiv rozpuštěných ve sklovině (jako je síran sodný, kap. 4.9.1, oxid arzenitý, kap. 4.9.2, ...) uvolňují čeřicí plyny, které následně difundují do již existujících bublinek a zvětšují jejich objem, tedy i průměr. Proces je možné označit jako fyzikálně-chemický. Bublinky postupně rostou a tím se urychluje jejich pohyb směrem k hladině. Tato fáze je někdy nazývána primární čerení. Pro primární čerení je podstatné uvolňování dostatečného množství čeřicího plynu a nízká viskozita skloviny. Pro primární čerení není výhodné silné proudění, neboť před dosažením hladiny hrozí nebezpečí recirkulace bublin do nižších vrstev.

Drobné bublinky tzv. „kyšpy“ vzniklé z čeřiv by se při následném procesu sejítí (pokles na teploty 1 200 – 1 300 °C u obalového a plochého skla) měly ve sklovině rozpustit, protože při nižší teplotě dochází ve sklovině k vyšší rozpustnosti plynů. Tento proces je označován

jako sekundární čerení. Rychlost sekundárního čerení je závislá na kvalitě primárního vyčerení, rychlosti ochlazování a difúzi plynu v tavenině.

Proces čerení lze zrychlit zvýšením dávky čeřiv, doprovodným efektem je snížení počáteční teploty čerení. Negativním efektem je naopak nebezpečí pěnění iniciované nadbytečným objemem plynu ve sklovině.

V praxi se objevuje také mechanický princip čerení, který je nazýván **bubbling**. (probublávání), Obr. 7.3. Jedná se o zavádění dusíku, vzduchu, kyslíku, hélia nebo dalších plynů tryskami umístěnými ve dnu tavicí části pece a vytváření vzestupného proudění, kterým je čerení podporováno. Na dně bazénu je často konstrukce trysek pro probublávání doplněna příčným prahem, který podporuje vertikální proudění. Uspadňuje tak odvod bublin na hladinu a přispívá také k homogenizaci skloviny.



Obr. 7.3 Příklad zavedení probublávání (bubblingu)

Stupeň vyčerení skloviny se vyjadřuje dvěma způsoby:

- celkovým množstvím (objemem) bublin ve sklovině (porovnáním hustoty takového skla s hustotou skla neobsahujícího uzavřeniny),
- počet bublin vztažených na jednotku objemu (provádí se pozorováním v mikroskopu).

7.2.3 Homogenizace a proudění skloviny

Jak již bylo konstatováno, cílem tavení je homogenní sklovina jak z pohledu jejího složení, tak i její teploty. Samotné čerení by mělo zbavit sklovinu viditelných bublin, ale nezbaví ji nehomogenních oblastí. Rozdíly ve složení skla se projevují rozdílnými vlastnostmi, a to především optickými. Ve skle tak vznikají optická rozhraní, která se projeví jako vady hotových výrobků. Nehomogenity ve složení skloviny lze rozdělit na:

- lokální nehomogenity – izolované oblasti skloviny odlišného složení,
- kontinuálně přicházející šlíry – ty se táhnou dlouhou dobu v určitém profilu výtokového proudu,
- objemové nehomogenity – vyplňují celý objem vytékající skloviny a rozdíly v koncentraci jsou často malé a obtížně zjistitelné.

Tepelné nehomogenity mohou ovlivnit především tvarování a opět se projeví jako vady hotových výrobků.

Významným zdrojem nehomogenit ve složení skloviny je sklářský kmen. Jeho složení by ideálně mělo být homogenní až do velikosti zrn jednotlivých surovin (kap. 5.5). Nicméně, skutečnost je vzdálená ideálu. Nehomogenity vyvolává špatné promísení kmene, odmísení a ztráty části kmene jeho prašností. Dále při kolísání složení kmene dochází v tavicím procesu

ke směšování sklovin různého složení, jehož výsledkem je nehomogenní sklo. K podobným výsledkům vede změna složení způsobená odtékáním složek skloviny, rozpouštěním žáromateriálů, uvolněním skloviny z mrtvých koutů a i dalšími mechanizmy. Protože je velmi obtížné eliminovat výše uvedené vlivy a protože ve vyčerené sklovině se také vyskytují nehomogenní oblasti obohacené SiO_2 , CaO o velikosti několika milimetrů, je nutné provést homogenizaci skloviny.

Na homogenizaci se podílí dva hlavní děje, které se navzájem kombinují:

- difúze,
- proudění skloviny.

Přestože oba děje probíhají současně, lze na děj homogenizace nahlížet jako na postupný proces. Makroskopické nehomogenity se nejprve zeslabí prouděním skloviny a potom rozpustí difúzí.

Difúze je samovolný proces, při kterém se neuspořádaným tepelným pohybem transportují částice hmoty (atomy, ionty, molekuly). Difúzní tok je přímo úměrný hnací síle, kterou je gradient koncentrací. Konstantou úměrnosti je difúzní koeficient (Fickův zákon). K tomu aby difúze proběhla, musí být difúzní koeficient ve sklovině dostatečně vysoký. Naopak, nízkou hodnotu tohoto koeficientu má žárovzdorný materiál, což na jedné straně sice zvyšuje odolnost vyzdívky pece vůči korozivnímu působení skloviny, na druhé však vede k vytváření ve sklovině obtížně rozpustných šlír.

Proudění je úzce spjato s typem a konstrukčním uspořádáním konkrétního tavicího agregátu. Proudění skloviny pak neovlivňuje jen homogenizaci skloviny, ale má význam i pro ostatní procesy při tavení. Proudění má význam především u kontinuálních tavicích agregátů, kde je jedním ze základních předpokladů úspěšného tavení. Ve sklářských pecích vzniká proudění na základě několika mechanismů:

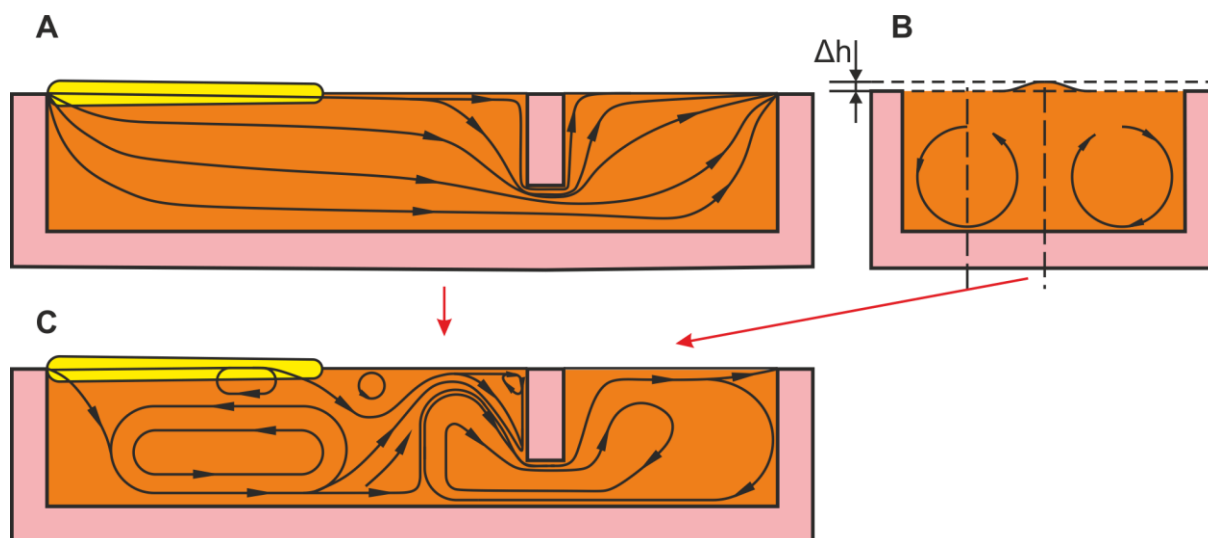
- odběrovým proudem (primární),
- volnou konvekci (sekundární),
- stoupáním bublin,
- mechanickým účinkem míchadel (pokud jsou v peci instalována),
- v prvotních fázích se v měřítku jednotlivých zrn uplatňuje též Marangoniho proudění⁷, způsobené nehomogenitou složení.

Hnací silou primárního proudění je tlakový rozdíl způsobený zakládáním vsázky a odběrem skloviny, Obr. 7.4 A. U plamenných STA se sekundární proudění iniciované nehomogenním rozložením teplotních polí a následně změnou hustoty ve sklovině ustavuje

⁷ Pohyb kapaliny podél fázového rozhraní kapalina/plyn nebo kapalina/kapalina z míst o nižším mezifázovém napětí do míst o vyšším mezifázovém napětí. Gradient povrchového napětí se může vytvořit v důsledku místních rozdílů teploty v systému - v místech o nižší teplotě je vyšší povrchové napětí (povrchové napětí kapalin s teplotou klesá), což vyvolává proudění povrchových vrstev kapaliny do těchto míst. U vícesložkových systémů může být gradient povrchového napětí vyvolán gradientem koncentrace, způsobeným rozdílnou rychlostí vypařování jednotlivých složek směsi nebo adsorpčními jevy (Gibbsův-Marangoniho efekt).

jak v podélném, tak i v příčném směru. Vlivem ohřevu hladiny od zahřívání atmosféry a ochlazování oblastí při bočních stěnách STA dochází k vytvoření teplotního maxima v průsečnici svislé roviny procházející podélnou osou pece a hladiny, Obr. 7.4 B. V tomto místě má sklovina nejnižší hustotu, která se projevuje „vzdutím“ hladiny, sklovina je vytlačovaná nahoru, odkud se rozlévá do stran. Místo maximální teploty působí jako zřídlo proudící roztavené skloviny.

Charakter proudění skloviny v bazénu je určen vzájemnou interakcí sekundárních a primárních proudů, proto charakter proudění v STA je také diametrálně odlišný v plamenných a elektricky otápěných STA.



Obr. 7.4 Proudění skloviny v kontinuálních STA: A – primární proudění (podélný řez STA), B – sekundární proudění (příčný řez STA), C – schéma hlavních proudů (podélný řez)

Rychlost homogenizace závisí na rychlostním gradientu skloviny, proto pro zvýšení homogenizačního procesu je v praxi využíváno míchání a bubblingu. Míchadla však musí být umístěna v dostatečné vzdálenosti od stěn tavicího agregátu.

7.2.4 Sejití skloviny

Při **sejití skloviny** již nedochází k chemickým reakcím a homogenizaci. Předpokládá se úplné rozpuštění malých bublinek ve sklovině a snížení teploty na úroveň vhodnou pro tvarování. K sejití dochází u kontinuálních STA v tzv. pracovní části, která je většinou oddělená od části tavicí.

7.2.5 Další důležité pochody a děje při tavení

Mezi významné děje ve sklářské technologii patří **oxidačně-redukční (redox) děje**, které probíhají v teplotním rozmezí začínajícím v okolí transformační teploty skla a končícím maximálními tavicími teplotami. Tento široký teplotní interval pokrývá všechny základní procesy sklářské výroby – tavení, homogenizaci, zpracování a chlazení. V oblasti tavení ovlivňují redox děje zásadním způsobem zejména průběh čerení skloviny a přenos tepla ze spalovacího prostoru. Zvláště významným aspektem průběhu redox dějů je jejich vliv na vlastnosti výsledného produktu, zejména jeho barevnost, kap. 4.7.2.

Dalším důležitým dějem jsou **ztráty těkavých složek**. V průběhu tavení dochází vždy k ochuzování skloviny o některé složky vzhledem k původnímu složení sklářské vsázky. Důsledkem je vytváření nehomogenních oblastí ve sklovině a uvolněné složky jsou hlavním zdrojem prachových emisí STA. Tyto emise zanáší odtahové cesty, usazují se v regenerátorech a rekuperátorech, způsobují korozi klenby STA a dalších částí. Ztráty při tavení mohou být dvojího druhu. Jednak vznikají unášením jemných podílů surovin vlivem proudění atmosféry v STA (ztráty prášením), především pak vypařováním těkavých složek taveniny. Tato těkavost některých složek závisí na teplotě taveniny, ale i na dalších podmínkách, zejména na celkovém složení skloviny. Například největší ztráty byly zaznamenány u skel olovnatých a boritokřemičitých.

Při tavení působí i další pochody a děje, jako je již zmiňovaná koroze vyzdívky, tepelně-izolační vlastnosti vyzdívky, proudění pecní atmosféry a další.

7.2.6 Činitelé ovlivňující dobu tavení

Znalosti podmínek tavení umožňuje v praxi dobu tavení a tedy i ekonomickou náročnost tavicích procesů ovlivňovat, jsou to především následující činitelé:

- tavicí teplota,
- chemické složení,
- velikost částic,
- obsah vody,
- přísada střeptů,
- urychlovače tavení,
- úprava kmene,
- elektrický příhřev.

Vliv **tavicí teploty** spočívá především ve snížení viskozity skloviny, která má za následek urychlení difuzních pochodů, zvýšení rozpustnosti složek a zvýšení intenzity proudění. Tím se zkracuje doba tavení, ale zvyšují se náklady na tavení (zvýšení teplotních ztrát) a zvyšuje se také koroze žárovzdorných materiálů použitých na stavbu STA.

Chemické složení vsázky má zásadní vliv na dobu tavení a ekonomiku. Jak vyplývá z kapitoly o sklářských surovinách (kap. 4), zvýšením obsahu některých oxidů se sníží tavicí teploty (např. Na_2O , K_2O , B_2O_3 , ...), opačný vliv mají jiné oxidy (např. SiO_2 , Al_2O_3) a jiné mají vliv rozdílný pro různé teploty (např. CaO).

Většina prací zabývajících se vlivem **velikosti částic** na tavení skloviny dochází ke stejným závěrům a to, že s klesající zrnitostí se zvyšuje styčný povrch reagujících látek, čímž dochází k rychlejšímu tavení. Na druhou stranu, příliš jemná zrnitost sklářského kmene zvyšuje jeho prašnost a část kmene odchází spolu se spaliny, kap. 7.2.5. Při použití příliš jemných surovin se také zhoršuje a prodlužuje čepení v důsledku tvorby velmi malých bublin.

Obsah vody ve sklářské vsázce příznivě ovlivňuje rychlost tavení. Jedná se buď o vlhkost volnou, která zabraňuje prášení a zlepšuje kontakt mezi reagujícími látkami, nebo o vlhkost vázanou chemicky. U vlhkosti volné se obsah vody pohybuje obvykle v rozmezí 2 až 4 %.

Přísada střepů je nedílnou součástí sklářské vsázky všech běžných průmyslových výrob. Vedle zkrácení času, ovlivňuje jejich použití i cenu výsledné produkce. Problematika je rozepsána v kap. 4.11 a 5.6.

Urychlovače tavení mají příznivý vliv na rychlost a ekonomiku tavení. Jejich vlivy na tavení byly již probrány v kap. 4.10.

Úprava kmene je založena na jeho aglomeraci a jeho předeřevu. Další informace jsou uvedeny v kap. 5.7.

Elektrický příhřev je používán u plamenných pecí a jeho princip a vliv je uveden v následující kap. 7.6.3.

7.3 Energetická náročnost produkce skleněných výrobků

Výroba skla je relativně energeticky náročnou technologií. Na druhou stranu je nutné zmínit, že sklářské výrobky díky své dlouhé životnosti a svým vlastnostem (např. izolační vlastnosti – zasklení budov) uspoří mnohonásobně více energie, než se spotřebuje během výroby.

Celkovou spotřebu energie a tedy i ekologickou zátěž z produkce skleněných výrobků ovlivňuje:

- a) Příprava kmene (celý proces od skladování, přes manipulaci se surovinami a jejich vážení, mísení až po dopravu k STA).
- b) Tavení skloviny (především samotné tavení a čerání skloviny).
- c) Tvarování skloviny (především tepelná výměna mezi sklem, nástroji a chladícím médiem).
- d) Chlazení výrobků (spojené často se znovuzahříváním výrobku a jeho řízené ochlazování).
- e) Zpracování a zušlechťení (tepelné, mechanické, chemické).

Tavicí proces je energeticky nejnáročnější fází výroby skla. Z celkové potřeby energie se na tavení vynakládá u některých výrobků daného složení skla více než 60 %. Běžná skla se taví v rozmezí teplot 1 350 až 1 600 °C (křemenné sklo dokonce okolo 2 000 °C) a i v následných technologických operacích (tvarování, chlazení, zpracování a zušlechťení) je spotřeba energií podstatně nižší, Tab. 7.2.

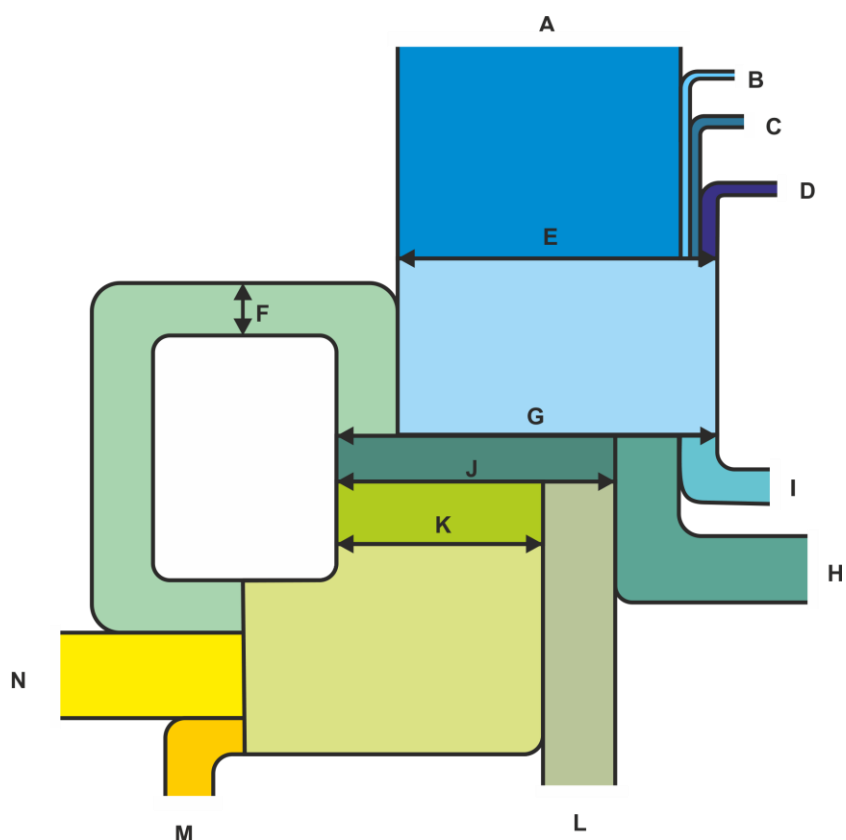
7.3.1 Tepelná bilance STA

Výroba skla patří mezi technologie výrazně využívající teplo a právě pro tavení je tepelná energie nejdůležitější. Nejjednodušší a nejprůhlednější formou popisu STA z tohoto pohledu je jeho tepelná bilance, která mapuje oblasti tepelných toků a jejich vzájemný poměr u daného agregátu, což mimo jiné dovoluje provádět porovnání různých typů STA.

Jako příklad je uvedena tepelná bilance kontinuální tavicí plamenné pece otápěné plyným palivem, bilančním obdobím je jedna hodina. Za určitých předpokladů lze uvedený model tepelné bilance aplikovat i na pece využívající kapalná paliva nebo na pece elektrické. Názorně popisuje tepelné toky v STA tzv. Sankeyův diagram (Obr. 7.5).

Tab. 7.2 Energetická náročnost jednotlivých operací při produkci výrobků ze skla pro různé typy složení skla, údaje o potřebné energii jsou v kJ na 1 kg vyrobeného skla a v procentech z celkové energetické náročnosti

	Ploché sklo		Obalové sklo		Skleněná vlákna		Lisované a foukané výrobky	
Technologické operace	kJ/kg	%	kJ/kg	%	kJ/kg	%	kJ/kg	%
Příprava kmene	717	5,2	717	8,1	717	3,4	717	4,2
Tavení a čerání	9 070	66,3	5 800	65,2	8 859	41,6	7 699	44,8
Tvarování	1 582	11,6	422	4,8	7 593	35,7	5 589	32,6
Chlazení výrobků, zpracování a zušlechťení	2320	16,9	1962	21,9	4 113	19,3	3 164	18,4
Celkem	13 689	100	12 698	100	21 282	100	17 169	100
Podíl přípravy skloviny na celkové energetické náročnosti	9 787	71,5	6 518	73,3	9 576	45	8 416	49



Obr. 7.5 Sankeyův diagram tepelných toků ve sklářském tavicím agregátu: A - chemické teplo paliva, B - fyzikální teplo paliva, C - fyzikální teplo oxidovadla (nejčastěji spalovací vzduch, případně kyslík), D - teplo přivedené vsázkou, E - primárně přivedené teplo, F - regenerace tepla, G - celkem teplo přivedené do tavicího agregátu, H - ztráty tepla do okolí, I - teplo využitě k odběru skloviny, J - teplo odvedené spaliny, K - teplo spalin na vstupu do regenerace, L - ztráty tepla na úseku výstupu spalin z pece - vstup spalin do regeneračního zařízení, M - ztráty tepla povrchem regeneračního zařízení, N - komínová ztráta

A. Chemické teplo přivedené palivem představuje součin spotřeby a výhřevnosti paliva (výhřevnost je dána množstvím tepla, které se uvolní spálením paliva, přičemž voda zůstává ve spalínách v podobě páry).

$$Q_A = H_U \cdot V_P \text{ [MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.8)$$

kde H_U - výhřevnost paliva [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$],

V_P - spotřeba paliva [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$].

B. Fyzikální teplo přivedené palivem lze vypočítat

$$Q_B = c_{pp} \cdot T_p \cdot V_p \text{ [MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.9)$$

kde c_{pp} – měrná tepelná kapacita paliva za konstantního tlaku [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$]

T_p - teplota paliva [$^\circ\text{C}$],

V_p - spotřeba paliva [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$].

C. Fyzikální teplo přivedené oxidovadlem (spalovací vzduch, kyslík), tzv. citelné teplo

$$Q_C = c_{pox} \cdot T_{ox} \cdot V_{ox} \text{ [MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.10)$$

kde c_{pox} - měrná tepelná kapacita oxidovadla za konstantního tlaku [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$]

T_{ox} - teplota oxidovadla [$^\circ\text{C}$],

V_{ox} - spotřeba oxidovadla [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$].

D. Teplo přivedené vsázkou lze vyčíslit

$$Q_D = c_{pb} \cdot T_b \cdot M_b \text{ [MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.11)$$

kde c_{pb} - měrná tepelná kapacita vsázky [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$],

T_b - teplota vsázky [$^\circ\text{C}$],

M_b - hmotnost vsázky [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$].

E. Primárně přivedené teplo do pece je dáno součtem položek A+B+C+D, tudíž

$$Q_E = Q_A + Q_B + Q_C + Q_D \text{ [MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.12)$$

F. Regenerace tepla je poslední příjmovou položkou tepelné bilance (nemusí být uvažována u pecí otápěných kombinací palivo-kyslík a u celoelektrických pecí). V současnosti se využívá regenerace tepla ve formě předehřátí spalovacího vzduchu, vzácně zemního plynu v rekuperátorech nebo regenerátorech. Je možné i využít tepla spalin k předehřevu vsázky, či pouze střepů. Položku lze vyjádřit následovně (s tím, že některé členy mohou být nulové)

$$Q_F = Q_{pp} + Q_{op} + Q_{bp} \quad [\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.13)$$

kde Q_{pp} - teplo v předehřátém palivu $[\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}]$

Q_{op} - teplo v předehřátém oxidovadlu $[\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}]$

Q_{bp} - teplo v předehřáté vsázce, střepích $[\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}]$

$$Q_{pp} = c_{ppp} \cdot T_{pp} \cdot V_{pp} - c_{pp} \cdot T_p \cdot V_{pp} \quad [\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.14)$$

kde c_{ppp}, c_{pp} - měrná tepelná kapacita předehřátého, resp. nepředehřátého paliva za konstantního tlaku $[\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$,

T_{pp}, T_p - teplota předehřátého, resp. nepředehřátého paliva $[^\circ\text{C}]$,

V_{pp} - množství paliva, které je předehříváno za bilanční období $[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$.

$$Q_{op} = c_{poxp} \cdot T_{oxp} \cdot V_{oxp} - c_{pox} \cdot T_{ox} \cdot V_{oxp} \quad [\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.15)$$

kde c_{poxp}, c_{pox} - měrná tepelná kapacita předehřátého, resp. nepředehřátého oxidovadla za konstantního tlaku $[\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$,

T_{oxp}, T_{ox} - teplota předehřátého, resp. nepředehřátého oxidovadla $[^\circ\text{C}]$,

V_{oxp} - množství oxidovadla, které bylo předehříváno za bilanční období $[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$.

$$Q_{bp} = c_{pbp} \cdot T_{bp} \cdot M_b - c_{pb} \cdot T_b \cdot M_b \quad [\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.16)$$

kde c_{pbp}, c_{pb} - měrná tepelná kapacita předehřáté, resp. nepředehřáté vsázky $[\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$,

T_{bp}, T_b - teplota předehřáté, resp. nepředehřáté vsázky $[^\circ\text{C}]$,

M_b - hmotnost vsázky za bilanční období, která je předehřívána $[\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}]$.

G. Celkový tepelný tok vstupující do pece je součtem primárně přivedeného tepla a tepla získaného regenerací spalin

$$Q_G = Q_E + Q_F \text{ [MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.17)$$

Následující položky se týkají výdaje tepla a nemusí být v rovnosti s příjmy, čehož se v praxi často využívá ke kvantifikaci položek, které jsou jinak obtížně stanovitelné.

H. Ztráty povrchem tavicího agregátu je možné jednoduše vypočítat odečtením tepla ve sklovině a tepla odvedeného spaliny od tepla přivedeného do pece celkem

$$Q_H = Q_G - Q_J - Q_I \text{ [MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.18)$$

I. Teplo odvedené sklovinou lze vyjádřit následovně

$$Q_I = (q_r + q_v + q_o) \cdot G_g \text{ [MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.19)$$

kde q_r - reakční teplo skloviny $\text{[MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$,

q_v - výparné teplo vody $\text{[MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$,

q_o - teplo potřebné na ohřev skloviny $\text{[MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$,

G_g - tavicí výkon za bilanční období $\text{[kg} \cdot \text{h}^{-1}]$.

J. Spaliny opouštějící pec mají určitou teplotu, složení a objem, tudíž

$$Q_J = c_{p_{sp}} \cdot T_{sp} \cdot V_{sp} \text{ [MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.20)$$

kde $c_{p_{sp}}$ - měrná tepelná kapacita spalin za konstantního tlaku $\text{[MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$,

T_{sp} - teplota spalin na výstupu z tavicího prostoru pece $^\circ\text{C}$,

V_{sp} - objem spalin $\text{[m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$.

Je nutné si uvědomit, že objem spalin nemusí odpovídat jen spalování paliva, ale mohou přistupovat i plynné produkty, které se uvolňují ze vsázky (zejména voda a CO_2).

K. Spaliny vstupující do regenerace

$$Q_K = c_{psr} \cdot T_{sr} \cdot V_{sr} \text{ [MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.21)$$

kde c_{psr} - měrná tepelná kapacita spalin na vstupu do regenerace za konstantního tlaku [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$],

T_{sr} - teplota spalin na vstupu do regenerace [$^\circ\text{C}$],

V_{sr} - objem spalin vstupujících do regenerace [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$].

L. Ztráty tepla povrchem na cestě z tavicího prostoru do regeneračního zařízení

Ize nejjednodušeji stanovit jako rozdíl mezi teplem spalin na výstupu z pece (Q_J) a na vstupu do regenerace (Q_K)

$$Q_L = Q_J - Q_K \text{ [MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.22)$$

M. Ztráty tepla povrchem regeneračního zařízení Ize nejjednodušeji stanovit jako rozdíl mezi teplem spalin na vstupu do regenerace (Q_K) a na výstupu z regenerace (Q_N) mínus teplo získané regenerací (Q_R)

$$Q_M = Q_K - Q_N - Q_F \text{ [MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.23)$$

N. Komínová ztráta určuje, jakou část tepla odnášejí spaliny bez užitku do komína.

$$Q_N = c_{psk} \cdot T_{sk} \cdot V_{sk} \text{ [MJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.24)$$

kde c_{psk} - měrná tepelná kapacita spalin za konstantního tlaku [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$],

T_{sk} - teplota spalin na výstupu z regenerace [$^\circ\text{C}$],

V_{sk} - objem spalin [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$].

Z tepelné bilance vycházejí ukazatele umožňující srovnání různých typů STA. Při dlouhodobém sledování konkrétního tavicího agregátu lze sledovat jejich vývoj v čase. Obecně lze tyto ukazatele využít k popisu jakéhokoliv tepelného zařízení, ve kterém dochází ke spalování paliva, ať již pevného, kapalného či plynného.

7.3.2 Regenerátory, rekuperátory a další zařízení pro snižování energetické náročnosti

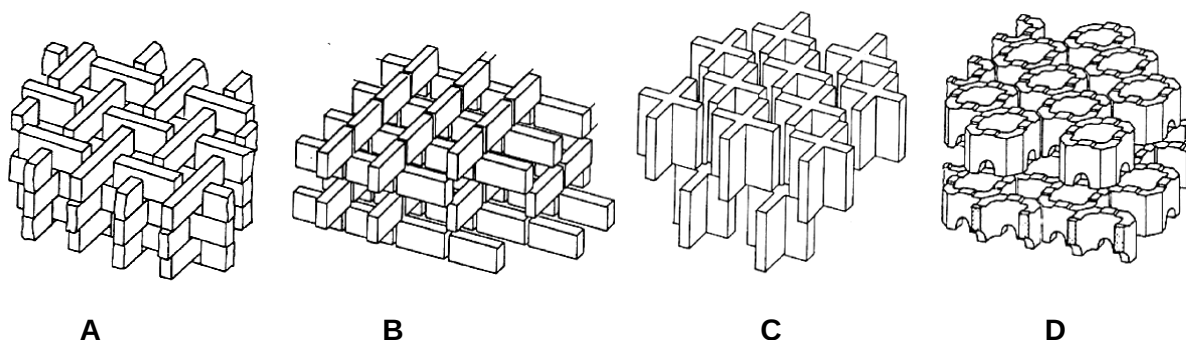
Vzhledem k energetické náročnosti tavení skloviny je snaha využít odpadního tepla. U plamenných pecí spalujících plyn se vzduchem je využití odpadního tepla ekonomickou nutností. V tomto případě je teplo, které odchází se spalinami, znovu použito pro tavení skloviny. Základní zařízení pro získávání tepla zpět do tavicího procesu jsou:

- regenerátory slouží k předehřívání spalovacího vzduchu teplem akumulovaným vyzdívkou regenerátoru s periodickou změnou směru hoření - jsou založeny na akumulaci tepla,
- rekuperátory jsou založeny na plynulém přestupu tepla přes dělicí stěnu, slouží ke kontinuálnímu předehřívání spalovacího vzduchu (někdy i plynu) při stálém směru proudění spalin.

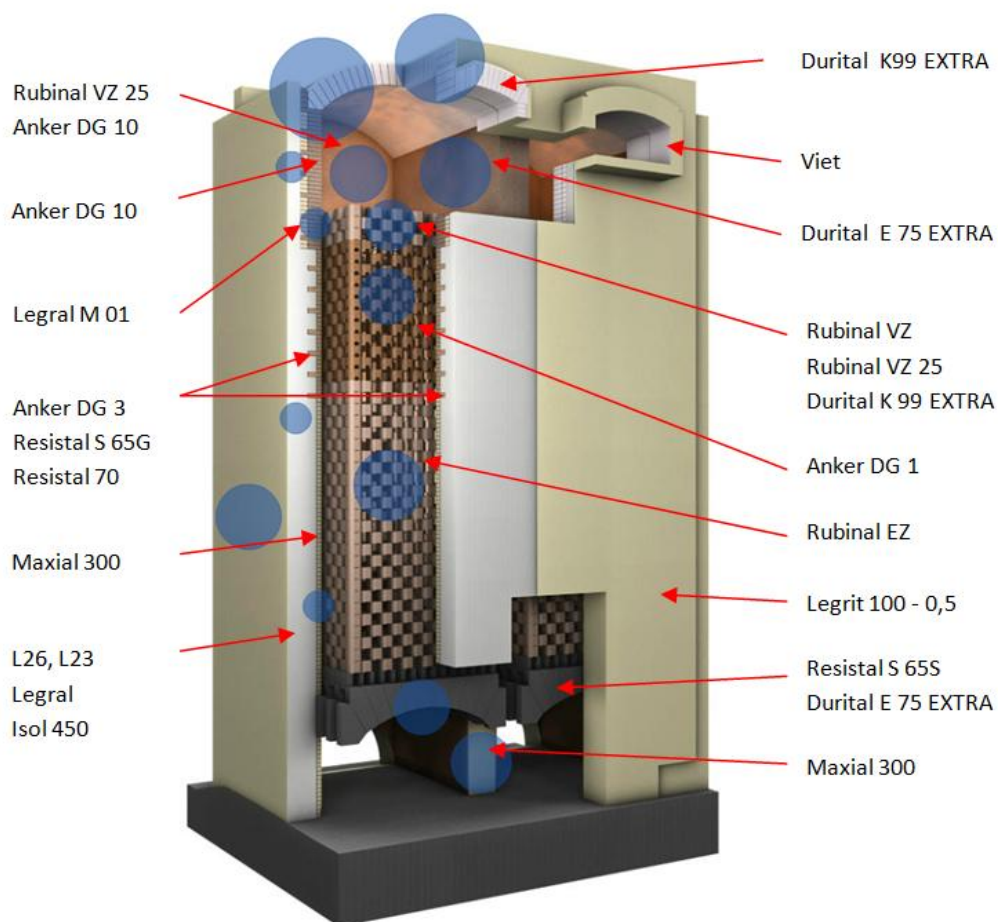
Regenerátory jsou jen o několik let starší než rekuperátory. Původním účelem obou nebyla úspora energie, ale dosažení vyšších tavicích teplot.

Regenerátory jsou vyplněny průchozím vyložením, neboli mřížovím o velké tepelné kapacitě, které slouží k akumulaci tepla. Mřížoví (často vyrobené ze šamotu) má několik možností provedení, Obr. 7.6. Regenerátory jsou zhotoveny ze žárovzdorného materiálu a jsou vždy v páru, každý ze dvojice pro jednu stranu STA.

V jednom cyklu je mřížoví na jedné straně ohříváno teplem spalin a následně je pak teplo předáno do spalovacího vzduchu. Optimální doba cyklu se při spalování vzduchem pohybuje v rozmezí 40 – 60 minut v závislosti na tepelné kapacitě výplně regenerační komory. Při otápění hořáky z pravé strany vanové pece proudí do spalovacího prostoru spalovací vzduch z pravé komory regenerátoru a v prostoru mřížoví levé komory se akumuluje odpadní teplo spalin, které do regenerátoru přicházejí přes hořáky na levé straně. Po 20 – 30 minutách dochází k reverzaci procesu a zažehnutí hořáků na levé straně vanové pece. Během reverzace, trvající zhruba 30 - 60 sekund, nejsou ve vanové peci žádné plameny. Asi 15 s po obrácení směru spalovacího vzduchu může být do prostoru hořákové komory opět přivedeno palivo. Komora je sestavena z několika typů žárovzdorných materiálů, Obr. 7.7. Při regeneraci lze dosáhnout předehřátí vzduchu až na teplotu 1 350°C.



Obr. 7.6 Tvar mřížoví regenerátorů: A - košový, B - roštový, C - křížový, D - s drážkami a otvory



Obr. 7.7 Komora regenerátoru moderního STA s komerčními názvy žárovzdorných materiálů (zdroj: RHI AG)

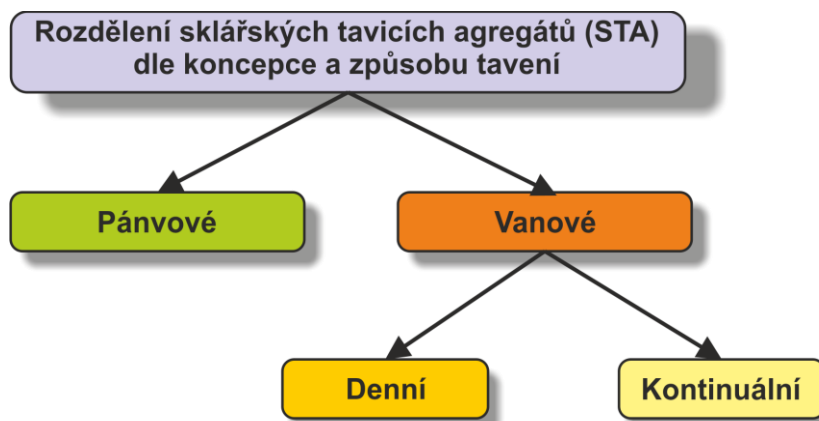
Rekuperace je založena na získávání tepla ze spalin plynulým přestupem tepla přes dělicí stěnu. Obě média (spaliny a spalovací vzduch) jsou od sebe prostorově oddělena. Podle použitého materiálu a konstrukce se rekuperátory dělí na keramické a kovové. Rekuperátory jsou menší, mají nižší požadavky na prostor a nižší stavební náklady. Fungují bez reverzace a všechny hořáky tak pracují současně. Proto mají rekuperační pece stálou teplotu předehřátého spalovacího vzduchu, ale se značně nižší průměrnou teplotou než u regeneračních. Měrná spotřeba tepla na jednotku utaveného skla je tak u rekuperačních pecí vyšší. Výhodou je stabilnější teplota v pecním prostoru, bez výkyvů při reverzací. Předehřátý vzduch lze zahřát na zhruba 500 °C, pomocí dvoustupňových rekuperátorů lze dosáhnout až 800 °C (Unit Melter).

Při porovnání využití systémů je možné použít dat ze začátku nového tisíciletí, kdy celosvětově 75 % všech STA využívalo regenerační systém.

Další možností využití spalin je předehřev střepů, vsázky a kmene, kap. 5.7. Další možností je výroba teplé vody, tlakového vzduchu nebo elektřiny.

7.4 Rozdělení tavicích agregátů

Základním rozdělením STA je na pánvové a vanové (kontinuální, denní), Obr. 7.8.



Obr. 7.8 Rozdělení STA podle koncepce a způsobu tavení

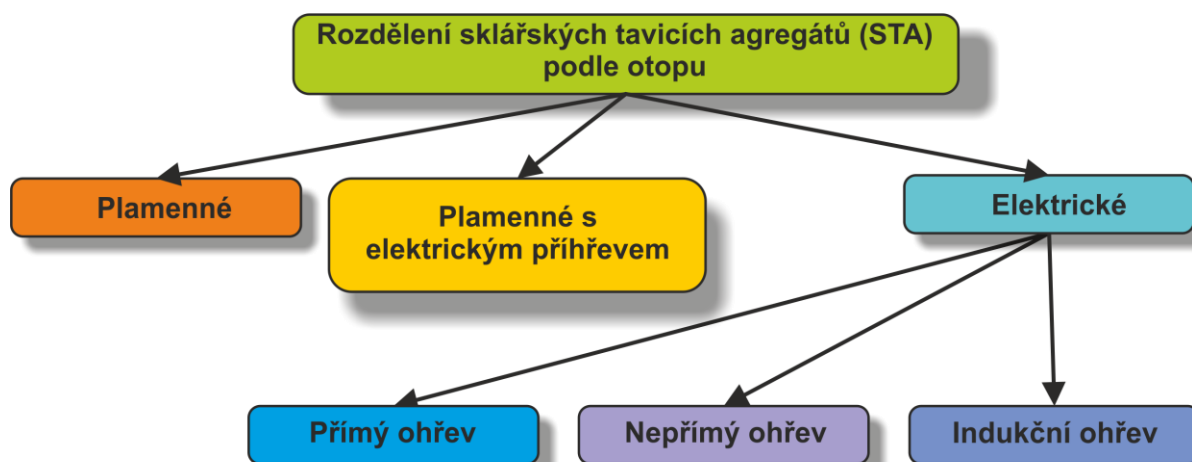
Pro malé objemy výroby se používají **pánvové tavicí pece**, v nichž tavení probíhá periodicky.

Přechodem k pecím vanovým s kontinuálním provozem jsou tzv. **denní vany**, u nichž tavicí cyklus probíhá stejně jako u pecí pánvových.

Pro vysoké tavicí výkony jsou projektovány **kontinuální vany** pracující nepřetržitě. Tyto tavicí agregáty mohou být projektovány na tavicí výkon až do několika set tun utavené skloviny za 24 hodin.

Další možností je rozdělit tavicí agregáty podle **energie používané pro tavení** – rozlišují se pece (Obr. 7.9):

- plamenné (spalující plynná nebo kapalná paliva),
- pece elektrické využívající pro tavení přímý průchod elektrického proudu a
- pece plamenné s elektrickým přehřevem,



Obr. 7.9 Rozdělení STA podle primární energie použité pro tavení

Využití elektrické energie při tavení skla je dáno následujícími možnostmi:

- a) přímý ohřev, využívající průchod elektrického proudu sklovinou, který se uplatňuje u celoelektrických kontinuálních vanových STA, kap. 7.6.2,
- b) nepřímý ohřev, využívající topných spirál umístěných mimo sklovinu, příkladem uplatnění nepřímého ohřevu může být elektrická pánvová pec, kap. 7.5,
- c) indukční ohřev, např. pro tavení křemenného skla v grafitových kelímcích, kap. 7.11.3.

7.5 Tavení v pánvových pecích

Pánvové tavicí pece pracují periodicky a jednotlivé fáze tavicího procesu se tak postupně střídají. Hlavní předností je jejich variabilita a operativnost provozu při změnách druhů skloviny, jejich barevnosti a fyzikálně chemických vlastností skloviny, dále možnost tavby malého množství skloviny. Pece mohou mít různé velikosti, které jsou dány počtem pánví v nich umístěných. Lze se setkat s pecemi jedno- nebo dvoupánvovými, ale počet pánví je často v rozmezí 8 až 12. Tavení v pánvových pecích je používáno především při ruční výrobě.

Pánvové pece je možné dělit pomocí několika kritérií. Jedním z nich může být rozdělení podle energie na otop na:

- plamenné (spalující plynná paliva vzduchem nebo kyslíkem) a
- elektrické (s nepřímým ohřevem pomocí kanthalových spirál).

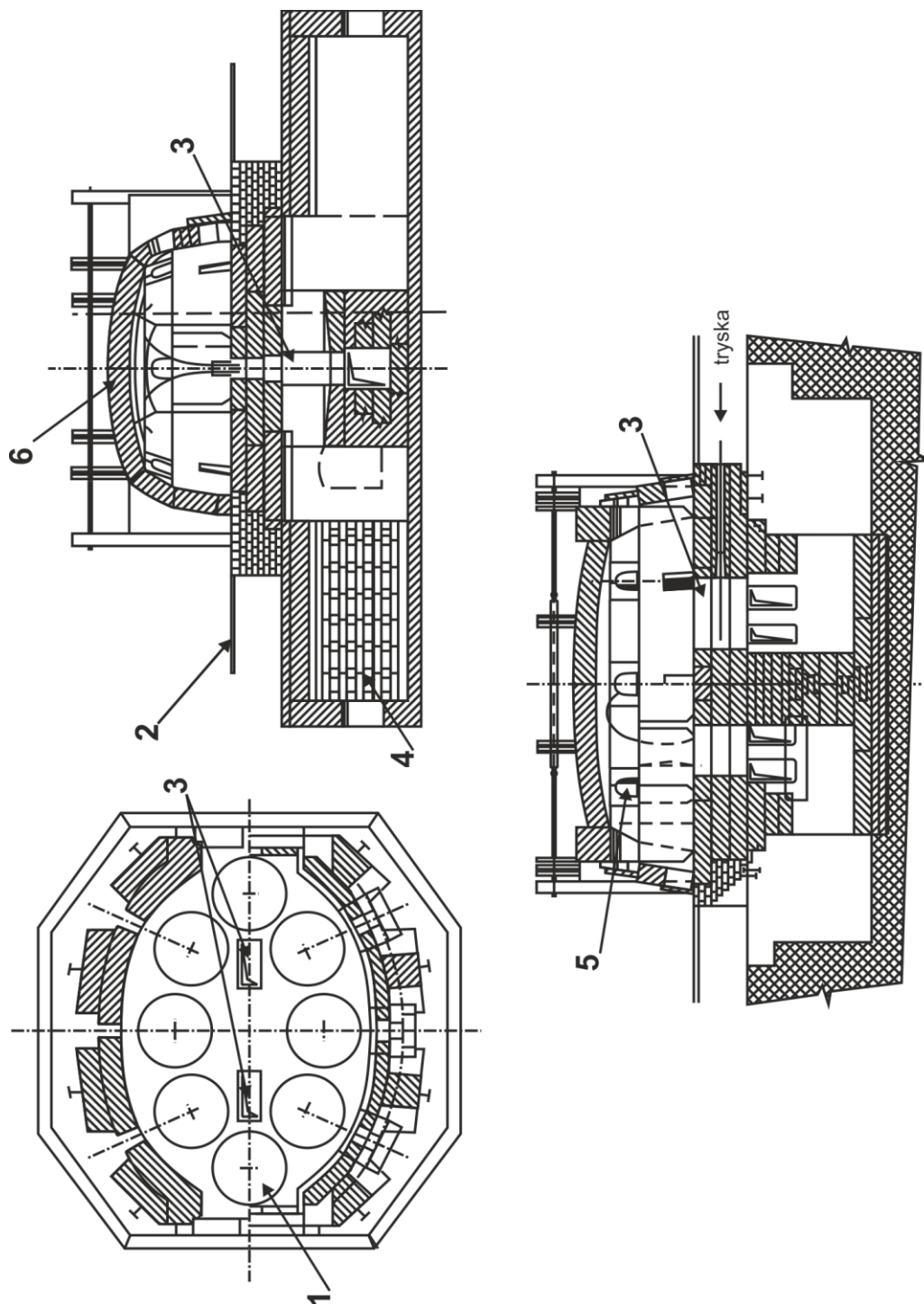
Plamenné pece jsou vybaveny předeřevem spalovacího vzduchu, a to buď regeneračním s reverzací směru hoření nebo rekuperačním s konstantním směrem plamene, kap. 7.3.2. Dále jsou vybaveny tzv. skelnou jímkou, která může být teplá (Siemens-Siebertova pec) nebo studená. V praxi do jímký stéká sklo z případně prasklých nebo jinak poškozených pánví, při odběru a podobně.

Nejstarší koncepcí plamenné pece, která je stále používána, je dolnoplamenná pec Siemens-Siebert. Pec pojme 8 až 12 pánví, podle konstrukční velikosti. Její vývoj začal již v 2. polovině 19. století, kdy byla nejrozšířenější pro výrobu tabulového a obalového skla. Schéma této pece v novodobém pojetí je na Obr. 7.10.

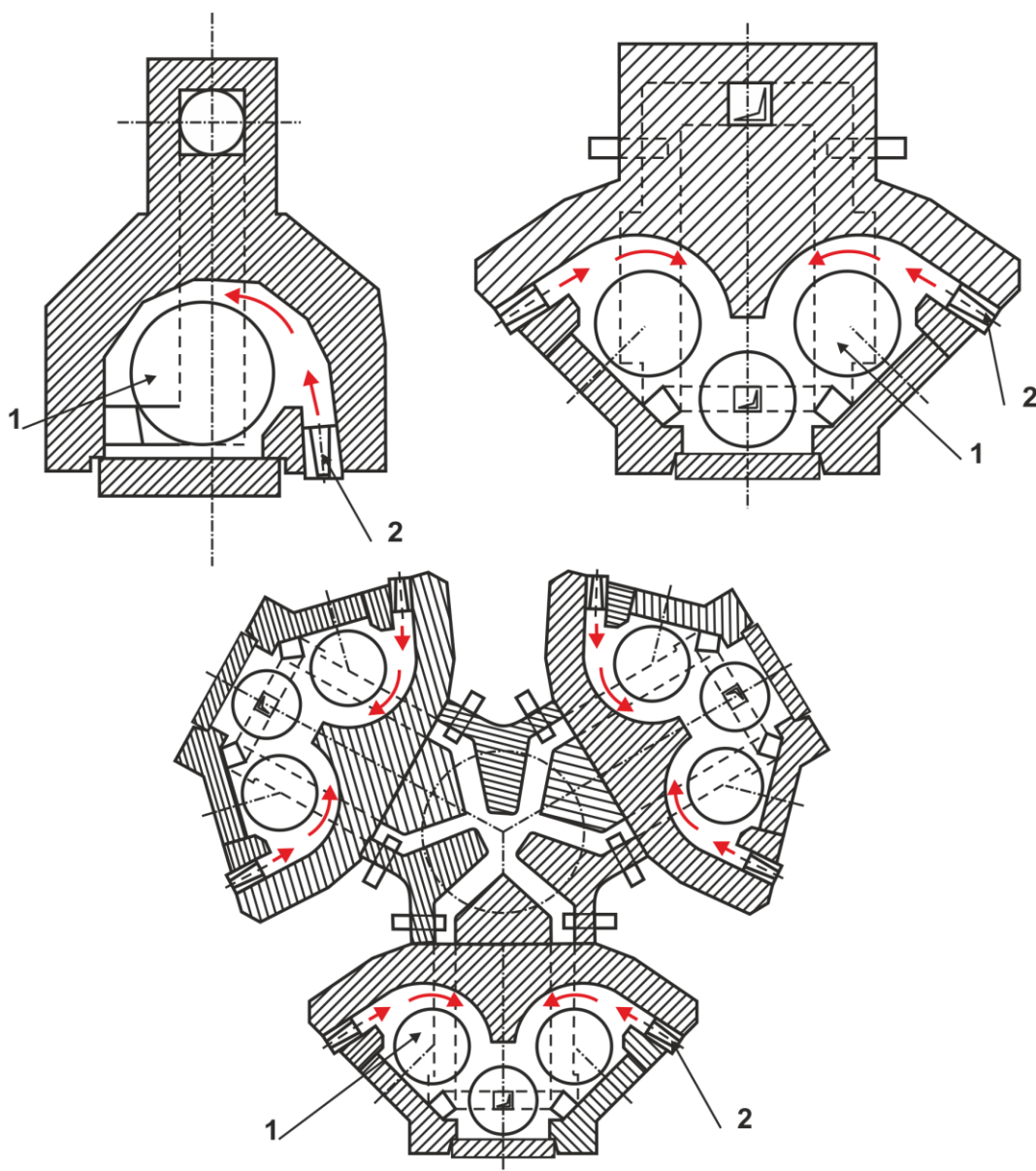
Novější jsou hornoplamenné pece, kde jsou hořáky umístěny nad hranou pánve. Rozeznávají se pece s přímým vedením plamene a pece s dvojitým U-plamenem. Pece jsou používány pro 3 až 8 pánví.

Tangenciální pánvové pece jsou nejnovějším typem. Byly vyvinuty a průmyslově uplatněny na konci 20. století. Pánve mají v této peci vyrovnané teplotní pole, což vede k dosažení vyšší kvality tavené skloviny. V peci je jedna až tři pánve o průměru 1 100 mm a výšce 700 mm, které jsou použity buď samostatně, nebo jako stavební moduly čtyř až devíti pánvových pecí, Obr. 7.11. Otop je zajištěn dvěma krátkoplamennými nízkotlakými hořáky umístěnými nad sebou v oblasti dna a horního okraje pánve. Odtah spalin je na druhé straně v podlaze pece. Spaliny jsou vedeny přes kovový rekuperátor do komína.

V poslední době se také začínají objevovat plamenné pánvové pece používající ke spalování kyslík, více v kap. 7.7.



Obr. 7.10 Řezy dolnoplamennou regenerační pecí typu Siemens-Siebert: 1 – pánev, 2 – pracovní podium (tzv. verkstatt, z německého werkstatt), 3 – hořákové vlety, 4 – regenerátor, 5 – pracovní otvor pro nabírání skloviny z pánve, 6 – klenba pece

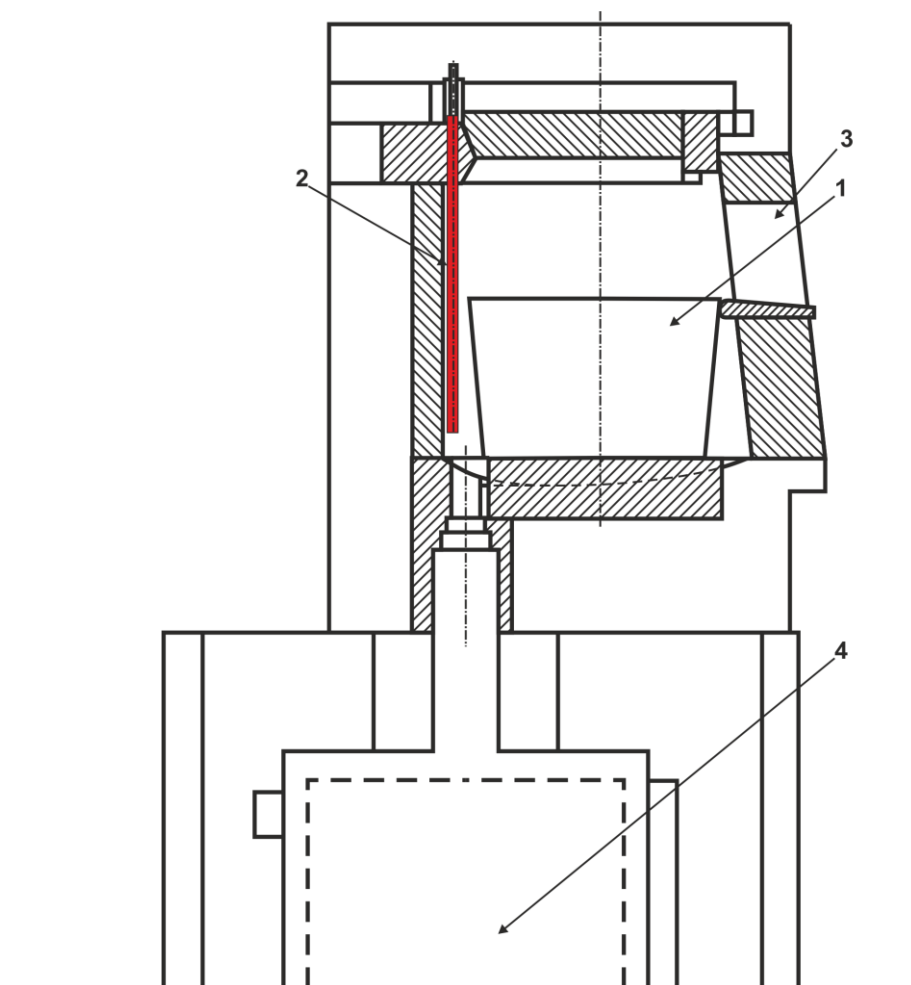


Obr. 7.11 Půdorysy některých tvarových alternativ tangenciálních pánvových pecí: 1 – pánev, 2 – hořák, červenými šipkami vyznačen směr plamene

Elektrické pánvové pece jsou otápěny nepřímo, odporově, pomocí topných spirál ze slitiny KANTHAL SUPER⁸, což jsou vysoce výkonné elektrické topné elementy s dlouhou životností pro velmi vysoké teploty. Vyrábějí se jako hotové elementy mnoha tvarů a velikostí, rovné či ohýbané v celé široké škále standardních i speciálních provedení. Konstrukce pánvové pece s těmito topnými elementy je uvedena na Obr. 7.12. Topných elementů je v peci více, jsou zavěšeny svisle a často jsou uspořádány kolem pánve

⁸ KANTHAL SUPER je hutný keramický materiál složený z MoSi_2 a složky oxidů, převážně skleněné báze, který odolává oxidaci při vysokých teplotách.

vyjma čelní partie. Ohřev skloviny je přes pecní atmosféru spolu s radiační složkou přenosu tepla.



Obr. 7.12 Elektrická odporová pánvová pec: 1 – pánev, 2 – topná spirála z materiálu KANTHAL SUPER, 3 – pracovní otvor pro nabírání skloviny z pánve, 4 – skelná jímka

Elektrické pánvové pece se dobře řídí a tavicí proces je možné do jisté míry také automatizovat. Na druhou stranu je oproti plamenným pecím jejich provoz dražší. Jejich konstrukce je taková, že vždy jedna pánev je umístěna v jednom samostatně otápěném prostoru. Každá pánev je proto autonomní a umožňuje uskutečnit tavicí režim zcela nezávisle na sousední pánvi.

7.6 Tavení ve vanových pecích

Vanové pece vznikly vývojem a nároky nových hromadných technologií výroby. Nejdříve byly uplatňovány denní vany, které fungují na periodickém principu tavení, stejně jako pánvové pece. Objemy utavené skloviny jsou ale větší. Tento typ pece je dnes používán jen výjimečně pro objemy skloviny nad produkčními možnostmi pánvových pecí a pod produkčními možnostmi kontinuálních van.

U vanových kontinuálních pecí probíhají jednotlivé fáze tavicího procesu současně, ale na různých místech tavicího agregátu. Hlavními výhodami jsou nízké výrobní náklady, nižší emise a nižší spotřeba energií na jednotku utavené skloviny a možnost hromadné výroby. Jejich stavba, provoz a řízení vyžaduje vysoký stupeň odbornosti.

Kontinuální STA zahrnují širokou škálu zařízení na tavení skloviny, jejich velikosti se často uvádějí v množství vyprodukovaného skla za den, tedy v tunách za 24 hod. Lze se setkat s agregáty s výrobou od několika tun denně (například pro komponenty skleněné bižuterie) až po 1 000 tun/den (výroba plochého skla technologií plavení na roztavené cínové lázni – FLOAT). Podle objemů lze velmi hrubě rozdělit pece takto:

- příčně plamenné regenerační tavicí agregáty jsou velkokapacitní zařízení, s výkony nad 300 tun/den,
- U-plamenné regenerační tavicí agregáty mívají střední výkony, 100 až 300 tun/den,
- rekuperační UM (unit melters), U-plamenné regenerační a celoelektrické tavicí agregáty (nízkokapacitní zařízení i na úrovni 3 tun/den, častěji 25 až 100 tun/den).

Provedení sklářských tavicích agregátů s kontinuálním provozem vykazuje řadu specifických prvků, podle kterých je možno STA rozlišovat. Podle konstrukce lze kontinuální vanové STA rozdělit na pece jednoprostorové, dvoupřestorové a zvláštní. Jednopřestorové patří spíše do historie. Současné STA jsou stavěny vesměs jako dvoupřestorové se zřetelným oddělením části tavicí a části pracovní.

Jedno ze základních rozdělení je podle energie použité pro tavení (kap. 7.4) na kontinuální STA plamenné, elektrické s přímým ohřevem (celoelektrické) a plamenné s elektrickým přehřevem. Toto rozdělení je použito v následujícím textu.

7.6.1 Kontinuální STA plamenné

Kontinuální vanové plamenné pece se v provedení velmi liší. Záleží na mnoha faktorech, podle kterých je navržena optimální varianta STA. Podle toho je možné také plamenné kontinuální STA rozdělit, Obr. 7.13.

Otop plamenných pecí může být proveden plynými nebo kapalnými palivy, případně jejich kombinací. V ČR jsou nejvíce rozšířeny plamenné pece na plyná paliva, prakticky výhradně na zemní plyn⁹. Kapalná paliva jsou používána ve Francii, v zemích Beneluxu a v dalších. Používá se především lehkých topných olejů, které mají o něco vyšší výhřevnost než zemní plyn, ale tavení na nich vychází kvůli jednotkové ceně draž.

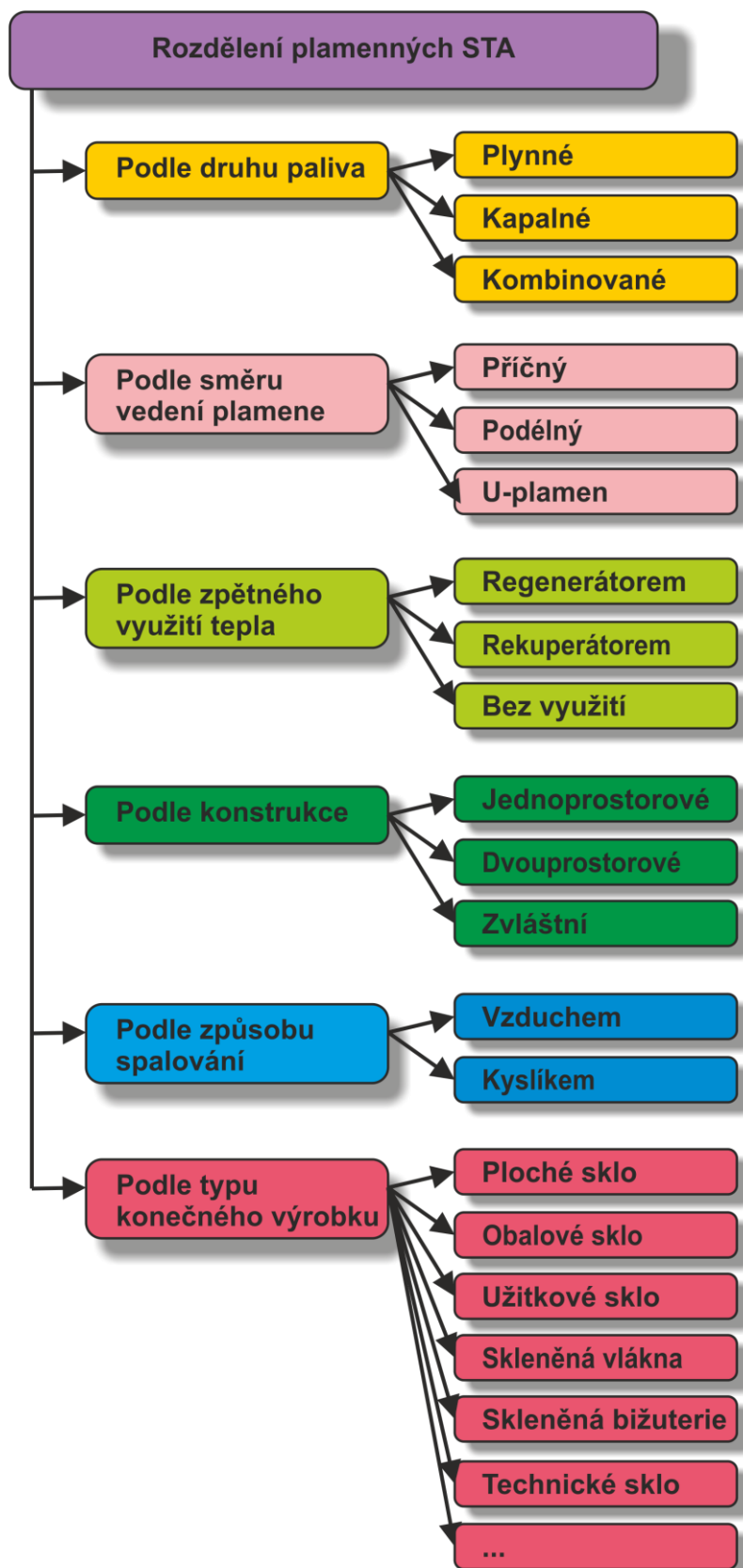
U plamenných pecí se lze setkat s různým směrem vedení plamene vůči proudící sklovině. Rozlišuje se plamen:

- příčný,
- podélný nebo

⁹ Hlavní složkou zemního plynu je metan, CH₄.

- U-plamen.

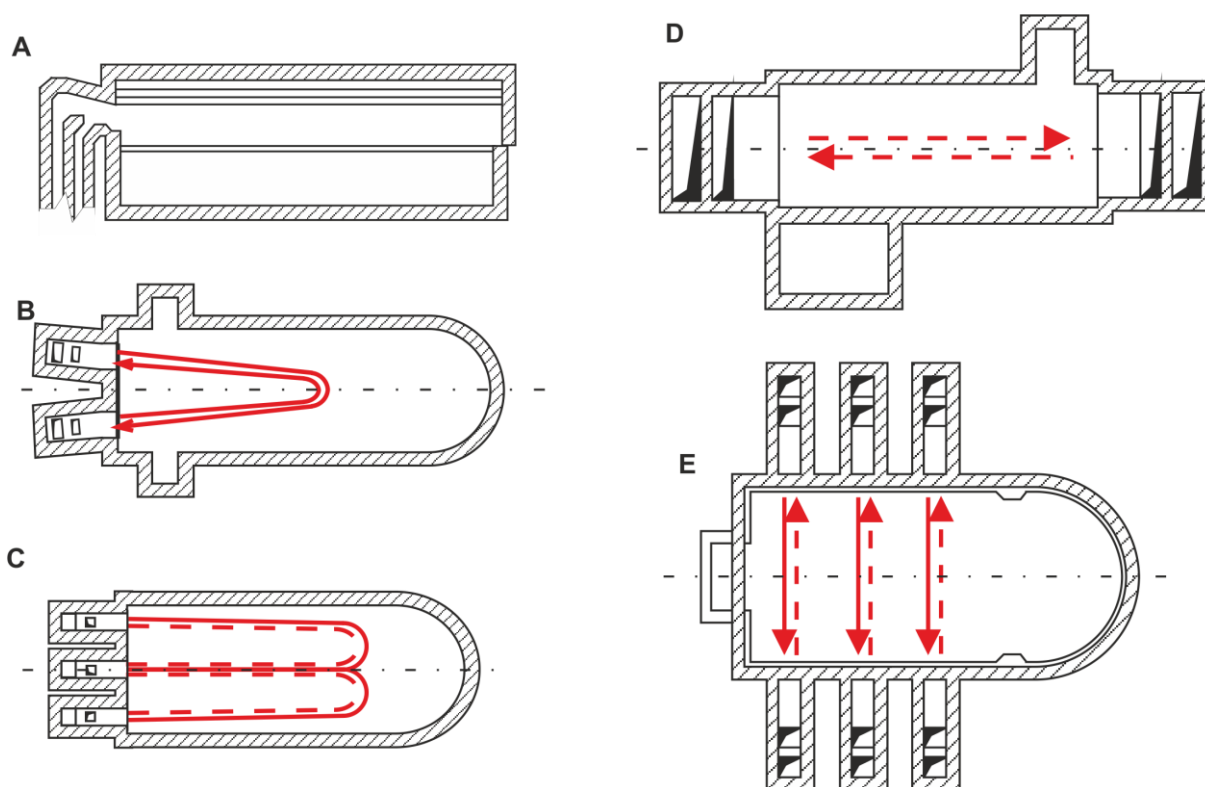
Některé typy tavicích pecí jsou schematicky znázorněny na Obr. 7.14.



Obr. 7.13 Rozdělení plamenných STA

Zužitkování odpadního tepla spalin se týká pecí plamenných, využívajících ke spalování vzduch. Bývají vybaveny systémem regenerace nebo rekuperace pro zpětné využívání tepla odcházejících spalin, kap. 7.3.2.

Plamenné pece využívají pro spalování paliva vzduch nebo kyslík. Spalování kyslíkem přináší některé výhody, kap. 7.7.



Obr. 7.14 Vybrané typy kontinuálních STA: A – podélný řez regenerační pece s vodorovným U-plamenem, B – půdorys pece z obr. A, C – půdorys regenerační pece s dvojitým U-plamenem, červenými šipkami vyznačen směr plamene, D – půdorys regenerační pece s podélným vedením plamene, E – půdorys regenerační pece s příčným vedením plamene

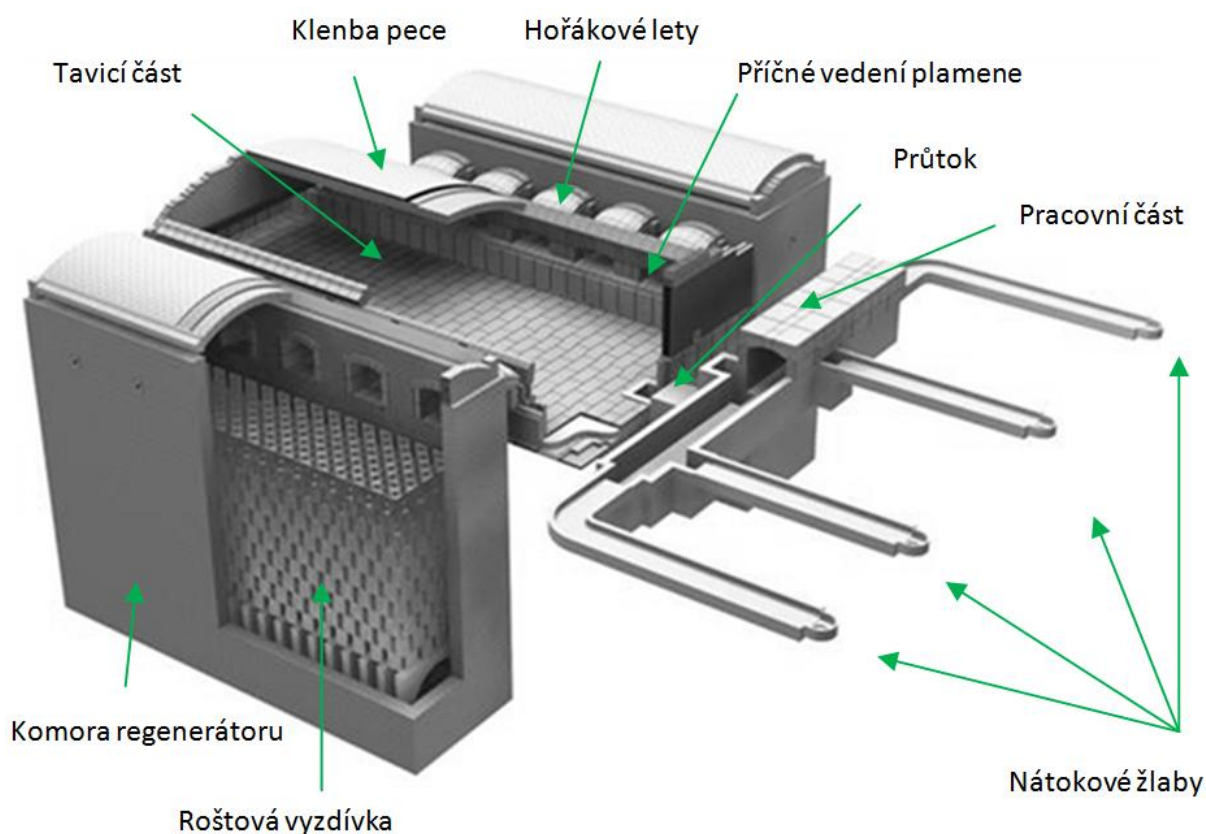
Plamenné STA jsou nejčastěji regenerační a s vedením plamene příčně nebo s U-plamenem. Pohled do příčně plamenné regenerační pece je zobrazen na Obr. 7.15. K plamenným STA patří také zmíněný rekuperační UM.

Příčně plamenné pece (Obr. 7.16) se využívají především při výrobě plochého a obalového skla a mají rozměrné regenerační komory (většinou vertikální) po obou stranách tavicí části, kap. 7.3.2. Ve spodní části komor jsou vstupy do odtahových kanálů, které se setkávají a vedou do komína. Vzduch pro spalování je přiváděn přes vyložení v komorách do vletů, v jejichž vyústění se mísí ve stanoveném poměru s palivem. Příčně plamenné pece mají proto stejný vstup vzduchu pro spalování paliva, jako výstup pro plyny uvolněné spalováním. K hoření tak dochází jedním směrem a vlety na opačné straně slouží jako odtah, který přivádí spaliny do regeneračních komor. Po určité době (20 až 30 minut) dojde

k tzv. reverzaci, kap. 7.3.2. Na každé straně může být jedna společná regenerační komora pro všechny vlety nebo dělená na jednotlivé regenerační komory pro každý vlet zvlášť.



Obr. 7.15 Pohled do příčné plamenné regenerační pece



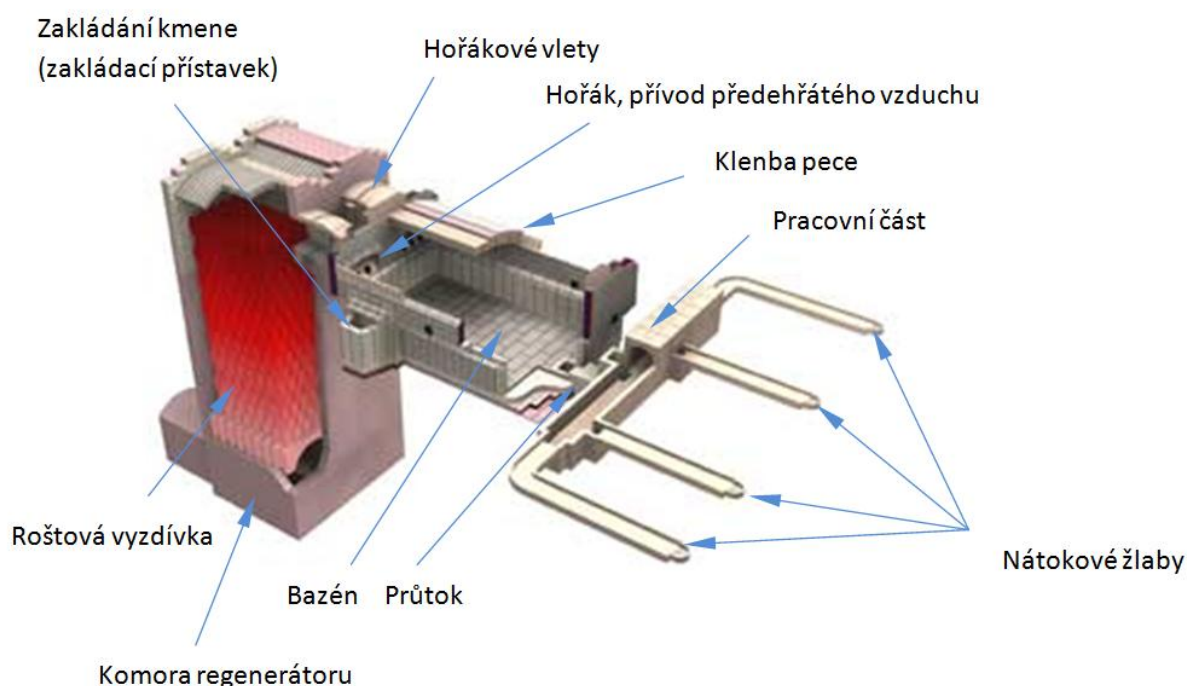
Obr. 7.16 Schéma stavby regeneračního STA s příčným plamenem a společnou regenerační komorou pro všechny vlety (zdroj: Toledo Engineering Co., Inc., TECO)

Samotné tavení sklářských surovin probíhá účinkem sálavého tepla plamenů a radičního tepla z klenby a bočních stěn. Podle velikosti pece je na každé straně 2 až 8 vletů. Vlety mají jeden nebo více hořáků a mohou používat plyn nebo topný olej. Kovové hořáky mohou být umístěny buď v bocích vletů, pod zaústěním vletů do pece, nad vletem nebo vloženy ve středu vletů přes jejich dno nebo klenbičku, kap. 7.10.

Bazén pece je pravoúhlý o velikosti závislé na požadovaném tavicím výkonu. Poměr délky k šířce se obvykle pohybuje v rozmezí od 1,5 do 2,3, hloubka pece je závislá na typu pece a jejím určení. Je tendence stavět bazény hlubší pro zvýšení tavicího výkonu, ale třeba pro tmavé barvy skla jsou hloubky nižší. V případě výroby plochého skla se pohybuje hloubka bazénu kolem 1 500 mm, plocha bazénu je i přes 500 m².

Konstrukční uspořádání příčně plamenné pece umožňuje oproti U-plamenné peci v podélné ose snadnější nastavení teplot. Na druhou stranu mají tyto pece vyšší měrnou spotřebu tepla, a to vzhledem k poměrně většímu povrchu. Například u běžného sodnovápenatého plochého skla je dosahováno měrné spotřeby na utavení 1 kg skloviny kolem 4 800 kJ/kg.

U-plamenné regenerační pece (Obr. 7.17) pracují s plamenem, který se v peci stáčí do písmene U. Pece jsou obvykle menší, mají dva velké vlety umístěné v přední stěně a zakladače kmene jsou na jedné nebo obou stranách pece v blízkosti hořáků. Regenerátory mohou být horizontální (obvykle umístěné pod vanou) nebo vertikální (umístěny za vanou), případně jejich kombinace a mohou být i vícetahové.



Obr. 7.17 Schematický řez U-plamennou pecí pro výrobu obalového skla (zdroj: Toledo Engineering Co., Inc., TECO)

Hlavní uplatnění těchto pecí je při výrobě obalového skla. Tento typ pecí je citlivý na správné nastavení tahových a tlakových podmínek v pecním prostoru tak, aby bylo dosaženo správného tvaru plamene. Nesprávné poměry těchto podmínek vedou k rychlému opotřebení pece nebo až k její destrukci. Vstup paliva do pecního prostoru je zajišťován kovovými hořáky, které mohou být situovány, stejně jako u příčně plamenné pece, pod nebo nad zaústěním vletu, v jeho boku, případně i přes vložený hořák do středu vletu. V každém vletu může být více hořáků.

U-plamenné pece bývají méně štíhlé než pece příčně plamenné a poměr jejich délky k šířce se pohybuje v rozmezí od 1,2 do 2,0. Hloubka bazénu se pohybuje podle barvy, složení skloviny a závislosti na tavicí ploše v rozmezí od 600 do 1 600 mm. Velikost tavicí plochy se pohybuje od 25 do 125 m² s denním tavicím výkonem vyšším než 400 tun/den. Palivem je zemní plyn nebo topný olej.

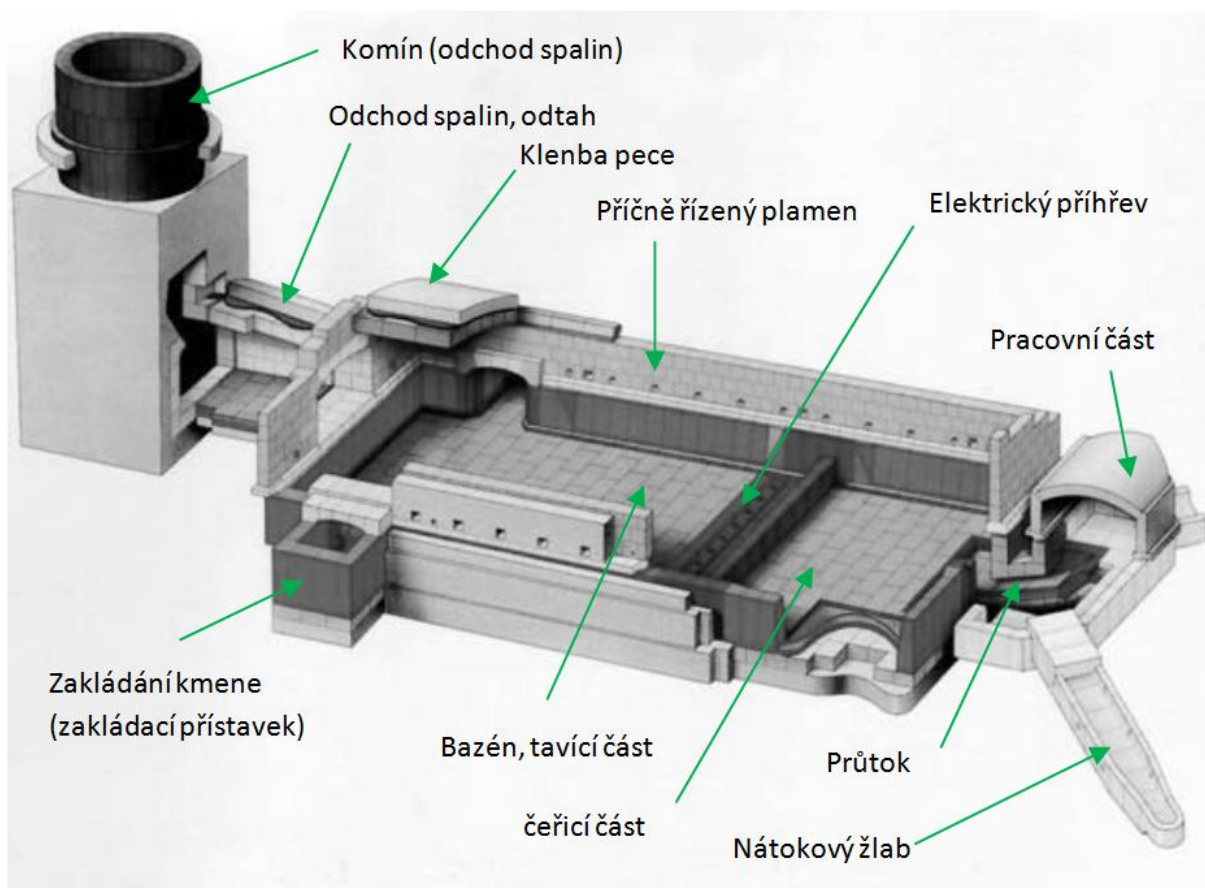
Stavební náklady na U-plamennou pec jsou nižší než na srovnatelnou příčně plamennou pec v důsledku snížení objemu zdiva a vyložení regeneračních komor. Tyto pece mají menší vnější plochu a tedy i nižší tepelné ztráty do okolí. Relativně delší dráha plamene přináší velmi dobrý přenos tepla, proto mají tyto pece ve srovnání s příčně plamennými nižší měrnou spotřebu energie na tavení. Pro běžné sodnovápenatokřemičité lahvové sklo je možno dosáhnout až 3 600 kJ/kg.

Rekuperační pece jsou osazeny rekuperátory (kap. 7.3.2) pro využití odpadního tepla. Kontinuální přehřívání spalovacího vzduchu (někdy i plynu) rekuperátory při stálém směru proudění spalin a přehřívání média zajišťuje stabilnější podmínky v pecním prostoru bez výkyvů při reverzaci. Na druhou stranu průměrná teplota přehřívání média je nižší než u regeneračních pecí, proto je měrná spotřeba plynu u rekuperačních pecí vyšší. V některých případech je zbytkové teplo po průchodu rekuperátorem ještě dále využíváno (výroba teplé vody, tlakového vzduchu nebo elektřiny). Příkladem rekuperační pece je např. Unit Melter, Obr. 7.18.

Tyto pece jsou otápěny soustavou hořáků, které jsou rozmístěny podél každé boční stěny. Topný systém je rozdělen do více zón podél délky pece, aby bylo umožněno lepší řízení teplotního profilu v podélné ose. Spaliny jsou odváděny jedním nebo dvěma odtahovými kanály v přední části pece a jsou vedeny do jednoho či dvou kovových rekuperátorů a odtud do komína.

Unit Meltery jsou konstruovány pro široké rozmezí výkonu od 3 do 350 tun/den s tavicí plochou až do 160 m². Jsou vhodné pro veškeré běžné typy skel a používaným palivem je zemní plyn nebo topný olej. Měrná spotřeba tepla pro běžné sodnovápenatokřemičité sklo se pohybuje nad hranicí 5 000 kJ/kg.

V poslední době se uplatňují také kontinuální vany, které jsou z části nebo úplně otápěny spalováním plynu kyslíkem. Uvádí se, že pece jsou úspornější, rychlejší, ohleduplnější životnímu prostředí atd., ale je třeba počítat s vícenáklady na dodávku nebo výrobu kyslíku, více v kap. 7.7.



Obr. 7.18 Schéma rekuperační pece Unit Melter

7.6.2 Kontinuální STA celoelektrické

Kontinuální tavení skla přímým průchodem elektrického proudu sklovinou umožňuje přítomnost iontů alkalických kovů, především Na^+ a K^+ . Jak již bylo zmíněno v kap. 3.8.1, jedná se o iontovou vodivost, která roste se zvyšující se teplotou.

Výhody celoelektricky otápěných pecí:

- velmi efektivní využití přivedené elektrické energie,
- vývin tepla přímo ve sklovině,
- velmi dobré řízení a regulace procesu tavení,
- sklovina je dobře izolována „dekou“ sklářského kmene,
- spotřeba energie v celoelektrické tavicí peci je zhruba poloviční ve srovnání s pecí otápěnou standardním palivem (plyn-vzduch), spotřeba na utavení běžné sodnovápenatoborité skloviny je 2,8 až 2,9 MJ/kg (průměrně 80 až 85 % energie),
- díky zakrytí hladiny skloviny tzv. dekou jsou minimalizovány emise, především oxidů dusíku (NO_x),
- není řešena problematika regenerace a rekuperace, takže z tohoto pohledu jsou celoelektrické pece jednodušší.

Hlavní nevýhodou celoelektrického tavení je cena elektrické energie, takže celkově je tavení skla v celoelektrických STA dražší.

7.6.2.1 Základní principy

U celoelektrického tavení se využívá skutečnosti, že po roztavení se sklovina stává dobrým vodičem elektrického proudu. Při průchodu elektrického proudu obvodem, ve kterém sklovina tvoří odporový prvek, se v souladu s Jouleovým zákonem generuje teplo:

$$P = R \cdot I^2 = U \cdot I = U^2 / R, \quad (7.25)$$

kde P je tepelný výkon [W],

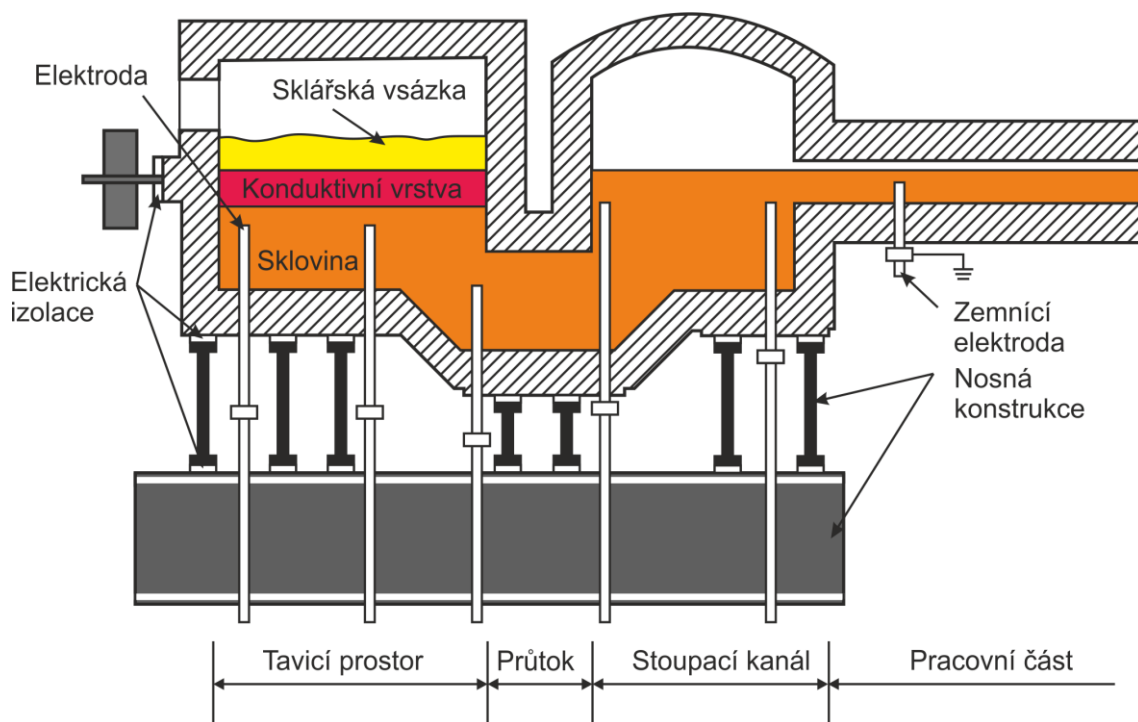
R - elektrický odpor vodiče [Ω],

I - intenzita elektrického proudu [A],

U - elektrické napětí [V].

Tavení skloviny v celoelektrických sklářských tavicích pecích je komplexním technologickým procesem, pro jehož úspěšné zvládnutí je nezbytná znalost nejen elektrických vlastností skla (skloviny) daného chemického složení, ale také termomechanických vlastností a viskozity včetně jejich teplotních závislostí.

Vany jsou většinou konstruovány jako hlubinné, tedy oproti plamenným vanám probíhá tavicí proces vertikálně, příklad je na Obr. 7.19.



Obr. 7.19 Schéma kontinuální STA s celoelektrickým tavením

Na rozdíl od tavení skloviny v plamenných pecích je při aplikaci Jouleova principu sklářská vsázka otápěna zespodu, a proto se liší také podmínky tavení. Nejteplejší sklovina se nenachází na povrchu lázně, ale uvnitř tzv. konvektivní vrstvy. V oblasti se zakrytou hladinou skloviny vrstvou sklářského kmene (tzv. "dekou") se utváří struktura zobrazená na obr. Obr. 7.20. Pod vrstvou sypké sklářské vsázky tloušťky 50 - 300 mm se nachází tzv. krusta, což je vrstva čerstvě utavené skloviny s vysokým obsahem bublinek a zbytků pískových zrn. Tato vrstva tvoří nejen fyzické, ale také teplotní rozhraní mezi roztavenou sklovinou a sklářským kmenem, neboť vysoká hustota rozptýlujících částic v ní obsažených z ní vytváří neprůhlednou, opakní clonu bránící úniku tepla radiací do sklářské vsázky a následně nad vsázku.

<i>Vrstva</i>	<i>Tloušťka</i>	<i>Teplota</i>
Sklářská vsázka	50-300 mm	100-150 °C
Krusta	5 (3) mm	
Vrstva čerstvě utavené skloviny s vysokým obsahem bublinek a zbytků pískových zrn		
Konduktivní vrstva	100-150 mm	1000-1100°C
Vrstva vertikálně neproudící taveniny, horší optická čistota		
Konvektivní vrstva Odlišné podmínky tavení proti plamenným pecím: - sklářská vsázka je otápěna zespodu, - nejteplejší sklovina je uvnitř konvektivní vrstvy, nikoliv na povrchu		

Obr. 7.20 Vertikální struktura v celoelektrické peci při zakryté hladině skloviny vrstvou sklářské vsázky

Pod krustou se vytváří vrstva vertikálně neproudící taveniny s relativně vysokou viskozitou označovaná jako "konduktivní vrstva". Protože se v této vrstvě neuplatňuje sdílení tepla konvekcí a intenzita sdílení tepla radiací je navíc limitována horší optickou čistotou, je průměrná tepelná relativní vodivost v této vrstvě velmi nízká, pohybující se, v závislosti na tloušťce vrstvy (50 – 150 mm), mezi 2,5 a 15 W·m⁻¹.

V konvektivní vrstvě, kde je teplota skloviny nejvyšší, dochází k proudění skloviny. Při relativně homogenním vybavování energie ve vaně má proudění charakter válců.

Tloušťka konduktivní vrstvy není po celé ploše konstantní. V důsledku toho dochází v oblasti vzestupného proudění k lokálnímu ztenčování konduktivní vrstvy na zhruba 50 mm, naopak v oblastech sestupného proudění k nárůstu tloušťky konduktivní vrstvy o 50 – 100 mm. Narušení homogenity tloušťky konduktivní vrstvy vede ke vzniku tzv. úkapů – uvolnění

části konduktivní vrstvy, jejímu propadu ke dnu, v jehož důsledku dochází k lokálnímu poklesu teploty v oblasti konvektivní vrstvy.

Ve sklovině jsou generovány bubliny, které se hromadí v teplé oblasti nad vzestupným prouděním. Při slabé a nesouvislé vrstvě odcházejí plyny celým povrchem vsázky. V případě tlustší krusty, případně konduktivní vrstvy, dochází k výraznější koncentraci plynů pod krustou, vytvoření velkých bublin, nadzvednutí krusty a vytvoření tzv. vývaru. V krajním případě nepropustné krusty může dojít k vytvoření souvislé plynové vrstvy pod izolující vsázkou, jejíž vznik je doprovázen vývojem pěny na povrchu.

7.6.2.2 Elektrody

Pro tavení je využíváno výhradně střídavého napětí, a to z důvodu potlačení elektrolyzy. Střídavý proud je zaváděn do skloviny pomocí elektrod. Požadavkem na materiál a provedení elektrod je korozní odolnost proti roztavené sklovině a vysoká žárovzdornost.

Nejčastějším materiálem elektrod je molybden¹⁰. Elektrody jsou vyráběny tyčové (průměr 31,7 mm, 50,8 mm, 101,6 mm a další) nebo také méně často deskové. Elektrody se ve sklovině rozpouští, což je kompenzováno posuvem tyčí do pece o několik milimetrů měsíčně, v závislosti na podmínkách tavení a chemickém složení skloviny. Elektrody jsou používány do teplot 1 600 °C, povrchová proudová hustota je uváděna 2 – 3 A·cm⁻². Negativně se projevuje jejich redukční účinek na sklovinu (např. olovnatý křišťál). Pro potlačení tohoto účinku se využívá anodické nebo frekvenční ochrany.

Dalším materiálem pro výrobu elektrod je sintrovaný SnO₂ (nejvyšší oxidační stupeň Sn⁴⁺, nemá redukční účinky) a používá se do teplot 1 450 °C. Oproti molybdenovým elektrodám lze prakticky využít jen desetinou povrchovou proudovou hustotu, okolo 0,2 A·cm⁻². Elektrody jsou tak ve srovnání s molybdenovými větší průměry. Jsou také náchylnější na praskání při tepelném šoku.

Platina a její slitiny (především PtRh s množstvím Rh do 40 %) jsou používány u řízených výtokových dávkovačů, tzv. homogenizátorů (kap. 8.3.2). Jednou z alternativ využívání těchto homogenizátorů je ohřev skloviny přímým průchodem elektrického proudu nízkého napětí platinovým pláštěm homogenizátoru.

Historicky se používaly elektrody grafitové, ale ty měly silný redukční účinek na sklovinu, špatnou smáčivost povrchu sklovinou, velké přechodové odpory při přestupu elektrického proudu z elektrod do skloviny a nízkou proudovou hustotu.

Elektrody jsou u celoelektrických STA uspořádány vodorovně z boku (i několik řad), ze dna anebo šikmo, což je používáno zřídka. Elektrody mohou být tzv. hladinové, kdy elektrody jsou zasunuty do skloviny přes hladinu shora. Velmi důležitým zařízením jsou držáky elektrod, které jsou obvykle chlazené a umožňují posouvání elektrod v průběhu tavení tak, jak dochází ke korozi elektrod.

¹⁰ Teplota tání Mo je 2 623 °C, má velkou elektrickou a tepelnou pevnost, malé měrné teplo a součinitel teplotní roztažnosti

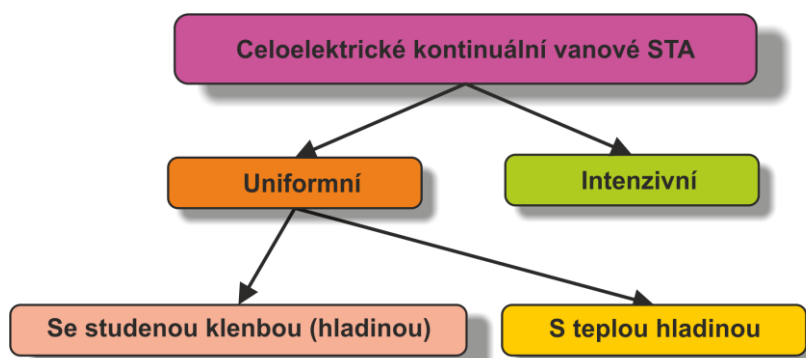
Elektrody mohou být napájeny jedno, dvou nebo nejčastěji třífázově. Vzhledem k tomu, že sklovina vykazuje zápornou charakteristiku její teploty na měrném elektrickém odporu, s rostoucí teplotou klesá odpor skloviny (tepelná nestabilita nebo také deregulační efekt, kap. 3.8.1). K potlačení tohoto efektu musí být napájení zdrojů regulováno na konstantní proud nebo impedanci. Jako napájecí zdroje elektrických STA se nejčastěji používají transformátory s odbočkami (skoková změna) a indukční regulátory (označované jako Varivolt s plynulou regulací v zátěži).

Regulace příkonu se provádí podle odporu mezi elektrodami, podle teploty (ve sklovině nebo na klenbě), podle tloušťky vrstvy vsázky nebo se při konstantním odběru udržuje konstantní příkon.

U elektrod dochází ke korozi, kterou je nutné minimalizovat. Na korozi se podílí několik faktorů. Nejvýznamnějším je oxidace materiálu elektrod složkami skloviny, která vzrůstá s teplotou. Oxidaci ovlivňuje také proudová hustota, frekvence střídavého proudu a složení elektrod. K ochraně elektrod je tak třeba omezit působení zmíněných faktorů, jako je složení skloviny, nastavit vhodnou proudovou hustotu a frekvenci proudu. U molybdenových elektrod při tavení olovnatých sklovin je třeba elektrochemické ochrany, která se provádí změnou potenciálu nebo frekvence topného proudu. Dále je možné provádět anodickou pasivaci stejnosměrným proudem, katodickou ochranu, jejich kombinace a nízkofrekvenční ochranu.

7.6.2.3 Celoelektrické STA

Přes existenci řady konstrukčních alternativ vyskytujících se v provozní praxi, lze většinu celoelektrických STA zařadit do dvou skupin: uniformní a intenzivní, Obr. 7.21.

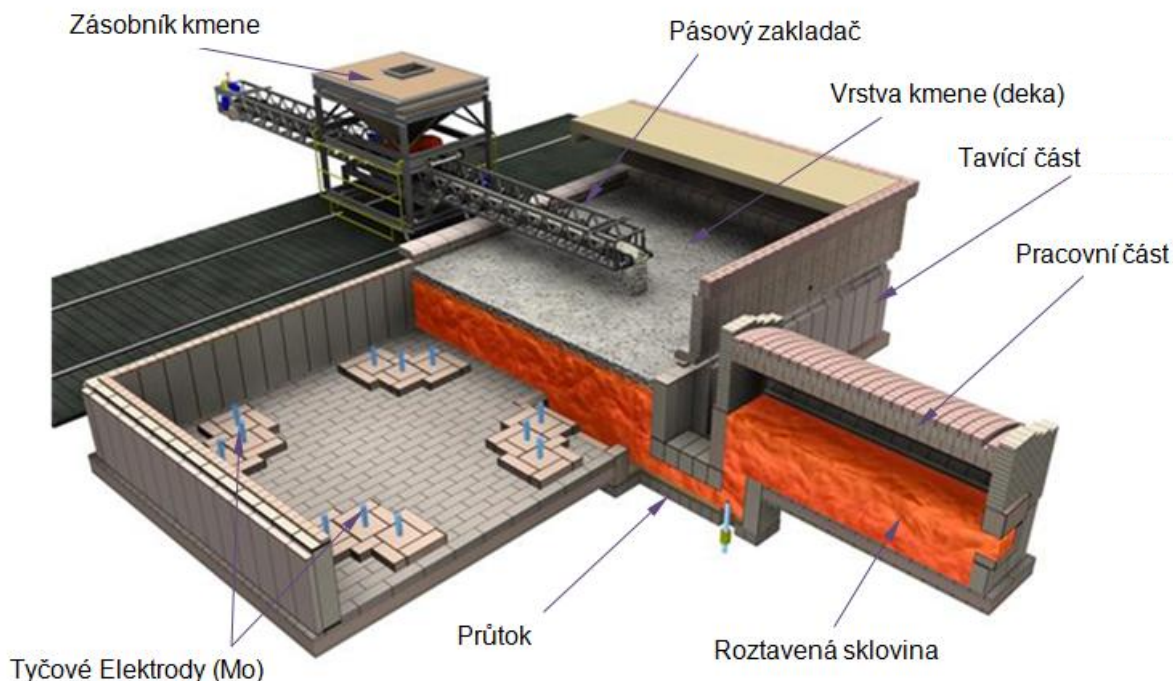


Obr. 7.21 Rozdělení celoelektrických kontinuálních STA

Ve sklárnách se až na výjimky v oblasti výroby skleněných vláken vyskytují tzv. uniformní STA ("Uniform Melters"), které mají elektrody umístěny a dimenzovány tak, aby bylo zajištěno symetrické vybavování energie ve sklovině. V těchto pecích je systematicky minimalizován výskyt horkých míst a konvektivních toků, které by vznikaly nerovnoměrným ohřevem skloviny. Spotřeba energie může být u těchto typů STA i pod 3 000 kJ/kg.

Nejčastěji jsou používány **vany se studenou klenbou**, u kterých je tavicí část plně pokrytá vrstvou vsázky, která zajišťuje dobrou tepelnou izolaci hladiny skloviny (Obr. 7.22). Sklářská vsázka, případně zvláště sklářský kmen a střepy, jsou rovnoměrně zakládány po celé ploše tavicího prostoru obvykle prostřednictvím žaluziového nebo pásového zakladače

(kap. 6). Druhou alternativou jsou **vany s teplou hladinou**, u kterých je využíváno původního způsobu zakládání z jednoho místa, které umožňuje pohyb vrstvy založené vsázky od stěny.



Obr. 7.22 Model celoelektrické pece se zakrytou hladinou, vertikální elektrody (zdroj: Toledo Engineering Co., Inc., TECO)

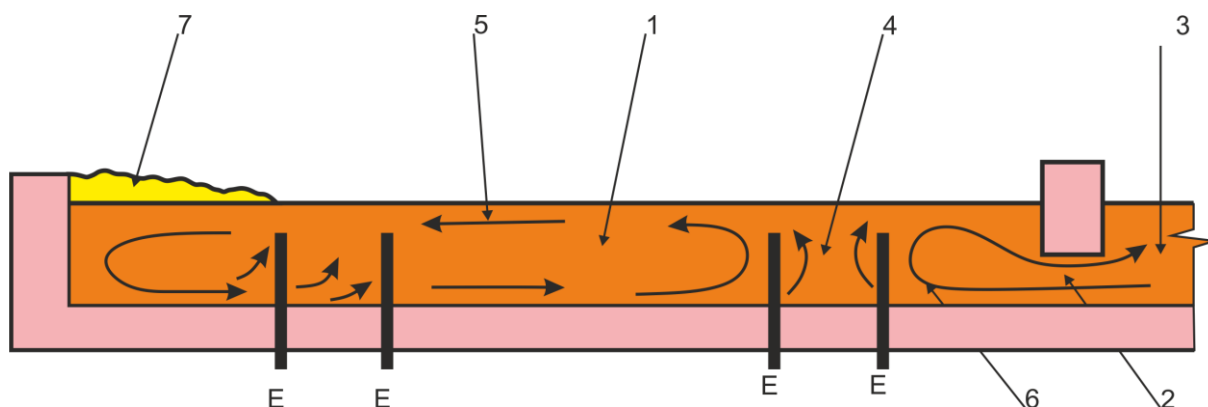
U intenzivní celoelektrické STA tzv. Pouchetova typu je energie vybavována účelově, což vede k lokálně vysokým teplotám, silným konvektivním tokům. Výhodou jsou malá velikost, nízké počáteční náklady a krátký čas přestavby, naopak nevýhodou jsou vysoké náklady na energii na tunu skla a nízká životnost. Tyto pece jsou používány pro výrobu textilních a izolačních skleněných vláken.

K tomu, aby mohlo docházet k efektivnímu ohřevu skla vedením elektrického proudu, musí mít sklovina dostatečnou teplotu. Z tohoto důvodu je na začátku tavby nutné převést sklo ve sklovinu, což se děje buď trvale nebo přechodně instalovanými plynovými hořáky.

7.6.3 Kontinuální STA s elektrickým příhřevem

Využití elektrického příhřevu spočívá často v dodatečné instalaci topných elektrod do bazénu tavící pece. Z toho vyplývá, že zavedení dodatečného zdroje energie nevyžaduje nutně zvláštní zásahy do konstrukce STA, pouze volbu umístění a intenzity příhřevu. Význam instalace elektrického příhřevu např. do obalářských van sleduje určité zvýšení výkonu, ale zejména ovlivnění systému proudění skloviny v peci. Příklad bariérového uspořádání (molybdenové elektrody umístěné ve sklovině svisle) je uveden na Obr. 7.23 a je z něj patrná nejčastěji používaná varianta realizace elektrického příhřevu. Je to umístění elektrod jednak do oblasti zakládání vsázky, kde je dodatečný přívod energie nejúčinnější,

jednak do oblasti teplotního maxima, kde dochází k posílení tepelné přehrady a přestože dochází k zesílení vratného proudu, projevuje se pozitivně na zlepšení homogenity skloviny. Podobně může být elektrický příhřev využit i při výrobě plochého skla způsobem Float, kde elektrody jsou umístěny nejčastěji do oblasti výrazného ochlazování taveniny zakládánou vsázkou. Jako poznámku lze uvést i skutečnost, že zavádění dodatečného příkonu přímo do skloviny může pozitivně ovlivnit velikost tepelných ztrát klenbou.



Obr. 7.23 Bariérové uspořádání svislých elektrod k posílení tepelné přehrady: 1 - tavící část, 2 - průtok, 3 - pracovní část, 4 - tepelná přehrada, 5 - proudění, 6 - zpětný proud, 7 - vsázka, E – elektroda

Celkově lze rozdělit použití elektrod příhřevu podle jejich umístění a funkce na:

- umístění v prostoru zakládání vsázky, které zabraňuje „zamrzání“ skloviny při zvýšení množství vsázky,
- umístění v tavící části, které dodává potřebnou energii pod plovoucí vsázku a urychluje její tavení ohřevem zespodu,
- umístění v prostoru čerání (základní), které vyvolává vzestupné proudění skloviny a zvýšení teploty urychluje čerání,
- umístění v pracovní části vany, které pomáhá udržovat konstantní teplotu.

7.7 Kyslíkové tavení

V posledních letech se začíná při tavení skla stále více uplatňovat použití kyslíku. Jeho hlavní výhodou je úplná nebo částečná absence dusíku při spalování. Spaluje se tak samotným kyslíkem. Při spalování vzduchem se také ohřívá na vysoké teploty a částečně reaguje dusík, kterého je ve vzduchu skoro 80 %. Pouhých 20 %, který tvoří kyslík, je využito pro spalování. Teplo z vyhřátého dusíku je následně získáváno přes regenerátory a rekuperátory. Produktem reakcí dusíku při vysokých teplotách jsou oxidy dusíku (NO_x – noxy), které jsou zdraví škodlivé. Kyslíkovým spalováním tak lze snížit provozní náklady, ale také náklady na stavbu STA, díky eliminaci regenerátorů a rekuperátorů. Vliv má také na radiační ztráty, kdy odtah u kyslíkové pece má menší rozměry než u klasické na spalování vzduchem. Celkově tak mají hořákové vlety menší rozměry a tím se snižují radiační ztráty, úspora je uváděna na úrovni 4,2 %. Plamen je také svítivější, a proto dochází ke zlepšenému přestupu tepla.

Nevýhodou, či spíše vedlejšími náklady, je samotný kyslík, jeho přeprava nebo výroba. Kyslík je pro menší spotřebu dopravován v kapalně formě, skladován v zásobnících a postupně zplyňován v odpařovačích. Pro větší objemy je vyráběn přímo v místě spotřeby. K výrobě se používá různých metod, kterými se kyslík selektivně vyděluje ze vzduchu prostřednictvím molekulových sít.

Kyslík je v praxi používán pro částečnou náhradu spalovacího vzduchu, tzv. obohacování kyslíkem, případně kyslíkový příhřev nebo pro úplnou náhradu vzduchu, kdy se jedná o kyslíko-palivové topení.

Obohacování kyslíkem je založeno na přívodu kyslíku do hořákových vletů a jeho vhánění pomocí trysek do plamene za vyšších rychlostí kyslíku než plamene (3 až 6krát). Obohacování kyslíkem se provádí z důvodů:

- zlepšení spalování a zlepšení provozních podmínek pece,
- zvýšení tavicího výkonu,
- snížení výkonu elektrického příhřevu nebo jeho náhrada.

Kyslíkový příhřev přivádí do pecního prostoru spolu s kyslíkem také palivo a jedná se o samostatné kyslíkové hořáky umístěné na vhodné místo v peci. Hořáky se často umísťují do přední části pece v blízkosti zakládání kmene, kde přivádějí lokálně energii. Přestup tepla do vsázky je velmi intenzivní a přináší její dřívější spékání a „naglazování“, kterým se snižuje míra úletu kmene a zrychlují klíčové reakce ve kmeni, tvorba taveniny a únik plynů ze vsázky. Dalším místem pro umístění jsou místa předpokládaného teplotního maxima v STA pro dosažení potřebného proudění skloviny v bazénu.

Kyslíkový příhřev může být aplikován na obvyklé typy STA. Velmi vhodné jsou rekuperační pece (především z důvodu místa) a dále STA pro výrobu plochého skla FLOAT (do míst zakládání vsázky, pak urychlují tavicí proces, zlepšují kvalitu nebo objemy produkce). U regeneračních U-plamenných pecí se umísťují kyslíkové hořáky do míst teplotního maxima, neboť nemají tuto oblast jednoznačně vymezenou.

Kyslíko-palivové tavení úplně nahrazuje spalování paliva vzduchem. Konstrukce celokyslíkové pece, tzv. oxy-meltru, je poměrně jednoduchá, je bez regeneračních komor či rekuperátorů. Vzhledem k dosahovaným vyšším měrným tavicím výkonům může pro stejné množství utaveného skla kyslíková pec být menší než běžná pec. Z tohoto důvodu má i menší povrch, a proto menší tepelné ztráty. Kyslíko-palivová pec pracuje podobně jako Unit-Melter (kap.7.6.1). Hořáky bývají umístěny v bočních stěnách blízko nad hladinou skloviny a jsou vzhledem k hořákům protější strany přesazené. Úspory snížením spotřeby paliv jsou v rozmezí 20 až 35 % podle typu pece. Zvýšené náklady jsou ovšem s výrobou kyslíku ze vzduchu. Jsou uváděny i některé specifické problémy, jako je pění skloviny v čeřící oblasti.

7.8 Konstrukční prvky STA

Hlavní stavební části vanové pece jsou:

- nosná konstrukce a rošt,
- bazén tavicí a pracovní části,
- základací přístavky,
- průtok,
- obvodové zdivo vrchní stavby pece,
- klenba pece, případně pracovní části,
- hořákové vlety (u plamenných STA),
- ocelová stahovací a vázací konstrukce,
- zařízení na výměnu tepla (u plamenných STA: regenerátory a rekuperátory, kap. 7.3.2),
- kouřové kanály (u plamenných STA).

Bazén pece je tvořen dnem a obvodovými stěnami. Vnitřní stěny bazénu jsou trvalým kontaktem s roztavenou sklovinou vystaveny korozním účinkům, trvalému opotřebení. Míra opotřebení jednotlivých kamenů v bazénu musí být podobná po celou dobu životnosti bazénu. Výměna jednotlivých kamenů v bazénu je během provozu prakticky vyloučena. K největšímu opotřebení dochází na rozhraní sklovina, pecní atmosféra a vyzdívka, tedy u hladiny. Zde jsou používány kvalitnější materiály. Požadavky na konstrukci STA jsou tyto:

- vyšší měrné tavicí výkony,
- zvyšování tavicích teplot,
- zlepšování kvality vyráběného skla,
- prodlužování životnosti pecí,
- zajištění maximální energetické úspory (pomocí izolací).

Celkové požadavky vedou k „sendvičovému“ uspořádání materiálů, neboť materiály s vysokou odolností vůči zvýšené teplotě a roztavené sklovině nemají dobré tepelně-izolační vlastnosti. Materiály s dobrými tepelně-izolačními schopnostmi nejsou zase dobře odolné za vyšších teplot. Stavba bazénů je tak skládána z několika vrstev, kdy první – ve styku s roztavenou sklovinou - je vysoce odolná, následuje bezpečnostní vrstva, dále těsnicí vrstva, dále vanové kameny a další je izolace.

U dvouprostorových van pro obalové a speciální sklo jsou tavicí a pracovní části zcela odděleny a pro přivádění skloviny jsou propojeny tzv. **průtokem**, který je relativně úzký a je pod hladinou skloviny. Jeho účelem je transport skloviny z tavicí do pracovní části, na relativně krátké dráze je překonán velký teplotní rozdíl mezi tavicí a pracovní částí, průtok také zabraňuje proudění nevyčerené skloviny do pracovní části a také zadržuje povrchové nečistoty z hladiny skloviny.

U van pro výrobu plochého skla mohou být na hladině umístěny **plováky** nebo **hradítka**. Účelem je zadržení povrchové nečistoty z hladiny skloviny.

Vrchní stavba pece vytváří u plamenných pecí spalovací prostor nad hladinou skloviny, který je uzavřen klenbou, bočními a čelními stěnami, umožňuje přístup paliva, spalovacího vzduchu a odvod spalin. Konstrukční řešení tvaru, geometrie a rozměrů tohoto

prostoru má proto rozhodující význam pro účinnost spalovacího systému pece. **Boční stěny vrchní stavby** jsou postaveny na tzv. nosných kamenech, které jsou uloženy na vodorovných ocelových lavicích podél celého obvodu pece. Tyto tvarovky jsou charakteristické svým „nosem“, který má za úkol chránit jejich nosný, ocelový profil. Základem pro vázání horní stavby pece je především **ocelová nosná konstrukce** pro nosné kameny, která je upevněna ke stojinám pece. Vlastní stěny jsou pak vázány přes svoji izolaci pomocí vodorovných profilů, které jsou rovněž přišroubovány ke stojinám.

Klenby slouží k uzavření horní části tavicího či pracovního prostoru sklářské pece a jsou používány i na regeneračních komorách. Používají se klenby obloukové, které jsou konstruovány jako výseč dutého válce. Na obou koncích jsou podepřeny na základnách a jsou stavěny jako gravitační, tedy drží vlastní tíhou.

Hořákové vlety u regeneračních pecí (nazývány též hořákové proudy) propojují pecní prostor s regenerační komorou a slouží k přivádění přehřátého spalovacího vzduchu a v opačné periodě k odvádění spalin z pece. Hořákové vlety jsou zděné a jejich součástí jsou rovněž hořákové tvarovky, kterými se přivádí palivo.

7.9 Vyzdívka STA

Vzhledem k vysokým teplotám, kterých je při tavení dosahováno, je nutné na stavbu STA použít vhodné žárovzdorné materiály, které nejen snášejí tyto teploty, ale současně musí odolávat korozi roztavenou sklovinou. Během životnosti agregátů stoupá v důsledku jejich opotřebení spotřeba energie, a to o 2 – 4 % ročně.

Škála používaných žárovzdorných materiálů pro stavbu STA je široká, hlavní používané materiály jsou níže jen krátce zmíněny.

Dinas je vysoce křemičitý žárovzdorný materiál s minimálním obsahem SiO_2 93 %. Doprovodnými příměsemi jsou především oxidy CaO a Al_2O_3 . Nejvyšší teplota použití dinasů je 1550 °C až 1590 °C.

Hlinitokřemičité žárovzdorné materiály obsahují dva základní oxidy Al_2O_3 a SiO_2 v různém poměru. Podle obsahu Al_2O_3 je můžeme rozdělit na dvě základní skupiny:

- a) **Šamotové materiály** s obsahem Al_2O_3 od 10 % do 45 % (tyto se dále dělí na kyselé s obsahem Al_2O_3 do 30 % a běžné s obsahem 30 % až 45 % Al_2O_3). Všechny důležité vlastnosti z hlediska žárovzdornosti mají dobré, ale žádnou vynikající. Je to základní, masově vyráběný žárovzdorný materiál s největším rozsahem normalizovaných tvarových prvků s použitelností do maximální teploty 1370 °C.
- b) **Vysocehlinité materiály** s obsahem Al_2O_3 nad 45 %. Mezi tyto se řadí i korundové materiály s obsahem Al_2O_3 nad 90 %.

Zásadité žárovzdorné materiály jsou charakterizovány přítomností MgO v rozsahu 45 % až 95 % a Cr_2O_3 , jehož obsah se pohybuje od 0 do 35 %. Jsou charakteristické značnou odolností proti působení alkálií, velkou tepelnou kapacitou a vysokou žárovzdorností (1600 °C až 1640 °C).

Elektrotavené žárovzdorné materiály jsou charakteristické technologií výroby odléváním z taveniny, která je připravována v elektrických obloukových pecích, chemické složení je obdobné jako u keramických materiálů, tj. od čistě křemičitých, přes hlinitokřemičité s přídavkem oxidu zirkoničitého, případně i chromitého, až po čistě hlinité materiály. Nejpoužívanější je skupina tzv. **korundobaddeleyitových materiálů** s obsahem ZrO_2 30 % až 40 %. Materiály s obsahem okolo 30 % ZrO_2 a 30 % Cr_2O_3 odolávají korozním účinkům skloviny ještě lépe. Jsou používány na silně exponovaná místa obalářských van tavicích barevnou sklovinu (pro křišťál nejsou vhodné – barví sklovinu).

Na několika typických příkladech jsou uvedeny možnosti použití některých žárovzdorných materiálů při stavbě sklářských tavicích agregátů.

Zdivo horní stavby

U pánvových pecí se jedná o zdivo nad úrovní nístěje. Dříve se používal téměř výhradně dinasový materiál, dnes se zvláště u pecí s malým počtem pánví nahrazuje vysoce hlinitými materiály.

U sklářských van se jedná o zdivo nad úrovní horní hrany bazénu. Nejčastější je stále použití dinasového materiálu. U velmi zatížených van a tam kde je použito kyslíkového spalování, se přechází na korundobaddeleyitové materiály.

Vyložení regenerátorů, tvarovky keramických rekuperátorů

U pánvových pecí se používá téměř výhradně šamotových materiálů. U van se na boční zdivo a klenbu používá šamotového, vysoce hlinitého nebo i magnezitového zdiva. Klenby mohou být i dinasové. Vyložení bývá šamotové, vysoce hlinité, magnezitové nebo korundobaddeleyitové .

Izolační přizdívky

Při moderních konstrukcích sklářských pecí se používá tzv. sendvičového, tj. vícevrstvého zdiva. Vnitřní stěny jsou tvořeny odolným, hutným materiálem, ke kterému je připojena i několikavrstvá izolační přizdívka. Více vrstev se volí především proto, aby se optimalizovalo využití izolačních materiálů, protože tepelná vodivost a teplota použití jsou většinou protichůdné veličiny. Je nutno přihlížet i k ceně jednotlivých materiálů.

Přímý styk se sklovinou

K přímému styku žáromateriálu se sklovinou dochází ve vanových sklářských pecích v tavicích a pracovních bazénech a dávkovacích žlabech. Nejvíce používanými materiály pro tyto partie jsou elektrotavené bloky, pro tavicí bazény jsou to lité materiály AZS na bázi korundobaddeleyitové, pro pracovní bazény a dávkovací žlaby se používají také korundové. Chromité keramické bloky se používají při tavení sklovin pro výrobu skleněného vlákna. Pánve pro tavení skla jsou vyráběny ze šamotu.

Zdivo spodní stavby

Zdivem spodní stavby se rozumí vyzdívky do úrovně nístěje pánvových pecí a zdivo pod bazény sklářských van. Pro tyto vyzdívky je charakteristický především šamotový materiál, který bývá na exponovaných místech doplňován vysoce hlinitými materiály.

Žárovzdorné materiály se používají stále ve větších rozměrech, jsou hutnější, odolnější a dražší. Světové sklářství spotřebuje ročně asi 400 000 tun žáromateriálů, z čehož zhruba jedna třetina připadá na Evropu. Největším výrobcem je francouzská firma SEPFRO s hlavním závodem ve francouzském Le Pontet a devíti dalšími po celém světě. Vyrábějí se lité palisádové kameny výšky až 2,5 metru, nové jsou lité kameny na bázi 94 % ZrO_2 . Dnes elektrotavené žáromateriály mírně vedou nad keramickými. Zde je novinkou keramicky pojený kámen s 95 % ZrO_2 na dna van pro olovnaté sklo a izostaticky lisované materiály s 96 % Cr_2O_3 . Zásadou lepších žáromateriálů klesla od roku 1960 jejich měrná spotřeba zhruba čtyřikrát a v roce 2000 činila 3 až 5 kg na tunu utaveného skla.

7.10 Řídicí systémy, hořáky

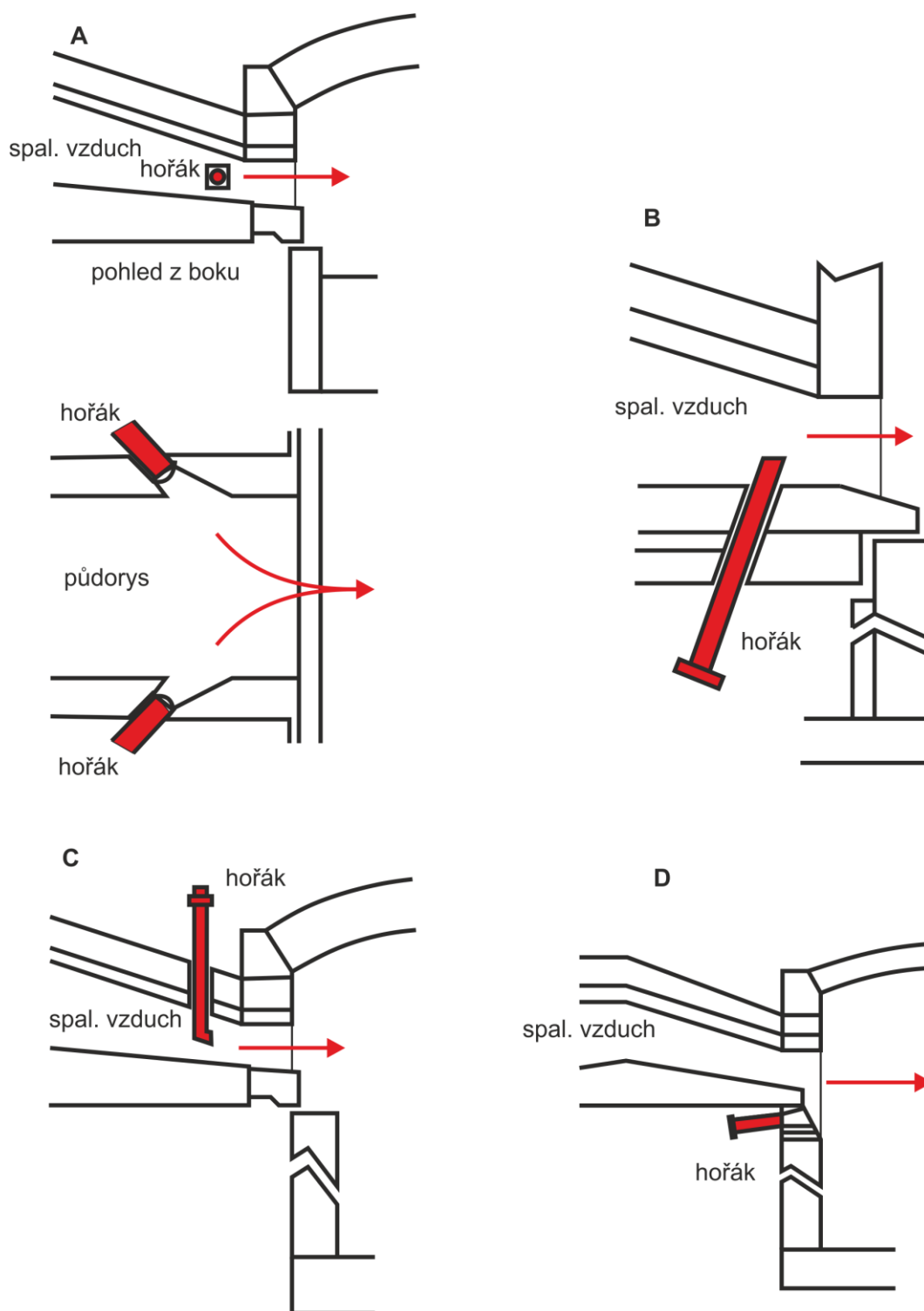
Z hlediska moderního provozu STA jsou tato zařízení nezbytná. Jedná se o

- hořáky, v nichž dochází u plamenných pecí k mísení paliva se vzduchem (nebo kyslíkem) a hoření směsi,
- armatury; soustava nosníků a táhel zpevňující konstrukci pece,
- systémy řízení STA (přívod paliva, složení pecní atmosféry, hladinoměry s vazbou na ovládání funkce zakladačů vsázky, další nezbytné snímače a čidla umožňující zpětnou vazbu na příslušné regulační systémy),
- regenerátory,
- rekuperátory.

Dominantním palivem pro spalovací systémy současných pecí je zemní plyn. Přívod plynu pro typický systém otopu zemním plynem je veden přes plynovou řadu, která zahrnuje následující vybavení:

- přesné měření průtoku,
- tlakový regulátor pro regulaci tlaku plynu na potřebnou hodnotu,
- průtokový ventil pro regulaci přívodu plynu k hořákům,
- reverzační ventily pro řízení hoření jednotlivých stran,
- bezpečnostní uzavírací ventil pro nouzové uzavření plynu.

Umístění hořáků v peci závisí především na typu a konstrukci pece. Teoreticky mohou být hořáky zaústěny v různých částech stavby pece, ale nejčastěji jsou zaústěny přímo do vletu (do jeho boků, dna, klenbičky), často také pod prahem vletu (nazýváno jako podvletové upořádání), méně často jsou zaústěny nad vletem (nadvletové upořádání), Obr. 7.24. Hořáky jsou kovové a jsou konstrukčně rozmanité s ohledem na druh paliva, typ a konstrukční řešení pece a využití odpadního tepla (regenerační, rekuperační pece).



Obr. 7.24 Možnosti umístění hořáků: A – v bočních stěnách vletů, B – ve dně vletu, C – v klenbě vletu, D – pod vletem

7.11 Speciální tavicí zařízení

Konstrukce pecí určených pro tavení speciálních skel se zásadně liší od konstrukce pánvových a vanových pecí, o nichž bylo pojednáno v předchozích odstavcích. Hlavními příčinami jsou zejména tyto aspekty:

- zvláštní chemické složení tavených skel,
- značná koroze zařízení,
- často velmi vysoké tavicí teploty,
- někdy nutnost tavení za zvláštních podmínek (vakuum, speciální materiály tavicích zařízení aj.).

Mezi tato skla řadíme např. speciální optická skla (s vysokým obsahem PbO), skla křemenná, skla vysoce korozivní a další. Tavicí postupy takových skel jsou často diskontinuální a kapacita tavicích zařízení je mnohdy relativně nízká. Dále budou uvedeny vybrané příklady těchto systémů.

7.11.1 Kelímkové středo- a vysokofrekvenční pece

V těchto pecích se taví za zvláštních podmínek zejména optické sklo nebo speciální skla pro elektroniku a mikroelektroniku. Kelímky se používají platinové, platinorhodiové, keramické, křemenné nebo se taví v tzv. studeném kelímku. Zvláštním příkladem je mikrovlnná sklářská pec, jejíž vývoj probíhá od konce 20. století. Princip spočívá ve vyvíjení energie pomocí magnetronů a v pohlcování vyvinuté energie přímo vsázkou. Současné podmínky představují dimenzi typu ateliérové pece s možností použití 10 kg vsázky při době tavení 2 až 3 hodiny.

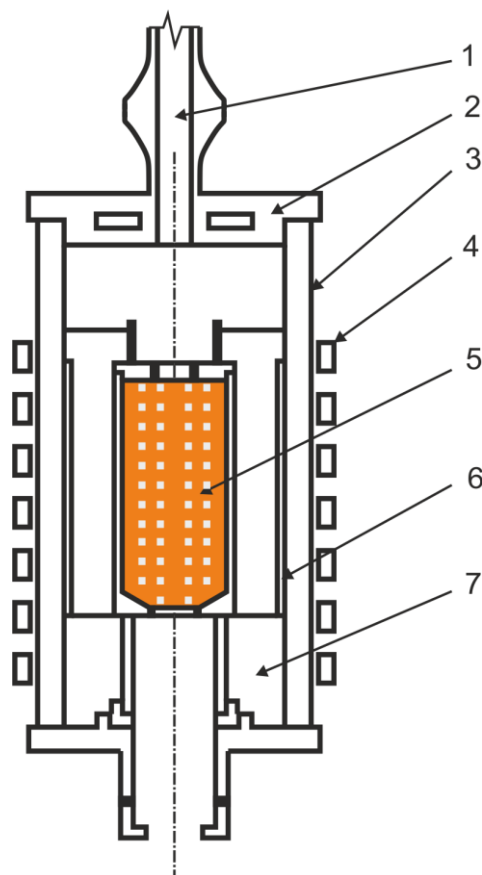
7.11.2 Tavení křemenného skla grafitovými elektrodami

Tímto způsobem se vyrábí opakní (neprůhledné) křemenné sklo ze specificky upraveného křemenného písku (KS 20/13, kap. 4.3.1). Tavení probíhá v kovových formách, pracovní postup spočívá v sestavení pece s jednou nebo více grafitovými elektrodami, naplnění formy pískem, utavení, vysunutí elektrod z viskózní taveniny a vylisování požadovaného tvaru. V případě bloků se při lisování uzavřou i dutiny po elektrodách. Po vychladnutí (nevyžaduje chladicí pec, protože materiál, skelný SiO_2 , má velice nízký součinitel lineární teplotní roztažnosti) se polotovary mechanicky opracují (řezání, broušení) a v případě bloků mohou být použity jako vyzdívka tavicích pecí pro tavení boritokřemičitých skel.

7.11.3 Vysoko- a středofrekvenční tavení čirého křemenného skla

Tavení probíhá za vakua v grafitovém kelímku o obsahu okolo 10 kg vsázky, přičemž surovinou je drcený horský křišťál nebo upravený žilný křemen. Zařízení je znázorněno na Obr. 7.25. Grafitový kelímek je umístěn do válcové pece, která je tvořena velkopřůměrovou trubkou z opakního křemene, prostor mezi kelímkem a vnitřní stěnou pece je vyplněn izolující magnezitovou drtí. Po uzavření víkem je z prostoru pece odsát vzduch a tavení probíhá za vakua, elektrická energie je dodávána vodou chlazeným induktorem umístěným vně pece (indukce probíhá ve stěně vodivého grafitového kelímku, který se rozžhaví a předává teplo vsázce). Tavení probíhá při teplotě přibližně 2000 °C, při níž tavenina zůstává

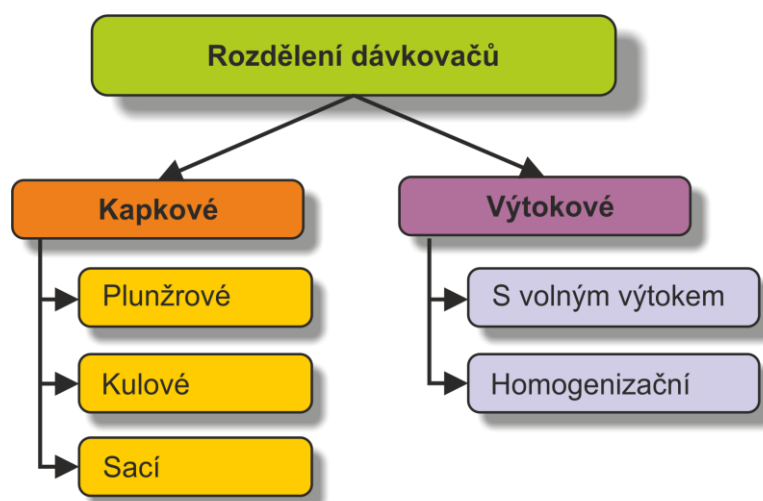
silně viskózní. Po 2 až 3 hodinách je možno otvorem ve dnu kelímku táhnout trubice nebo tyčinky, eventuelně ponechat blok vychladnout a poté mechanicky zpracovat.



Obr. 7.25 Tavení křemenného skla v grafitovém kelímku: 1 - odsávání, 2 - horní kryt, 3 - plášť pece z opakního křemene, 4 - induktor, 5 - tavenina, 6 - tepelná izolace, 7 - magnezitová drť

8 Dávkování skloviny

Přechod mezi tavicí pecí a operací tvarování tvoří dávkování skloviny. U ruční výroby se dávka nabírá obvykle na sklářskou píšťalu. Strojní výroba vyžaduje větší frekvenci dávek a přesnost, kterou je možno zajistit pouze systémy strojního dávkování. Podle technologie výroby rozlišujeme dávkovače výtokové, které jsou obvykle součástí technologie tvarování (sklovina je dávkována nepřetržitě) a dávkovače kapkové, které vytvářejí z nabrané skloviny kapku, Obr. 8.1.



Obr. 8.1 Rozdělení dávkovačů

Požadavky na dávku jsou následující:

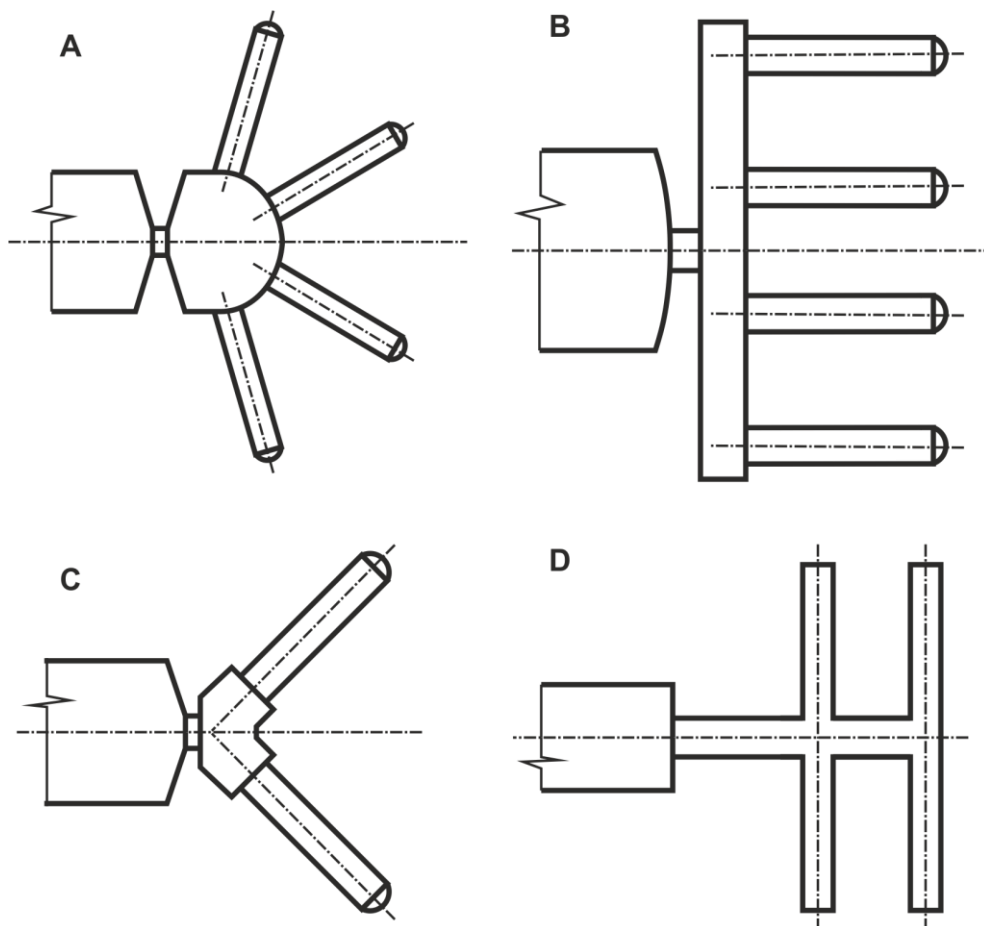
- stejná hmotnost (u kapkového dávkovače)/stejný objem vytékající skloviny (u výtokových dávkovačů),
- vhodný tvar/vhodný průřez proužku skloviny,
- vhodná viskozita (teplota) pro dané tvarování,
- teplotní homogenita.

U dvoupřestorových pecí navazuje na část pracovní, v níž dochází ke snížení teploty skloviny a tepelné stabilizaci skloviny (sejití) a k přípravě skloviny na dávkování a následně tvarování. V pracovní části mohou být umístěna míchadla, hořáky i systém chlazení. Z pracovní části pece je sklovina často rozváděna žlaby dávkovačů do jednotlivých míst, kde jsou umístěny tvarovací stroje. Následují samotné dávkovače.

Dávkovače (feedry) mají různý princip a konstrukci. Často se skládají ze žlabu a hlavy dávkovače.

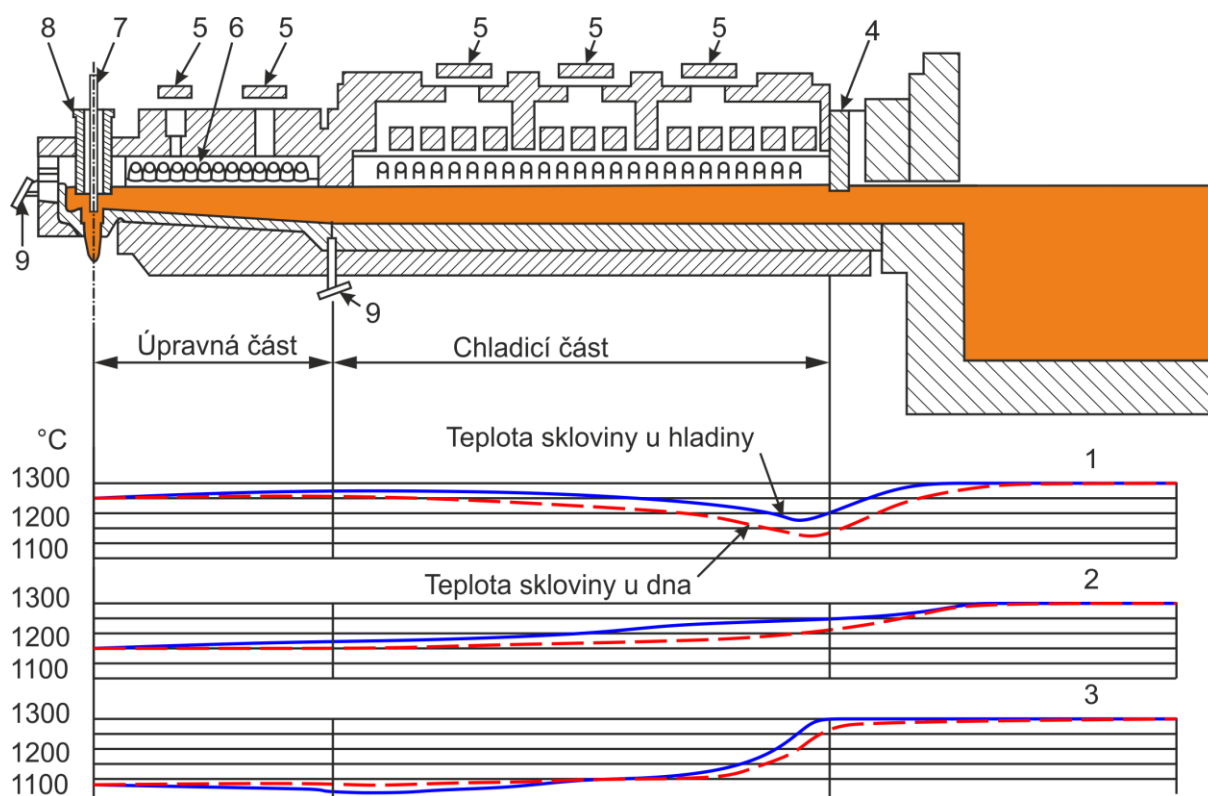
8.1 Žlaby dávkovačů

Úlohou žlabů je rozvést sklovinu k jednotlivým tvarovacím strojům a provést závěrečnou úpravu skloviny (zajištění tepelné a chemické homogenity, čistoty, vhodné dávkovací teploty). Samotné žlaby mohou nahrazovat pracovní části tavicích pecí a jsou pak napojeny přímo na tavicí část STA. Mohou být různého počtu na vaně a provedení, Obr. 8.2.

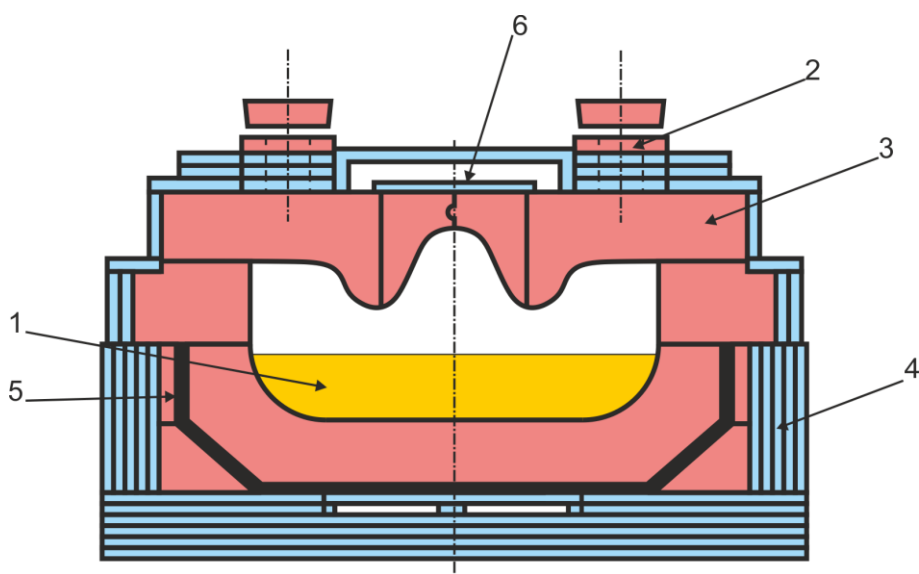


Obr. 8.2 Schéma pracovní části STA pro strojní výrobu: A – klasické provedení, B – s minimalizovanou pracovní částí, C – v podobě rozváděcího žlabu, D – v podobě žlabu tvaru H pro jednostupňové tažení vláken.

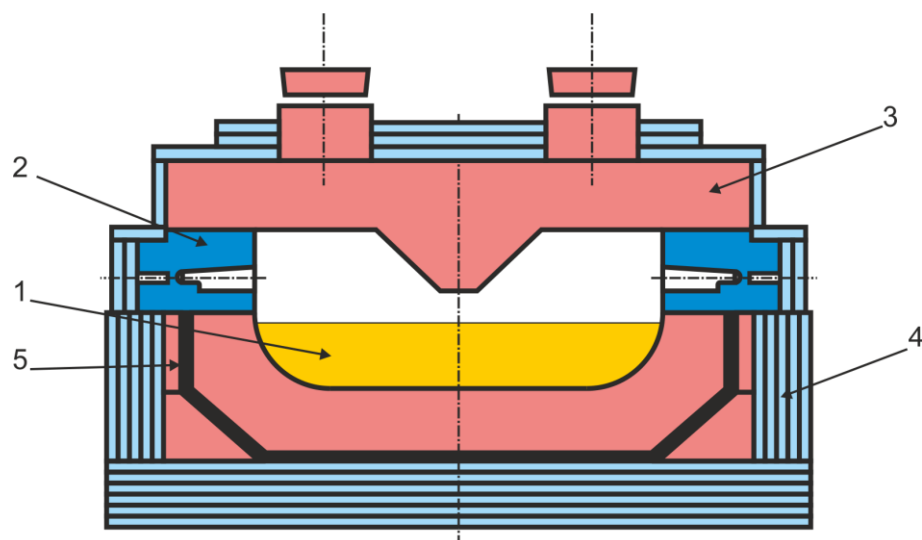
Žlab dávkovače se většinou skládá z části chladicí a úpravné, Obr. 8.3. Rozdíl v průřezu obou částí je uveden na Obr. 8.4 a Obr. 8.5. Otop žlabu může být realizován hořáky na zemní plyn, elektrickými odporovými spirálami (nepřímý elektrický ohřev), pomocí elektrod (průchodem elektrického proudu sklovinou) anebo kombinovaně. Důležitým prvkem žlabů je také systém chlazení, který je většinou řešen soustavou větracích komor (chlazení vzduchem). Teplotní homogenita skloviny je značně závislá na způsobu příhřevu a způsobu chlazení.



Obr. 8.3 Schematický podélný řez klasickým žlabem Hartford se zakresleným průběhem teplot podél žlabu: 1 - průběh teploty při lehké kapce, 2 - při středně těžké kapce, 3 - při těžké kapce, 4 - hradicí kámen, 5 - větrací kameny, 6 - plynové hořáky, 7 - plunžr dávkovače, 8 - trubka, 9 - ponorné termočlánky



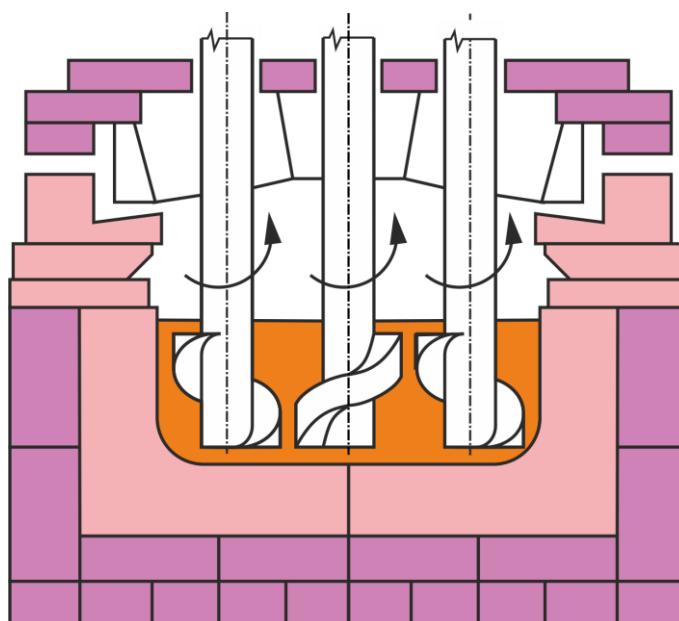
Obr. 8.4 Chladicí sekce žlabu firmy Emhart : 1 - sklovina, 2 - průduchy, 3 - vyzdívka, 4 - vláknitá izolace, 5 - dilatační mezera, 6 - horní chladicí profil



Obr. 8.5 Úpravná sekce žlabu firmy Emhart: 1 – sklovina, 2 – hořák, 3 – vyzdívka, 4 – vláknitá izolace, 5 – dilatační mezera

Na Obr. 8.3 je zobrazen žlab s příhřevem hladiny skloviny plynovými hořáky a chlazením vzduchem, proudícím napříč podélné osy žlabu. Žlab navazuje na pracovní část STA, přechází za hradicím kamenem v chladicí část a dále v část úpravnou. Příčný průřez a výška hladiny skloviny se v chladicí části v podstatě nemění, ale v části úpravné se podle potřeby žlab zužuje a hloubka skloviny ve žlabu se podle okolností snižuje nebo zvyšuje. V úpravné části se sklovina vždy přihřívá. V chladicí části se při dávkování velkých kapek chladí a při dávkování menších kapek přihřívá.

Pro získání vysoké homogenity skloviny se do žlabů zavádějí míchadla, Obr. 8.6. Bývají umístěna v chladicí části žlabu, ale někdy podle potřeby i v části úpravné. Bývají vrtulová nebo šroubová.



Obr. 8.6 Míchadlo v chladicí části žlabu

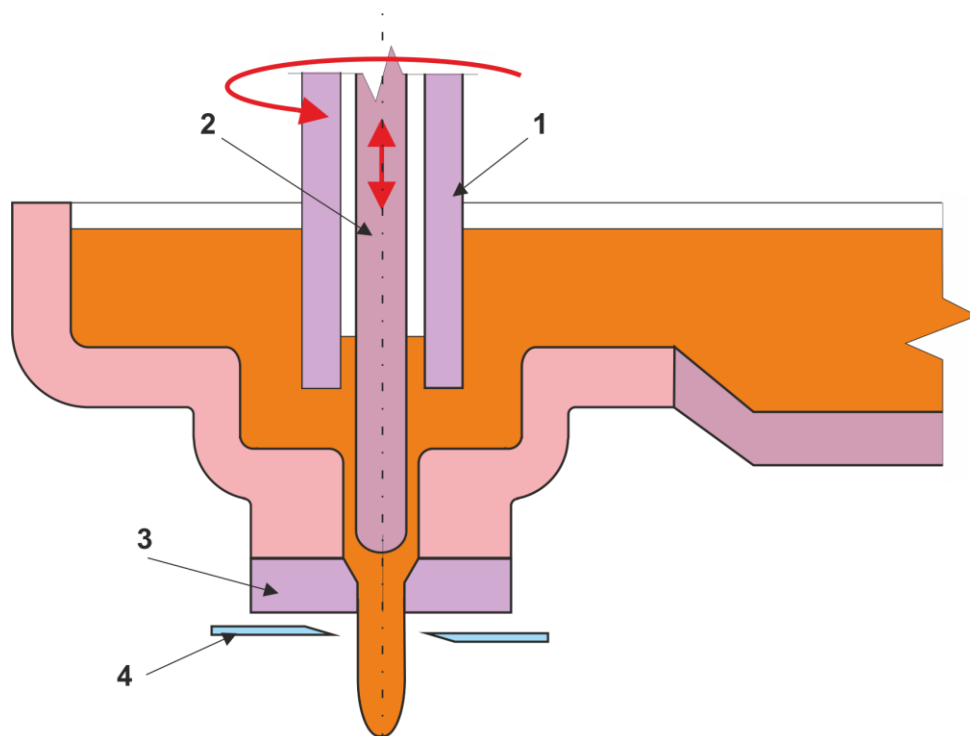
8.2 Dávkovače kapkové

Tyto dávkovače slouží k dávkování samostatných dávek do tvarovacích strojů. Kapkové dávkovače vytváří kapku požadovaných parametrů, jako je hmotnost, tvar, viskozita, kvalita a počet. Nastavením dávkovačů lze uvedené parametry měnit v určitém rozsahu. Základními typy kapkových dávkovačů jsou: plunžrový dávkovač, kulový dávkovač a sací naběrač.

8.2.1 Plunžrový dávkovač

Plunžrový dávkovač (nazývaný též mechanický) tvoří žlab (kap. 8.1) a hlava dávkovače (Obr. 8.7). Nedílnou součástí jsou také nůžky. Dávka je ve většině případů odváděna pomocí odchylovacích žlabů (nebo systému žlabů) do forem, kde je tvarována.

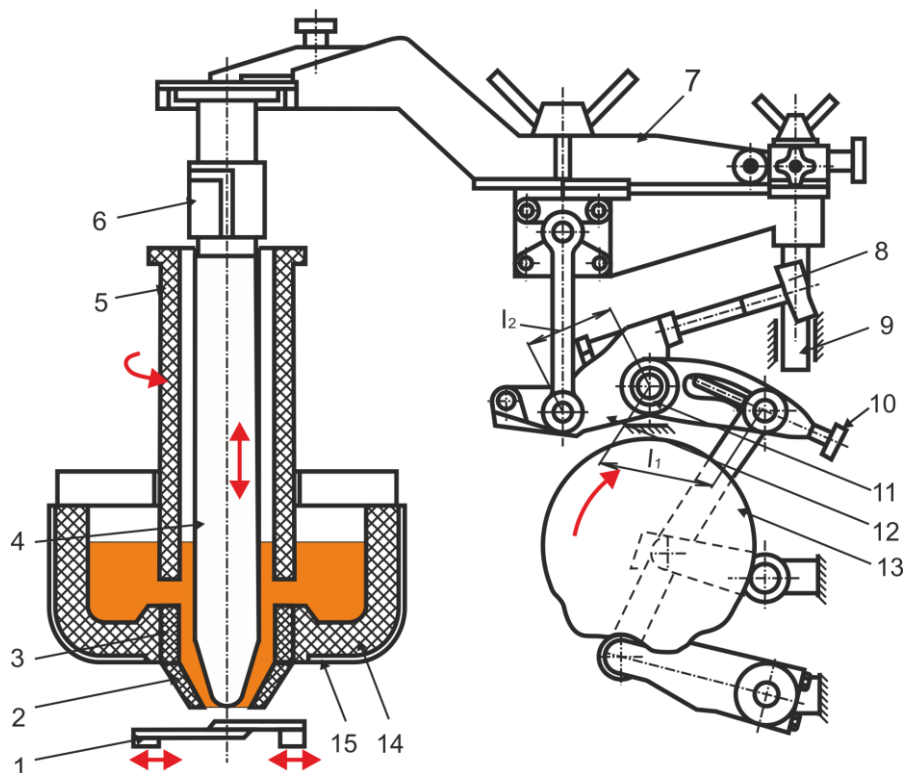
Proces vzniku dávky se odehrává v hlavě dávkovače, v níž se vertikálně pohybuje plunžr, který vytlačuje sklovinu otvorem misky. Kapka, která je vytlačena otvorem, se odděluje nůžkami a transportuje do tvarovacího zařízení. Plunžr je umístěn centrálně uvnitř plynule se otáčející trubky, která provádí konečnou homogenizaci skloviny. Hmotnost kapky se pohybuje v rozsahu 14 až 1420 g při frekvenci 1 až 220 (v odborné literatuře je uváděno až 300) kapek za minutu. Při vícekapce se počet kapek zvyšuje a u čtyřkapky lze dosáhnout až 900 kapek za minutu. Tvar kapky a její hmotnost je určena především tvarem, pohybem a polohou plunžru v počáteční a koncové fázi, polohou otočné trubky, průměrem výtokové misky a samozřejmě viskozitou skloviny, výškou hladiny skloviny a dalšími parametry. Tvar a hmotnost dávky je důležitá pro správný tvar a kvalitu následně tvarovaného skleněného výrobku. Uvádí se, že tvar kapky se má blížit tvaru výrobku, tedy úzké a vysoké výrobky, jako jsou láhve, které vyžadují delší a štíhlejší kapku. Výrobky menší a širší vyžadují dávku kratší a širší.



Obr. 8.7 Schéma plunžrového dávkovače: 1 – otočná trubka, 2 – plunžr, 3 – miska, 4 – nůžky

Na Obr. 8.8 je uveden mechanismus pohonu plunžru přes vačku. Tím jak se vačka otáčí, dochází přes páku k převodu rotačního pohybu na posuvný a plunžr tak vykonává předepsaný pohyb ve svislém směru. Pohyb plunžru lze měnit pomocí stavěcích šroubů, případně i výměnou vačky.

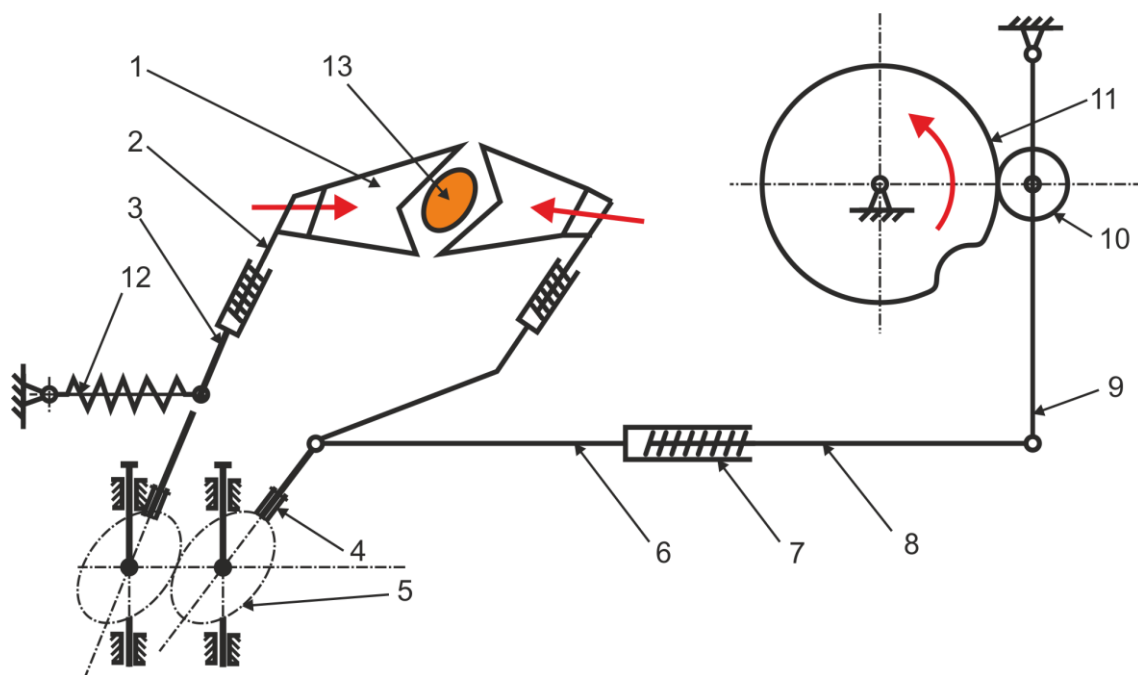
Vedle pohonu plunžru přes vačku se využívá pohonu od pneumatického válce. V současné době je trendem použití servomechanismů nebo kombinací servomechanismu s mechanickou vačkou. Užití servomechanismů umožňuje měnit parametry dávky v průběhu výroby. Například při výrobě obalového skla lze vyrábět několik velikostí lahví na jedné lince.



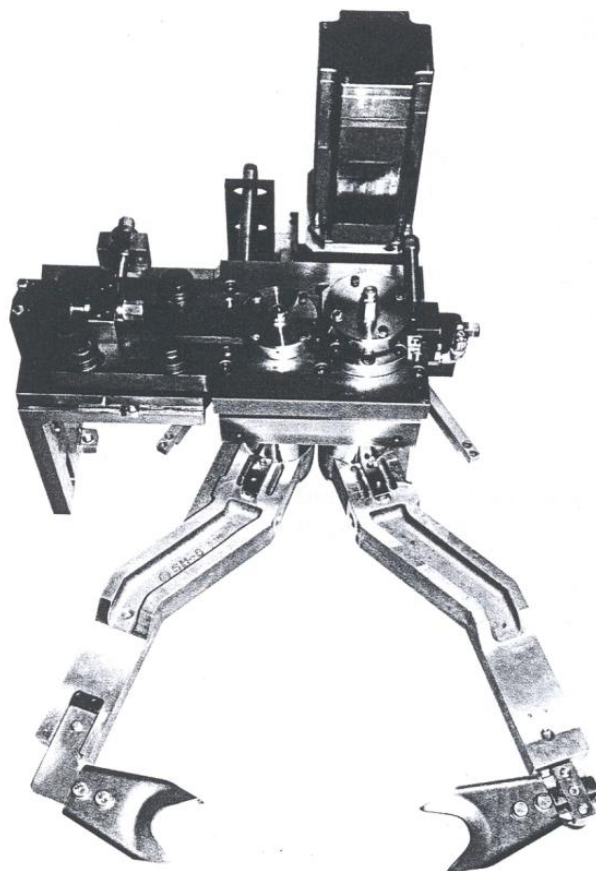
Obr. 8.8 Mechanismus plunžrového dávkovače, pohon plunžru přes vačku: 1 – nůžky, 2 – výtoková miska, 3 – manžeta, 4 – plunžr, 5 – otočná trubka, 6 – spojka, 7 – rameno, 8, 10 – seřizovací šroub, 9 – vedení, 11 – ložisko, 12 – páka, 13 – vačka, 14 – hlava dávkovače, 15 – ocelový plášť

Důležitou součástí tohoto typu dávkovače jsou nůžky, které oddělují dávku skloviny. Základní rozdělení je na nůžky pákové a přímočaré. Počet odstřižených kapek může být od jedné do čtyř a tomu odpovídá i uspořádání nůžek, které musí daný počet odstříhnout za stejných podmínek pro každou z kapek.

Schéma funkce strojních pákových nůžek s vačkovým pohonem je na Obr. 8.9. Vačky u pohonu nůžek jsou výměnné, jejich tvar je závislý na počtu stříhů za minutu a na hmotnosti stříhané kapky. Pohon vačky je synchronizovaný s pohonem dávkovače a tvarovacího stroje. Modernější nůžky jsou vybaveny servopohonem, což umožňuje operativní zásahy do výroby a velmi rychlou změnu stříhacího cyklu, příklad nůžek je na Obr. 8.10. Výhodou pákových nůžek je jejich jednoduchost a tedy i cena. Naopak nevýhodou jsou rozdílné podmínky stříhu při stříhání vícekapky.

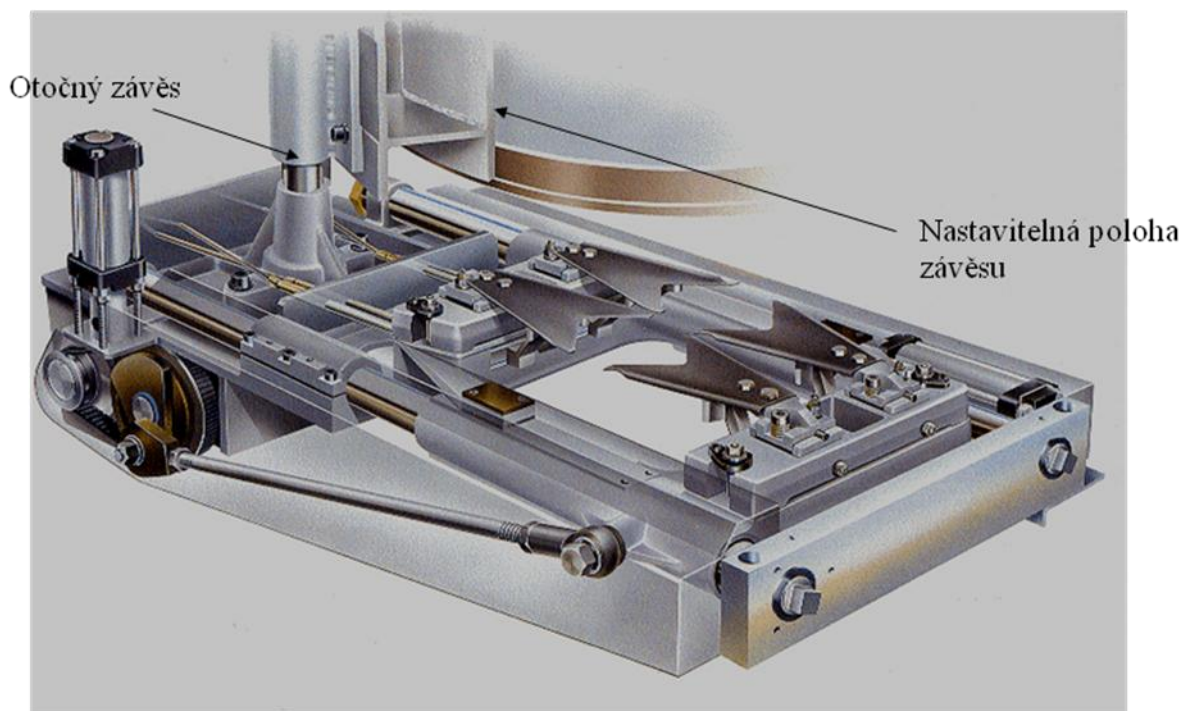


Obr. 8.9 Zjednodušené kinematické schéma pákových nůžek s vačkovým pohonem: 1 – nůž, 2 – rameno, 3 – páka, 4 – úchyt ramene, 5 – ozubení, 6 – táhlo, 7 – seřizovací spojka, 8 – táhlo, 9 – páka, 10 – kladička, 11 – vačka, 12 – pružina, 13 – kapka skloviny



Obr. 8.10 Pákové nůžky se servopohonem (zdroj: Walter)

Lineární nůžky jsou používány především u vícekapek, neboť zachovávají stejné geometrické a dynamické poměry stříhu kapky pro všechny současně stříhané kapky. Model lineárních nůžek je uveden na obr. Obr. 8.11. Tento typ nůžek je ve srovnání s pákovými nůžkami podstatně dražší.

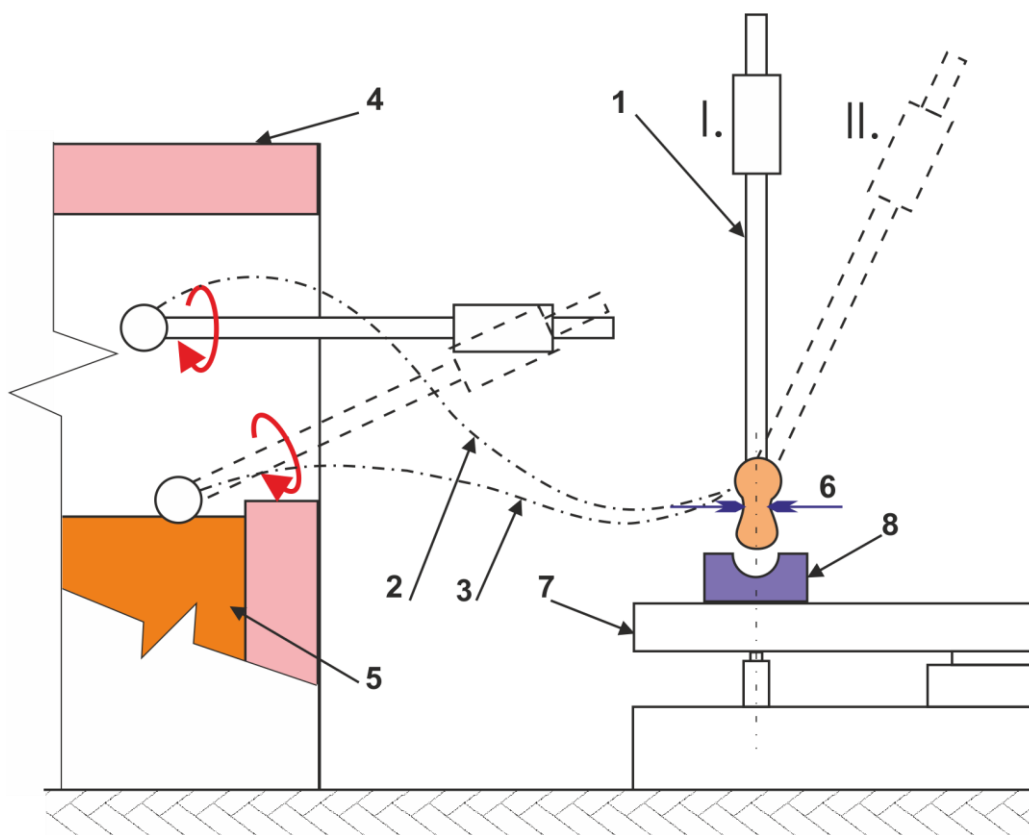


Obr. 8.11 Pohled na lineární nůžky se servopohonem (zdroj: BH-F Ltd)

Nože strojních nůžek jsou značně tepelně namáhány, neboť dávka skloviny má v místě stříhu teplotu 1 000 °C až 1 250 °C podle typu skloviny a velikosti dávky. Během stříhu kapky je ostří nožů intenzivně ohříváno a v zápětí intenzivně chlazeno vodní mlhou nebo olejovou emulzí.

8.2.2 Kulový naběrač

Kulový (palicový) naběrač se používá nejčastěji k dávkování skloviny do vícepozicových lisů. Schéma je uvedeno na Obr. 8.12 a je z něj patrné, že tento typ dávkovače velice zřetelně simuluje činnost skláře při ručním dávkování pomocí sklářské píšťaly. Funkce spočívá v tom, že nabírací tyč s palicí zajede do pece, částečně se ponoří a rotací nabere sklovinu. Poté se zvedne nad hladinu, rotací se dávka oddělí a přesune nad formu, kam padá po oddělení nůžkami. Nůžky jsou synchronizovány s dávkovačem, jsou často pákové a mají podobnou konstrukci jako u plunžrového dávkovače. Funkce dávkovače je synchronizována i s dalším navazujícím zařízením (tvarovací stroj). Hmotnost dávky se pohybuje v rozmezí 100 až 6 000 g, frekvence i více než 12 dávek za minutu. Velikost dávky se ovlivňuje především výměnou kulové hlavy. Kapka má ve srovnání s mechanickým dávkovačem vyšší teplotu, neboť se nechladí miskou a odchylovacím žlabem.



Obr. 8.12 Schéma kulového dávkovače: 1 – nabírací tyč s hlavici, 2 a 3 – trajektorie nabírací hlavice, 4 – pracovní část pece, 5 – sklovina, 6 – nůžky, 7 – stůl lisu s formou, 8 - forma

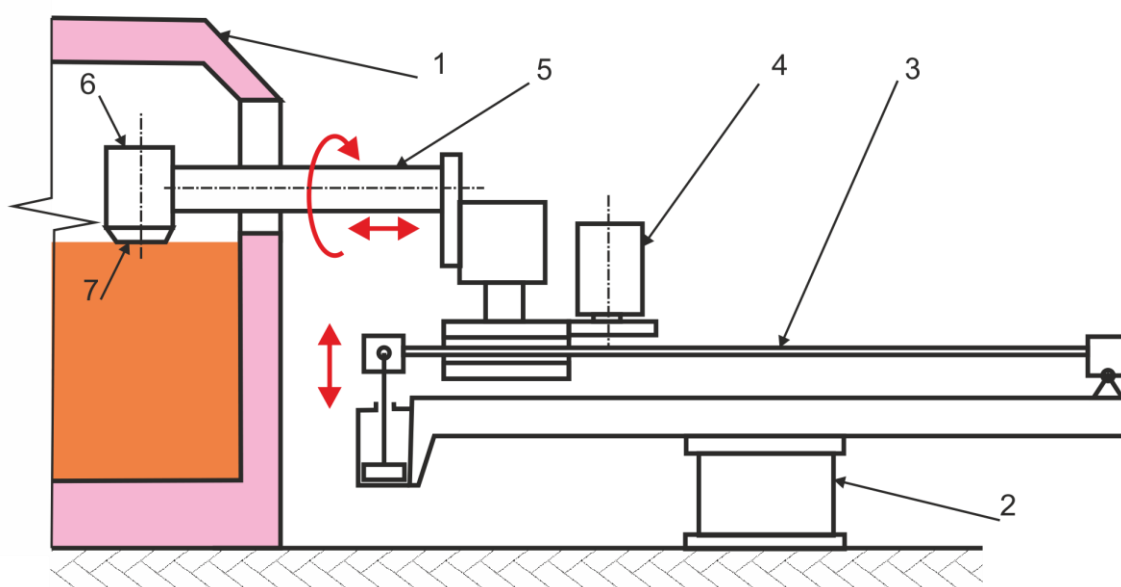
Kulový naběrač se používá s výhodou tam, kde je část výroby automatizována a část zůstává ruční. Konstrukce kulového naběrače bývá často řešena pomocí čtyř nebo šestiosého robotu, který může být připevněn k podlaze (sloupové provedení, Obr. 8.13) anebo může být zavěšen na strop (závěsné provedení).

8.2.3 Sací naběrač

Tento typ naběrače (Obr. 8.14) se používá pro větší dávky. Princip funkce spočívá v tom, že otočné rameno nesoucí sací hlavu vjede do pracovní části pece, poklesne a podtlakem dojde k nasátí skloviny. Poté se sací hlava zvedne, nůž tvořící současně víčko oddělí sklovinu, sací hlava vyjede z pece, otočí se otvorem nahoru a dávka skloviny se vyjme pomocí ručního přípravku. Všechny tepelně namáhané součásti naběrače jsou chlazené vodou. Hmotnost dávky lze ovlivnit výměnou sací hlavy, pohybuje se v rozsahu 1 000 – 9 000 g, frekvence je 4 – 6 dávek za minutu. Využití je při ruční výrobě, kdy si dávku přebírá sklář, který s ní dále pracuje. Dávku si může také na automatické lince převzít rameno robotu a přemístit ji například do lisu.



Obr. 8.13 Ukázka kulového dávkovače (zdroj: NOVAXION)



Obr. 8.14 Schéma sacího naběrače: 1 – tavicí část pece, 2 – rám, 3 – vodicí tyče, 4 – elektromotor, 5 – otočné rameno, 6 – sací hlava, 7 – sklopné víčko

8.3 Dávkače výtokové

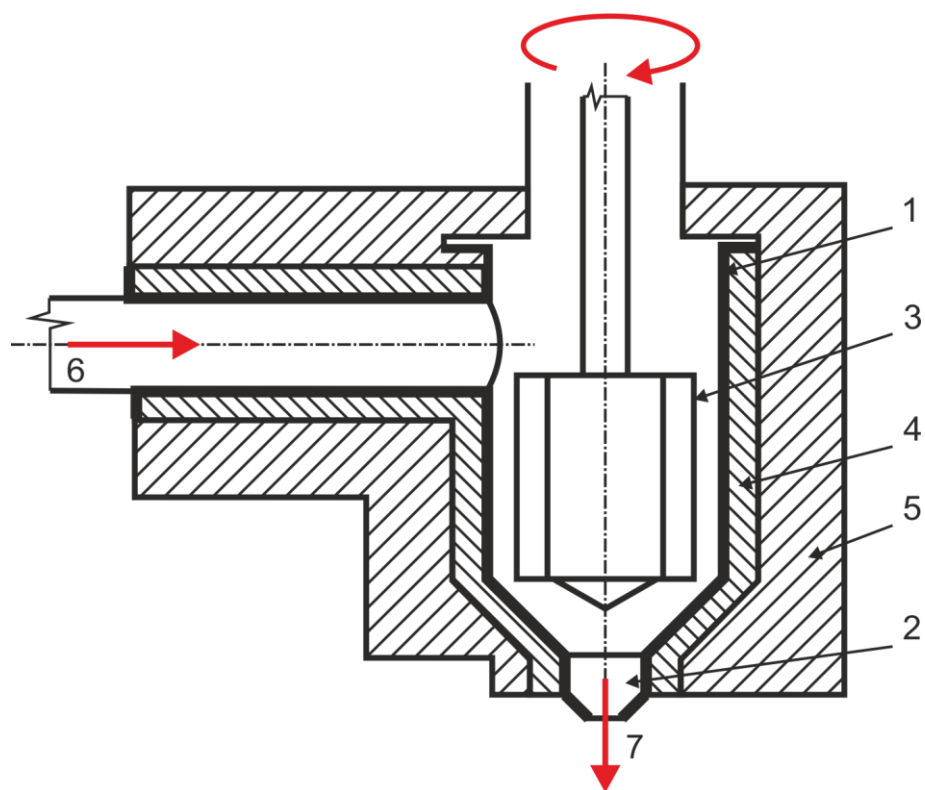
Výtokové dávkače lze rozdělit na kontinuální výtoky a platinové homogenizátory.

8.3.1 Kontinuální výtoky

Jedná se o výtoky proužků kruhového, prstencového nebo obdélníkového průřezu, které se používají při kontinuální výrobě tyčí, trubek, vláken, mačkání komponent bižuterie a další. Lze sem zařadit i výtok skloviny ve tvaru pásu na cínovou lázeň při výrobě plaveného skla technologií FLOAT, který navazuje na výtokový kanál. Regulace množství skloviny se u nátoku na cínovou lázeň provádí předním hradítkem (kap. 9.6.3). U kontinuálního výtoku, např. při výrobě bižuterních komponent, dochází k výtoku skloviny z otvoru kruhového průměru a množství skloviny je regulováno zářezem (kap. 9.3.3). V případě výroby trubíc systémem VELLO má průřez skloviny tvar prstence. Vnitřní dutina je vytvářena dutým trnem s tvarovkou na konci (dutým plunžrem), kterým je přiváděn vzduch pod mírným tlakem. K homogenizaci skloviny dochází podobně jako u plunžrového dávkače pomocí otáčející se trubky (kap. 9.7.3). Podobně je dávkování skloviny řešeno u výroby rokařových trubiček (kap. 9.7.5).

8.3.2 Platinové homogenizátory

Platinové homogenizátory jsou napojeny na koncovou část žlabu a řeší vedle míchadel v samostatném žlabu dávkače konečnou chemickou a tepelnou homogenitu skloviny pro její následné tvarování, schéma je uvedeno na Obr. 8.15. Z platinových homogenizátorů se získává sklovina vynikající jakosti, která má vhodný teplotní gradient pro tvarování, tedy vyšší teplota je na povrchu vytékajícího proužku a nižší v jeho středu. Homogenizátory se používají běžně při výrobě komponent skleněné bižuterie, optického a užitkového skla. Plášť platinového homogenizátoru tvoří obvykle plech ze slitiny platiny a přísadou 20 % rhodia. Příklad ohřev skloviny lze realizovat buď topnými odporovými spirálami zabudovanými v elektrických topných tělesech nebo topnými smyčkami KANTHAL-SUPER, případně přímým průchodem elektrického proudu nízkého napětí platinovým pláštěm homogenizátoru.



Obr. 8.15 Schéma platinového homogenizátoru (platinová trubka): 1 – plášť platinového homogenizátoru, 2 – výtokový nástavec, 3 – lopatkový rotující kopist, 4 – elektrické odporové topné těleso, 5 – vyzdívka, 6 – přítok skloviny ze žlabu, 7 – výtok proužku skloviny z homogenizátoru

9 Tvarování skloviny

První mechanizace sklářské výroby nastala již na samém počátku průmyslové revoluce, ale hlavní rozvoj sklářských strojů nastal až po roce 1850. Cílem mechanizace bylo z počátku především zvýšení objemu produkce. S rozvojem průmyslové revoluce přibýval na váze také aspekt snižování jednotkové ceny výrobku. Postupem času se vyvinuly celé linky s vysokými pořizovacími náklady, které jsou schopny produkovat velké množství výrobků. Pořizovací cena je však rozpočtena na velké množství výrobků a jednotková cena za výrobek je tedy relativně nízká.

Kapitola je členěna tak, aby zahrnula postupy a strojní zařízení na tvarování všech hlavních komodit sklářských výrobků. V úvodu jsou uvedeny historické spojitosti při vývoji sklářských tvarovacích technologií. Závěrem je připojena podkapitola zabývající se materiály a zásadami konstrukce sklářských forem, s nimiž se u jednotlivých tvarovacích strojů, až na výjimky, lze setkat.

9.1 Vývoj technologií tvarování v historickém kontextu

Základním výrobním nástrojem byla sklářská píšťala, která byla používána jak pro výrobu luxusního, užitkového a obalového skla, tak i pro výrobu plochého skla. Předpokládá se, že sklářská píšťala byla vynalezena již v 1. století před naším letopočtem. Základní výrobní postupy s jednoduchým pomocným sklářským nářadím byly zvládnuty kolem roku 50 našeho letopočtu. Nálepníky a naběráky byly známy již od 12. století včetně základního nářadí, tj. především různých typů pinzet, nůžek, kleští, svaláků, rádla a razníků.

České sklářství bylo od posledního desetiletí 17. století a během 18. století spojeno s pojmem český křišťál, ze kterého bylo vyráběno **luxusní zboží**. Výroba byla ruční za použití různých přípravků. Tento stav trval relativně dlouho. V případě levnějšího lisovaného skla byly zaváděny po roce 1900 poloautomatické lisy zcela jednoduché konstrukce s ručně otáčeným stolem karuselového typu se 6 až 9ti formami (pozicemi). Lisování bylo prováděno pneumatickým válcem, ale dávkování skloviny bylo ruční. Později postupně zaváděné automatické lisy využívaly již nově vyvinutých automatických dávkovačů skloviny a otáčení stolu bylo již rovněž automatické.

S komplexní automatizací výroby **užitkového skla** se lze setkat až v 70. letech 20. století. Po zahraničním vzoru byla roku 1972 v Novém Boru uvedena do provozu první automatická linka (LINKUŽ) v Československu na automatickou výrobu užitkového skla (kalíškoviny a odlivek). Postupně v závodě přibývaly další, od roku 1978 pracovala jedna linka též ve Světlé nad Sázavou (později další na olovnatý křišťál, např. soubor LAURA). Novinkou byly roku 1975 poprvé instalované lisovstříkové stroje. Ruční výroba nápojového skla sice přetrvávala až do konce socialismu, ale její objem se snížil.

V 70. – 80. letech se nové technologie uplatnily též při výrobě lisovaného skla, jednalo se o lisování bez kroužku, odstředivé lití, dotváření předlisovaných předmětů volným propadáváním nebo svěšováním, na významu znovu nabylo lisofoukání. Na rozdíl od ostatních druhů českého užitkového a dekorativního skla se lisované sklo výrazněji uplatňovalo na domácím trhu.

Dominance českého křišťálu vytlačila výrobu **obalového skla** (obyčejných lahví) do pozadí, protože pro sklárny bylo výhodnější vyrábět luxusní duté sklo. Výroba obalového skla tak na našem území skomírala. Až na přelomu 18. a 19. století se začala situace v obalovém skle měnit. Postupně stoupal zájem o obalové sklo zejména na umělé a přírodní minerální vody a pravděpodobně i na víno. V první polovině 19. století se objevují při výrobě obalového skla ve světě technické novinky, které zjednodušovaly a zefektivňovaly práci skláře. Jednalo se o různé lisy, nášlapné sklářské formy – tzv. šlapáky, kdy sklář ovládá formu sešlápnutím, zrychlila se tak práce a ubylo pomocníků, dále to byly lahvářské kleště pro manipulaci s polotovarem při výrobě láhve, válečkové ústní kleště na tvarování ústí láhve, začínaly se více používat tří a čtyřdílné kovové formy (litinové) a další. To umožňovalo racionalizovat a zlevnit výrobu. Přesto jeden sklář a jeden odnašeč tehdy vyrobili 400 až 500 lahví za 8 hodin. V roce 1886 bylo v Anglii uvedeno do provozu první poloautomatické zařízení, tzv. Ashleyův stroj. Ashley objevil tvarovací princip, který je využíván dodnes nejmodernějšími lahvářskými stroji. Místo jedné formy, která se používala při ruční výrobě, měl tento stroj formy tři: přední (která tvaruje polotovár), ústní (tvarující ústí obalu) a konečnou (v té je polotovár tvarován do finální podoby skleněného obalu), kap. 9.4. Snad nejvýznamnějším vynálezem bylo dávkování kapky do přední formy (kap. 8.2) a převrácení předního tvaru. Opět je těchto vynálezů využíváno u moderních sekčních (řadových) strojů dodnes, kap. 9.4.3.

Opravdová revoluce přišla v obalovém skle se zavedením výroby na sacofoukacích strojích Owens. Tento stroj se začal po několikaletém intenzivním a náročném vývoji v USA poprvé vyrábět v roce 1905. Výkon jednoho stroje se mezi válkami uváděl v rozmezí 1000 až 1500 lahví za hodinu a v té době i velcí výrobci obalového skla měli problém takovéto objemy na trhu prodat. Tento stroj znamenal začátek konce malých skláren zaměřených na obalové sklo a významně přispěl k plné automatizaci výroby skla. Pozoruhodná je i životnost strojů Owens a jejich nadčasová konstrukce. V Československu byl poslední ze strojů vyřazen až v roce 1982. Úspěch automatu Owens následovaly další typy strojů, např. Roirant, Lagen, AMCO, Pötting. Tyto stroje většinou měly menší výkon než Owensův stroj, což bylo často bráno jako výhoda.

Významným činem poválečné doby Československa v oblasti obalového skla bylo zavedení sekčních strojů Hartford IS (IS – individual section, jednotlivé sekce). Vyvinut byl v USA již kolem roku 1925. K rozhodujícímu kroku ve vývoji československé výroby obalového skla vedlo rozhodnutí vyvinout a vyrobit vlastní řadový stroj AL. Ve Sklostroji Turnov vznikla konstrukční kancelář a podnik byl náležitě rozšířen. Tomu, aby byl vyvinut stroj na světové úrovni, pomohla znalost dovážených strojů Hartford IS. Sklostroj na nich prováděl mnoho let generální opravy a výměny náhradních dílů. Prototyp šestisekčního stroje AL byl vyzkoušen v roce 1961 a v roce 1962 uveden do provozu v československých sklárnách.

Firmou Heye byla vyvinuta technologie úzkohrdlého lisofoukacího způsobu výroby obalového skla. To umožnilo snížení hmotnosti lahví i více než o 40 %. Technologie byla adaptována také na řadové stroje a v licenci použita i na stroje vyrobené ve Sklostroji Turnov.

V případě **plochého skla** se nejprve vyrábělo tzv. terčíkové sklo, což byla kolečka průměru 100 až 150 mm zasklívaná do olověných lišt. Do 17. století patřila na území dnešní České republiky k běžnému sortimentu výrobků lesních hutí. Od 14. století je vyráběno

ploché sklo zdokonalenou technologií, tzv. měsíční sklo (nebo také korunové sklo). Na přelomu 14. a 15. století byla také vyvinuta technologie výroby plochého skla z válců. Všechny zde uvedené technologie byly založeny na použití sklářské píšťaly a lze je označit za ruční výrobu.

V období průmyslové revoluce byly zachovány technologie z předchozího období, především výroba z válců. Výroba se sice racionalizovala, ale především organizací práce, změnou otopu pecí a dílčími změnami umožňujícími výrobu větších válců a tím i větších rozměrů tabulí skla.

Po roce 1900 šel vývoj nejprve cestou mechanizace výroby plochého skla z válců. Počátkem 20. stol. anglická společnost Pilkington Brothers vyřešila tvarování tabulí z válců o délce až 4 m a průměru 0,6 m foukaných stlačeným vzduchem a v roce 1903 American Window Glass Co., u nás známá jako Oppermann - Lubbers, vyřešila obdobnou technologii s válci o délce až 13,4 m a průměru 0,6 – 1 m foukanými stlačeným vzduchem. Přes nesrovnatelně větší produkci skla v porovnání s ruční technologií nakonec tato technologie neobstála v konkurenci s technologií založenou na tažení skla z povrchu roztavené skloviny. Na území dnešní ČR byla používána technologie Fourcault¹¹, která je založena na vertikálním tažení plochého skla (nekonečného pásu) z hladiny skloviny přes výtlačnici, kap. 9.6.1.1. První průmyslová výroba touto technologií byla spuštěna v roce 1916 ve sklárně Dampremy, komerční výroba pak v roce 1919 v Československu v Hostomicích u Bíliny. Vedle technologie Fourcault se uplatnily ve světě další podobné technologie jako je například americký systém Colburn (nazývaný též Libbey-Owens) nebo technologie Pittsburgh.

Přestože technologie tažení plochého skla z povrchu roztavené skloviny postupně nahradily ruční výrobu, byla tato technologie v druhé polovině 20. století postupně nahrazena progresivnější technologií, která umožnila vyrábět ploché sklo ve vyšší kvalitě. Novou technologií bylo plavení skla na cínové lázni, tzv. technologie FLOAT, kap. 9.6.3. První zmínka o využití principu technologie plavení skla na hladině roztaveného kovu pochází již z poloviny 19. století (Henry Bessemer, britský patent z roku 1848). Ovšem klíčové problémy technologie, jako bylo její omezení jen na tloušťku okolo 6 mm nebo inertní atmosféra nad cínovou lázní a spolehlivé fungování technologie, bylo dořešeno až firmou Pilkington Brothers mezi lety 1953 až 1957. Následně, až po roce 1960, byla technologie zisková. Přestože do oblasti vývoje technologie FLOAT čeští skláři nezasáhli, byli v tzv. Sovětském bloku prvními, kteří revoluční technologii získali a v roce 1969 začali vyrábět ploché sklo s vysokou jakostí. Tehdy byla kapacita této linky 280 tun za den (t/24 hod.). V roce 1988 byla uvedena do provozu druhá linka Float II s kapacitou 700 t/24 hod.

Vývoj v **komponentech skleněné bižuterie** začal nejprve u imitací pravých kamenů a perel. Již ve středověku vzniká vedle poptávky po pravých kamenech i poptávka po levnějších imitovaných kamenech a počátkem 16. století přicházejí Benátčané s těmito imitacemi. Skleněné kameny byly nejdříve vybrušovány z kousků, které vznikly rozbitím utaveného vysoce olovnatého skla vysokého lesku, tzv. kompozice. Inovací, kterou lze označit za počátek racionalizace bižuterní výroby, bylo odlévání polotovarů pro imitace

¹¹ Autorem principu je Emil Gobbe, ale historie nazvala technologii po Fourcaultovi, který ji zdokonalil a přivedl k průmyslovému nasazení.

v hliněných formičkách. Tvar vzniklého polotovaru tak bylo možné uzpůsobit požadavkům zákazníka a následným zušlechťovacím operacím. V případě výroby perlí bylo vedle technologie foukání hojně využíváno i ručního navíjení na drát. V druhé polovině 18. století se podařilo výrobní proces zjednodušit. Z kompozičního skla byla vytažena a ochlazená krátká tyč jako polotovar (první podoba později hojně používané mačkárenské tyče). Sklář tyč za jeden konec držel a druhý konec zahříval v pícce. Nahřátý konec byl tvarován pomocí kleští. Vzniká tak technologie mačkání. Výsledný polotovar pak byl dobroušen do požadovaného tvaru a nemusel se složitě vybrušovat, což výrobu nejen zrychlilo, ale současně i díky nadprodukcí zlevnilo.

V roce 1829 byl neznámým výrobcem vynalezen mačkaný knoflík. Jednalo se o velmi důležitou technologickou inovaci, vedoucí ke snížení ceny. Inovace se rychle rozšířila. V 60. letech 19. století byly knoflíky hlavním exportním artiklem bižuterního průmyslu na Jablonecku.

Mezi lety 1900 a 1945 byla snaha mechanizovat výrobu. Nejstarším automatickým strojem na mačkání nepíchaného zboží je rotační mačkadlo (kap. 9.3.3), které bylo známé od 20. let 20. století. Tímto vysoce produktivním způsobem se dodnes vyrábí šatonová surovina¹². Zásadní problém spolehlivé mechanizované výroby perlí (výrobků opatřených dírkou) však i přes několik patentů vyřešen nebyl. Mechanizace výroby tohoto sortimentu se objevovala v zahraničí jen sporadicky.

Po roce 1946 se podařilo postupně mechanizovat a následně automatizovat výrobu perlí. Prvním strojem bylo Kopalovo mačkadlo (kap. 9.3.3), kde na rozdíl od ručního mačkání jsou pákové převody nahrazeny převody vačkovými a jejich pohon je zajištěn elektromotorem přes řemenové převody. Automatické mačkání bylo umožněno díky zprovoznění Maturova mačkadla (kap. 9.3.3), které je i dnes jedním z nejčastěji používaných zařízení, především díky své flexibilitě, relativně vysokému výkonu, nízkým výrobním nákladům a produktivitě.

V 70. letech 20. století byly vyvinuty bezbrokové technologie na automatizovanou výrobu bižuterie, kdy polotovary nejsou po tvarování spojené sklovinou, tzv. brokem. Tím se šetří náklady na tavení skloviny a náklady spojené s následným odstraňováním broků.

9.2 Základní principy tvarování skla

Obecně platí pro všechny tvarovací technologie základní pravidlo. Při tvarování skloviny je třeba vhodným způsobem udělit dávce požadovaný tvar, tedy dávka musí mít dostatečně nízkou viskozitu na to, aby se dala dobře tvarovat. Viskozita se u běžných technologií pohybuje v rozmezí 10^2 až 10^7 Pa·s (oblast tvarování, kap. 3.1). Po získání potřebného tvaru je naopak požadavek opačný, a to zvýšit viskozitu natolik, aby se tvar fixoval a umožnil vyjmutí výrobku bez deformace, tedy pod deformační teplotu 10^{10} Pa·s, M_g (dilatometrický bod měknutí). Zvýšenou viskozitu mají ovšem po tvarování pouze povrchové vrstvy výrobku a je třeba počítat s prohříváním těchto vrstev zevnitř. Viskozita povrchové vrstvy by vlivem prohřátí mohla klesnout tak, že by se výrobek při manipulaci deformoval,

¹² Surovina pro výrobu šatonů, které jsou nejvíce vyráběnými bižuterními kameny.

výrobek se proto musí ochladit více. Oblast deformace je zhruba v rozmezí 10^9 až $10^{11,5}$ Pa·s.

Jak vyplývá z výše uvedeného, základní vlastností, kterou je třeba respektovat, je viskozita skloviny a její teplotní závislost (kap. 3.1). Viskozita skloviny v průběhu většiny technologií tvarování nepřetržitě stoupá (klesá teplota skloviny). Další důležitou vlastností působící při tvarování je povrchové napětí (kap. 3.2), které může přímo tvarovat, příznivě působit na kvalitu povrchu nebo naopak nežádoucím způsobem zaoblovat hrany. Důležité jsou další tepelné vlastnosti skla, ale i tvarovacích nástrojů, které ovlivňují odvod tepla z povrchových vrstev tvarovaných výrobků (kap. 3.4).

Vhodné je na tomto místě zmínit tepelné poměry při tvarování skla. Teplo přechází jednak vedením a jednak sáláním.

Množství tepla Q [J, Wh], které prochází stěnou výrobku, je možné odvodit ze vzorce 3.28 (kap. 3.4.4)

$$Q = Q_T \cdot \tau = \frac{k A \Delta T}{d} \tau, \quad (9.1)$$

kde Q_T je tepelný tok [W],

τ - doba, za kterou dojde k průchodu tepla [h],

k - součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] (závisí na chemickém složení skla a na teplotě),

A - plocha stěny, kterou teplo kolmo prochází [m^2],

ΔT - teplotní rozdíl protilehlých povrchů [K],

d - tloušťka stěny [m].

Přestup tepla ze skloviny do sklářské formy je komplikovanější a zahrnuje akumulaci schopnost skloviny E_s (u neolovnatých sklovin je při teplotě 400 až 700 °C $E_s = 2130 \text{ J} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$) a materiálu formy E_f . Teplo prošlé stěnou je dáno vztahem

$$Q = \Delta T \frac{2/\sqrt{\pi}}{\frac{1}{E_s} + \frac{1}{E_f}} \sqrt{\tau} A. \quad (9.2)$$

Vztah 9.1 platí také pro množství tepla prošlé stěnou formy při dosažení součinitele tepelné vodivosti formy.

Přestup tepla ze sklářské formy do okolí je dán vztahem

$$Q = \Delta T \alpha_e \tau A, \quad (9.3)$$

kde α_e je součinitel přestupu tepla z vnějšího povrchu sklářské formy do okolí.

Uvedené vzorce platí pro plochy a pro ideální stavy. V reálných podmínkách je problematika mnohem komplikovanější a zjednodušený přístup se musí zpřesňovat. Vedle tohoto přístupu se v praxi uplatňuje s výhodou výpočet s užitím výpočetní techniky aplikací

metody konečných prvků. Numerický model ale vyžaduje vstupní data z praxe a jeho přesnost stoupá nebo klesá se zkušeností výpočtáře.

Při tvarování se kromě tepelných procesů uplatňuje především mechanické působení sil. Principy technologií používaných při tvarování skloviny je možné rozdělit na:

- a) **Tvarování působením vnější síly**, především otiskem tvarovacího nástroje (formy) – například lisování, lisovstřík, mačkání.
- b) **Tvarování účinkem vnitřních sil**, především sil povrchového napětí při dostatečně nízké viskozitě – například technologie plavení plochého skla (float), tažení trubic, kapilár, obecně také volné vyfukování.
- c) **Vzájemnou kombinací** – například lití mačkárenských tyčí (spodní část je tvarována článkovým dopravníkem a vrchní povrchovým napětím), foukání do forem – při tvarování foukáním do formy bez rotace je vnější část polotovaru tvarována otiskem formy a vnitřní povrch povrchovým napětím, – při tvarování foukáním s rotací výrobku nebo formy je základní tvar udělen tvarem formy a povrch vnější i vnitřní části zřetelně ovlivněn povrchovým napětím, neboť mezi sklem a formou se vytváří „parní polštář“.

Je také vhodné zmínit základní koncepce sklářských strojů. Zpočátku mechanizace a automatizace tvarování skloviny se uplatňovaly stroje jednopozicové. V jedné pozici se prováděly všechny technologické operace tvarování. Vzhledem ke snaze zvýšit produkci a zkrátit výrobní časy na jeden výrobek se začaly uplatňovat stroje vícepozicové, které mohou být řešeny formou karuselu, jako stroje tzv. řadové, nebo stroje konvejerové. Karuselové stroje mají po obvodu několik pozic, které se buď plynule nebo častěji přerušovaně otáčejí. Řadové stroje jsou především rozšířeny ve výrobě obalového skla.

9.3 Tvarování skloviny lisováním a mačkáním

Při lisování a mačkání je výsledný tvar získán především vnějšími silami, které působí na dávku o relativně nízké viskozitě, tedy sklovina je dostatečně tvárná a musí účinkem lisovací síly dokonale vyplnit formu. Vlastní tečení skloviny probíhá velice rychle a závisí na velikosti lisovací síly, na viskozitě skloviny v okamžiku lisování, na tvaru formy a na velikosti dávky.

Forma, ve které dochází k tvarovacímu procesu, má dvě funkce:

- tvarovat výrobek,
- odvést z výrobku potřebné množství tepla, tím zvýšit viskozitu a fixovat tak tvar.

Rychlost tvarovacího procesu je hlavně při strojní výrobě dána dobou nutnou k odvedení tepla z povrchu výrobku tak, aby výrobek při manipulaci zachoval svůj tvar. Rychlost tak není limitována dobou potřebnou k vyplnění formy, protože k tomu dochází prakticky okamžitě po uzavření formy. Teplota formy je vždy nižší než teplota lisované skloviny. Ihned po prvním styku skloviny s formou klesne povrchová teplota výlisku a zvýší se povrchová teplota formy. Teplo je sklovinou předáváno formě a odtud přechází do okolního prostředí. Odvod tepla z formy je téměř vždy podpořen různými způsoby chlazení.

S ohledem na požadavek dokonalého vyplnění formy sklovinou je třeba, aby její transport byl co nejkratší. Dávka by se tak před lisováním měla svým tvarem a umístěním ve formě co nejvíce blížit tvaru hotového výlisku.

Vady lisovaných nebo mačkaných výrobků mohou být způsobeny např. příliš nízkou teplotou povrchu formy (vysoké mechanické zatížení) nebo naopak příliš vysokou teplotou formy, kdy může docházet k „lepení“ skloviny na formu. Teplota lepení se pohybuje přibližně v rozmezí 550 až 630 °C a závisí na době kontaktu, lisovacím tlaku a použití mazadel forem. Chemické složení skloviny a její povrchové napětí, vliv materiálu formy a jejího povrchu je zanedbatelný. Další vadou mohou být propady na větších plochách, které jsou způsobeny prohříváním těchto ploch z vnitřních vrstev výrobku a smrštěním, které je tímto kompenzováno.

Lisovací stroje (lisy) slouží k výrobě užitkového, technického a optického skla, ale i k výrobě polotovarů skleněné bižuterie. Proces lisování je ve srovnání s dalšími výrobními způsoby relativně jednoduchý a probíhá prakticky v jedné formě a jedné pracovní operaci. Při stavbě lisovacích strojů je nutné respektovat tyto zásady:

- tvar lisovaných výrobků musí být navržen tak, aby je po lisování bylo možno vyjmout z formy (forma může být i dělená),
- dutina výrobku musí mít hladké stěny a tvar umožňující vysunutí razníku,
- lisovat nelze výrobky tenkostěnné, neboť sklovina rychle ztrácí tvarovatelnost a v důsledku odvodu tepla stěnou formy se stává křehkou,
- kvalita povrchu lisovaných výrobků v důsledku styku se stěnou formy není ideální a v některých případech je nutné uplatnit další (zušlechťovací) operaci. Problém se někdy řeší volbou povrchového reliéfu, který vzniklé defekty maskuje (např. stínítka lamp).

Použitá lisovací síla může být vyvíjena:

- mechanicky,
- pneumaticky nebo
- hydraulicky.

Podle úrovně konstrukce jsou rozeznávány lisy:

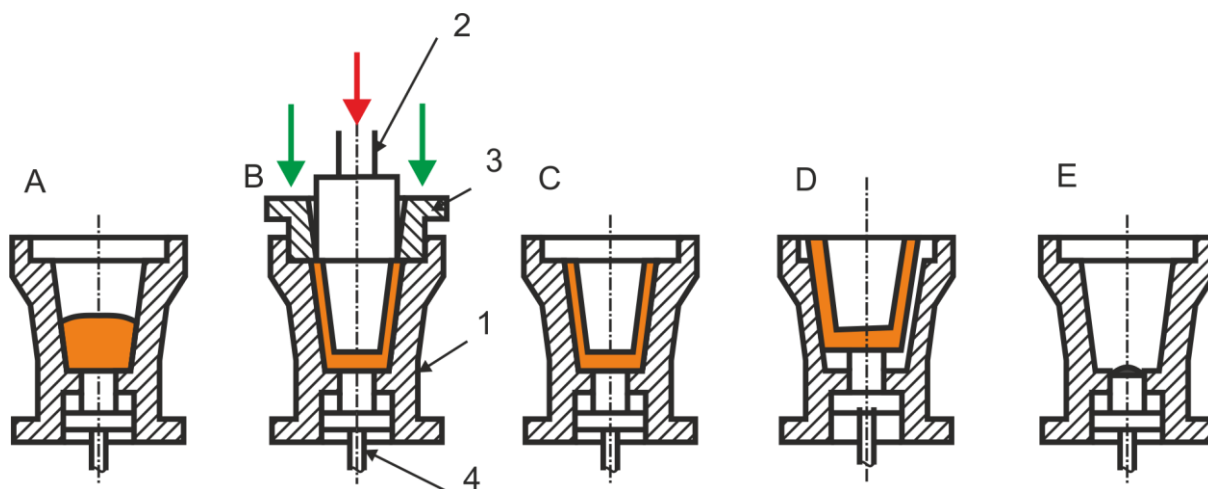
- ruční,
- poloautomatické nebo
- automatické.

Dalším kritériem pro rozlišování lisů může být technologie výroby. Buď se jedná o klasické uspořádání s razníkem a lisovacím kroužkem (kap. 9.3.1) nebo o lisy se vstřikovací komorou (kap. 9.3.2) a konečně o speciální lisy (mačkadla) používané při výrobě skleněné bižuterie (kap. 9.3.3).

9.3.1 Lisování skloviny

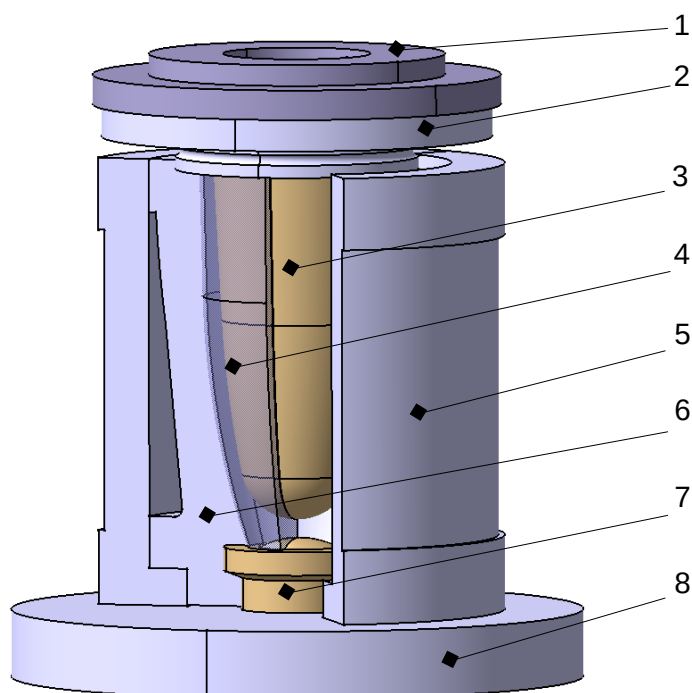
Na Obr. 9.1 je schematicky znázorněn postup lisování: dávkování skloviny některým z kapkových dávkovačů, samotné lisování (lisovací kroužek tvaruje horní okraj výlisku), chlazení výrobku (zvýšení viskozity povrchových vrstev), odebrání hotového výrobku,

tepelná úprava formy a razníku (ohřívání nebo chlazení), čištění a mazání formy. Na Obr. 9.2 je zobrazena sestava lisovací formy.



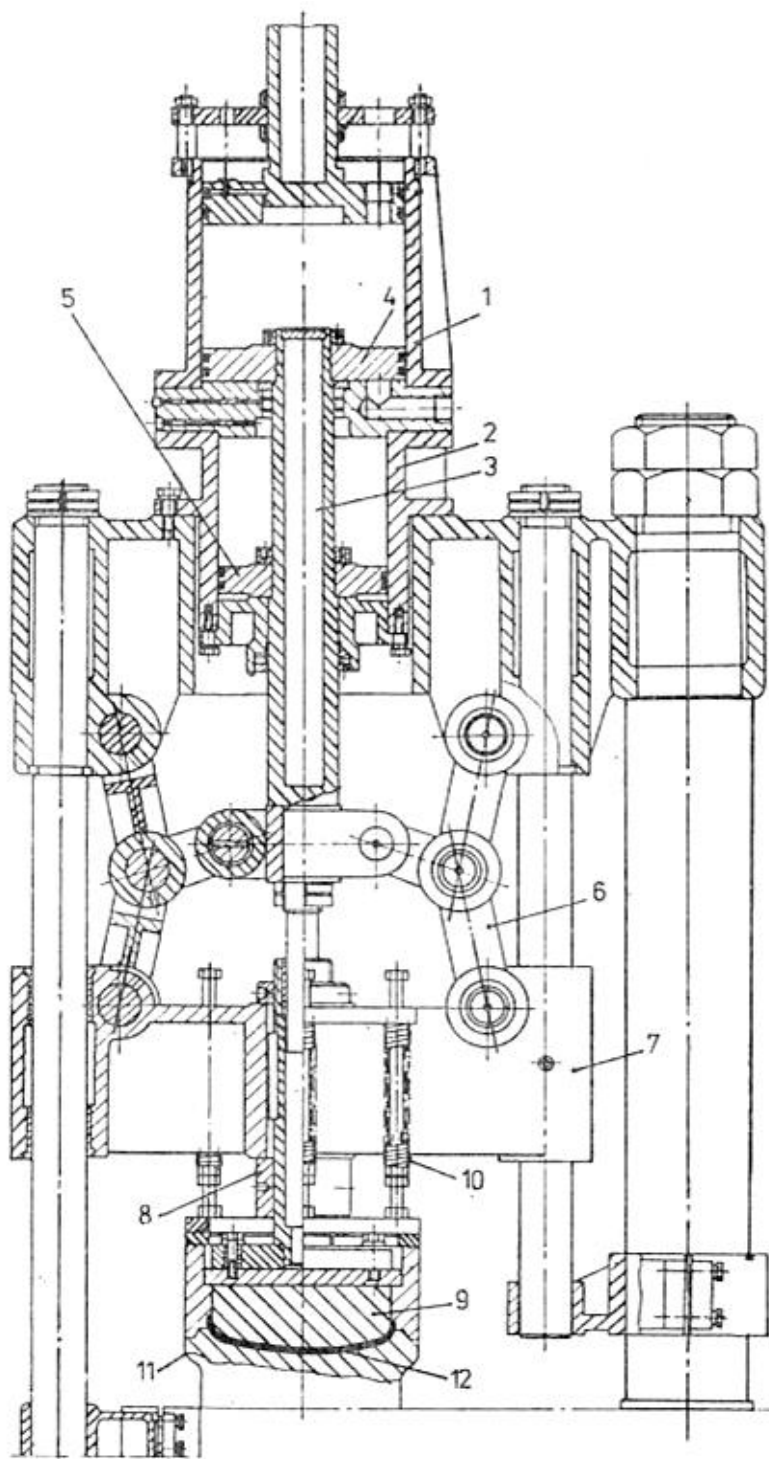
Obr. 9.1 Lisování s razníkem a lisovacím kroužkem: 1 – lisovací forma, 2 – razník, 3 – lisovací kroužek, 4 – vyhazovač, A – dávkování, B - lisování, C – chlazení, D – vyjímání vylisku, E – temperování razníku, čištění a mazání formy

Ruční lisy se používají zejména při malosériové výrobě menších vylisků. Lisovací síla je vyvozována ručně pomocí pákového mechanismu, který umožňuje její vícenásobné zvětšení.

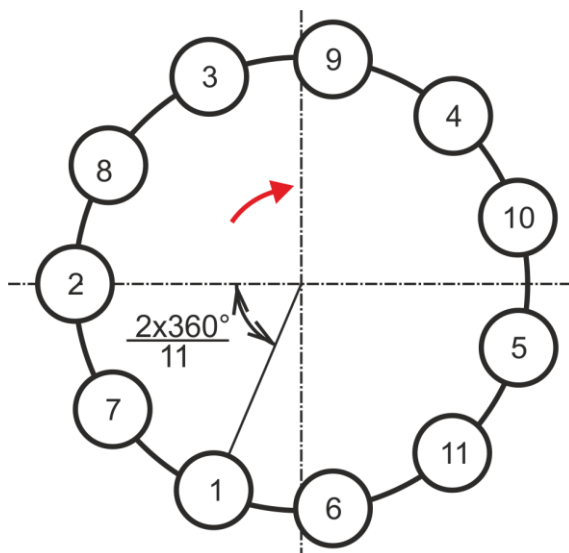


Obr. 9.2 Lisovací forma: 1 – upínací deska, 2 – kroužek, 3 – razník, 4 – výrobek, 5 – držák, 6 – vložka sklářské formy, 7 – dýnko, 8 – deska stolu

Při výrobě velkých skleněných výlisků (např. stavební tvárnice) se používá pneumatický lis LTB-1, jehož schéma je uvedeno na Obr. 9.3. Lis je konstruován jako karuselový, význam jednotlivých pozic vyplývá z Obr. 9.4.



Obr. 9.3 Konstrukce lisovacího mechanismu lisu LTB-1 s pákovým zesilovacím mechanismem: 1,2 – souosé pneumatické válce, 3 – pístní tyč, 4,5 – písty upevněné na společné pístní tyči, 6 – pákový posilovací mechanismus, 7 – dolní pohyblivý příčník, 8 – pouzdro, 9 – razník, 10 – vodící čepy s pružinami k upevnění lisovacího kroužku, 11 – lisovací forma, 12 – výlisek

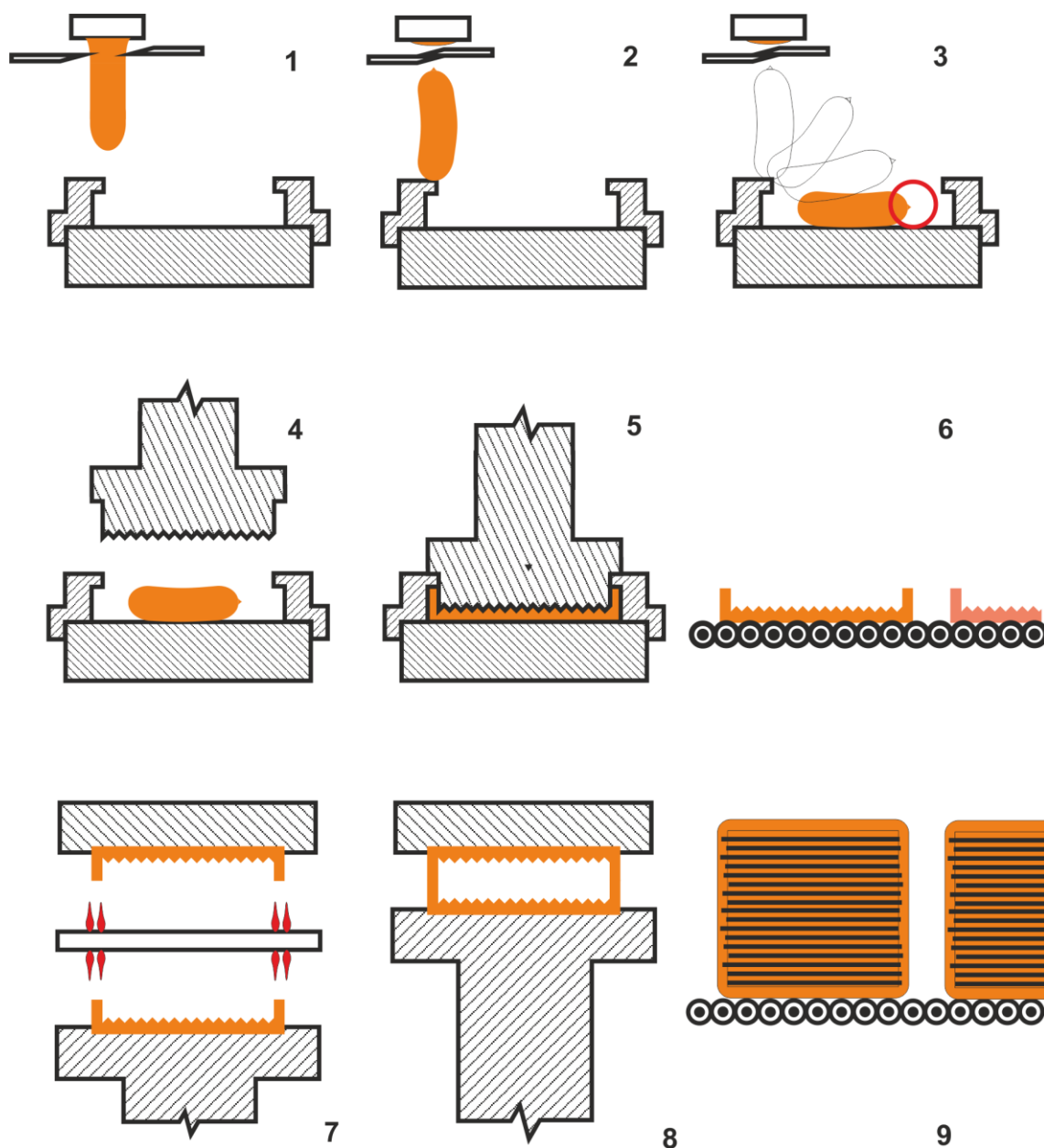


Obr. 9.4 Pracovní pozice lisu LTB-1: 1 - dávkování, 2 - lisování, 3, 4 - chlazení výlisku přes tzv. kopyto, 5, 6, 7 - chlazení výlisku shora, 8, 9 - volné chlazení, 10 - vyjímání, 11 - čištění vyfukováním a přehřev forem

Na dalším obrázku (Obr. 9.5) je schematicky znázorněn postup lisování skleněné tvárnice. Pozice 1 až 3 ukazují uložení dávky skloviny do formy, pozice 4 a 5 vlastní lisování, pozice 6 transport výlisku, z pozic 7 a 8 je patrné spojení dvou opačně orientovaných výlisků nahřátím jejich okrajů, přiblížením a přitlačením, pozice 9 představuje transport výrobku do chladicí pece.

Vedle uvedených příkladů se lze setkat s lisy různého provedení a určení, příkladem je automatický karuselový lis (Obr. 9.6) a jednopozicový lisovací modul (Obr. 9.7).

Na Obr. 9.8 je uvedeno schéma výrobní linky na užitkové sklo, v níž je jako tvarovací stroj zařazen karuselový lis.



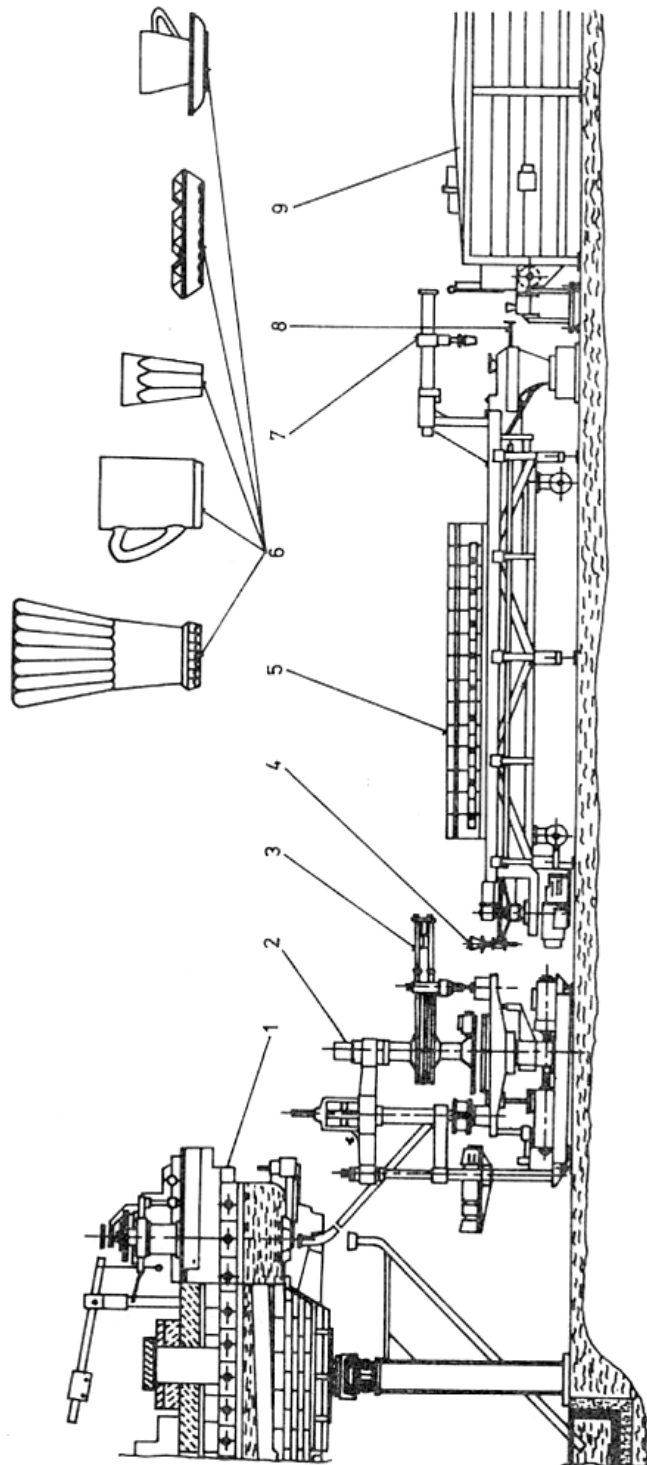
Obr. 9.5 Postup lisování skleněné tvárnice: 1 až 3 – dávkování, 4 a 5 – vlastní tvarování, 6 – transport polotovárů, 7 – nahřátí okrajů dvou opačně orientovaných výlisků, 8 – přiblížení a přitlačení, 9 – transport hotových výrobků



Obr. 9.6 Automatický karuselový lis



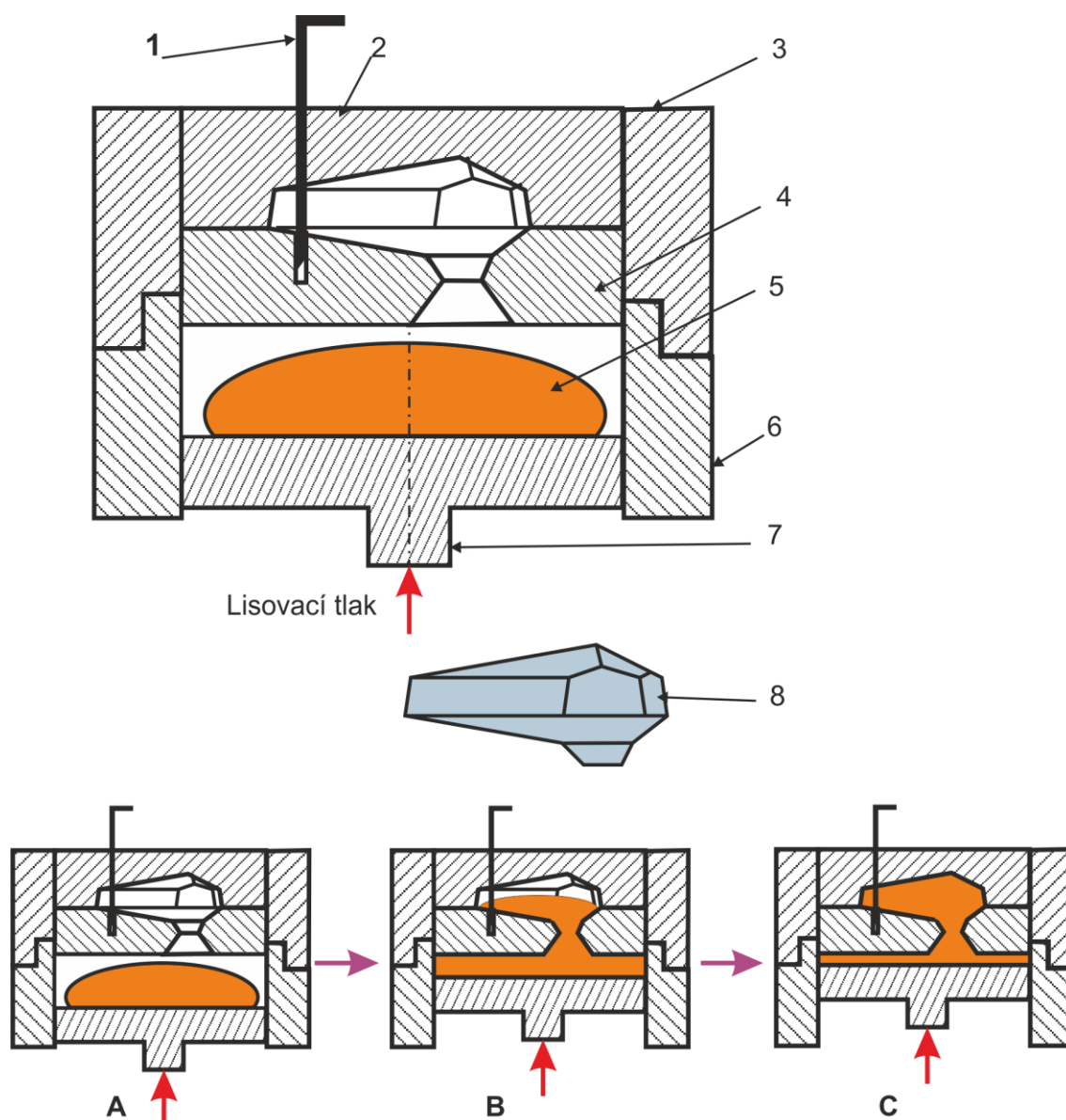
Obr. 9.7 Jednopolicový lisovací modul



Obr. 9.8 Schéma výrobní linky na užité sklo fy Eurovetromechanica: 1 – žlab dávkovače a mechanický kapkový dávkovač, 2 – karuselový lis, 3 – pneumatický odnímač výrobků, 4 – výlisek, 5 – zapalovací stroj, 6 – sortiment výlisků, 7 – odnímač, 8 – zasouvač, 9 – chladičí pec

9.3.2 Lisovstřík

Příkladem zařízení se vstříkovou komorou může být tzv. lisovstřík používaný u menších výrobků bez dutiny jako jsou např. menší lustrové ověsy, stonky kalíšků apod. U velmi malých výrobků je možno tímto způsobem vylisovat i více kusů současně, čehož se využívá např. u karuselových automatů firmy Persiano. Princip výroby (Obr. 9.9) spočívá v dávkování kapky skloviny na stolek lisovací stanice (razník), který pohybem vzhůru uzavře sestavu tvarovacích forem. Pak dojde k zasunutí jehel (v případě píchání otvoru) a sklovina je pod tlakem vstříknuta do uzavřeného prostoru, kde se vytvoří polotovár. Kovové formy odvedou teplo a sklovina zatuhne. Ihned po ukončení lisování dojde k vysunutí jehel, aby nedošlo k jejich přehřátí, lisovací stanice se stolem sjede dolů a je připravena na další dávku skloviny. Výlisky jsou následně uvolněny (vyklepány) a vloženy do chladicí pece.



Obr. 9.9 Lisovstříková technologie na stroji G 12: 1 – píchací jehla, 2 – horní forma, 3 – rámeček sestavy forem, 4 – spodní forma, 5 – dávka skloviny, 6 – dávkovací forma, 7 – stolek lisovací stanice (lisovací píst), 8 – hotový výlisek, A – uzavřená forma, B – průběh lisování (vyplnění formy), C – ukončení lisování

9.3.3 Mačkání skloviny

Technologie mačkání je ve své podstatě lisování menších nebo drobných výrobků, kdy technologie umožňuje rychlé přizpůsobení požadavkům výroby širokého sortimentu velikostí, barev a tvarů.

Vývoj mačkadel prošel od ručního mačkání pomocí mačkářských kleští až po dnešní automaty a ustálil se prakticky na dvou základních principech. Je to jednak mačkání na rotačních mačkadlech, jednak na mačkadlech, která je možno nazvat přímočará. Další rozdělení je podle zdroje skloviny Obr.9.10.



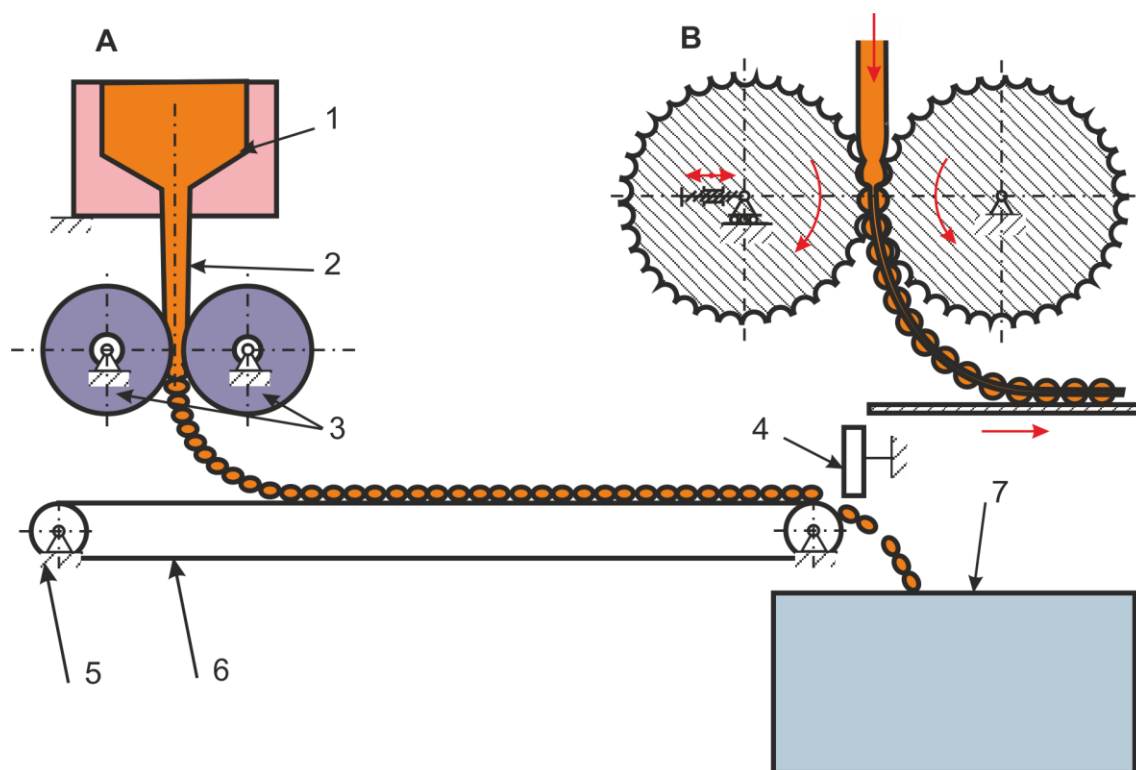
Obr.9.10 Rozdělení mačkadel podle zdroje skloviny

K mačkání se používalo a dodnes používá nahřátých konců skleněných tyčí, jejichž výroba je popsána v kap. 9.7.1. Konec skleněné tyče zahříváný v mačkářské peci má výhodný teplotní gradient. Zahříváný povrch konce tyče má vyšší teplotu než jádro konce tyče. To má příznivý vliv na tvarování, protože teplota je rychleji odváděna z povrchu než z hlubších vrstev, povrch polotovaru není po tvarování zpětně zahříván od jádra vzniklého polotovaru a také jádro nezvětšilo významně objem vlivem nižší teploty. Celkově je tak minimalizován efekt propadů na plochách výrobků. Dnes je však modernější a produktivnější mačkání přímo z nátoky nebo z přesné dávky.

Při tvarování z nátoky vytéká proužek skloviny buď z přetavovací pícky (dvoustupňová výroba) nebo z výtokového kanálu tavicího agregátu (jednostupňová výroba). Sklovina natékající v proužku má za normálních podmínek opačný teplotní gradient (teplota ve středu nátoky je vyšší než na povrchu). To může snížit kvalitu vyráběných polotovarů. Lepšího teplotního profilu lze dosáhnout vyhříváním platinovým nátokem, který zajišťuje teplotu na vnějším povrchu vyšší než uvnitř, kap. 8.3.2.

Jako první příklad zařízení pro tvarování komponent skleněné bižuterie je uvedeno rotační mačkadlo, které je představitelem automatického mačkadla. Při mačkání na rotačních mačkadlech (Obr. 9.11) se proužek roztavené skloviny přivádí mezi dvě rotující formy

(nazývané také rolny) opatřené na obvodu kaplíky. Otáčením forem sklovina vyplňuje jednotlivé kaplíky, výlisky zůstávají spojeny přebytečnou sklovinou – brokem (brokové mačkání), proužek výlisků je unášen transportním pásem a na jeho konci odlamován. Nepravidelně velké části padají do tzv. termobedny, kde pozvolna samovolně chladnou.



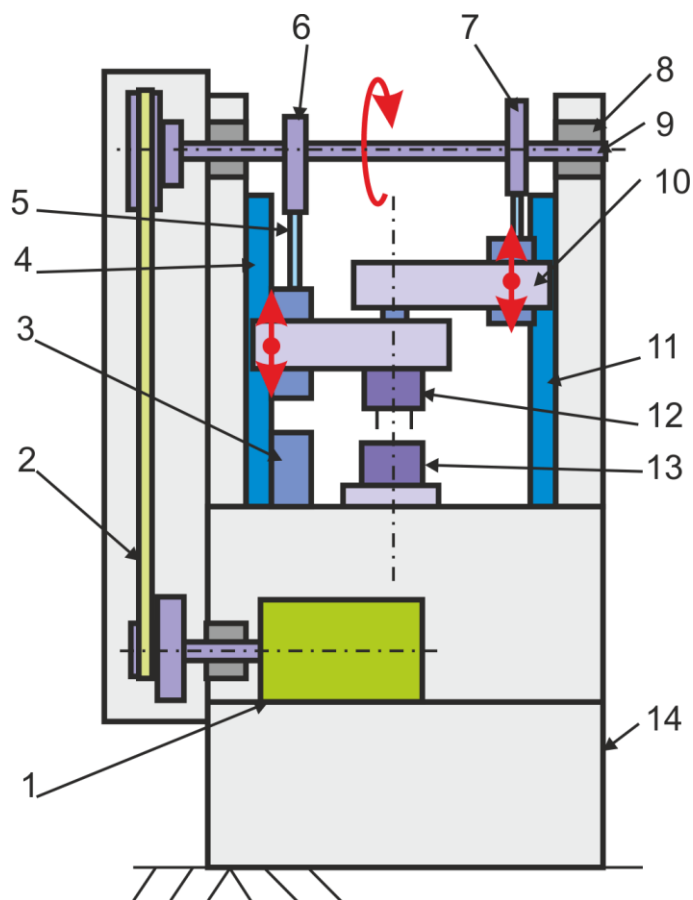
Obr. 9.11 Funkce rotačního mačkadla: A – schéma a princip, B – řez rotačními formami, 1 – zdroj skloviny, 2 – pramínek roztavené skloviny, 3 – rotační formy, 4 – odlamovač, 5 – rám stroje, 6 – transportní pás mačkadla, 7 - termobedna

Následuje odstranění přebytečné skloviny a další úprava. Hlavní charakteristikou procesu je vysoký výkon, který pro průměr perličky 2 mm dosahuje až 1 300 000 ks za hodinu a pro průměr 6 mm více než 100 000 ks za hodinu. Výrobky většinou nemají díрку a takto vyrobená surovina se používá pro výrobu šatonů.

Odlišně od principu rotačního mačkání pracují zařízení, která jsou odvozena od prvotního ručního mačkání pomocí kleští. Lze je nazvat přímočará podle směru pohybu formiček (kaplíků).

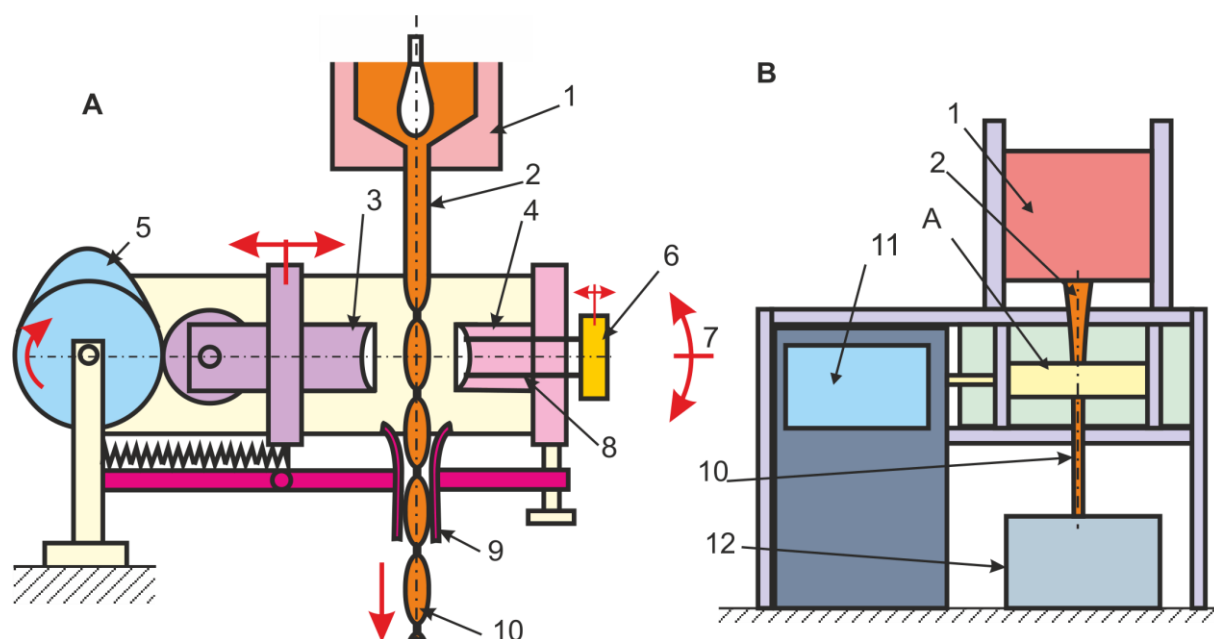
Jako příklad mechanizovaného (strojně-ručního) mačkadla se zdrojem skloviny ve formě mačkárenské tyče s přímočarým pohybem formiček lze uvést Kopalovo mačkadlo, Obr. 9.12. Mačkadlo má dvě vodící dráhy, po kterých se pohybuje smýkadlo horní formy a píchacího mechanismu. Pohon je zajištěn elektromotorem přes řemenové převody a vačku na smýkadlo. Mačkář postupně vsouvá mezi formy natavený konec mačkárenské tyče a po několika mačkáních odděluje tyč od výrobku pomocí nůžek a vymáčknuté polotovary padají do termobedny. Pohyb horní formy, horního břitu nůžek a jehel zajišťuje stroj. Formy jsou často chlazené a mohou být jednoduché (pro větší polotovary) anebo násobné. Výhodou Kopalova mačkadla je skutečnost, že jím lze jednoduše realizovat široký sortiment malých

bižuterních polotovarů. Pro každý druh skleněného výrobku lze výměnou vaček zajistit téměř optimální podmínky mačkání a píchání dírek. Nevýhodou je především nutná obsluha zařízení zkušeným sklářem.



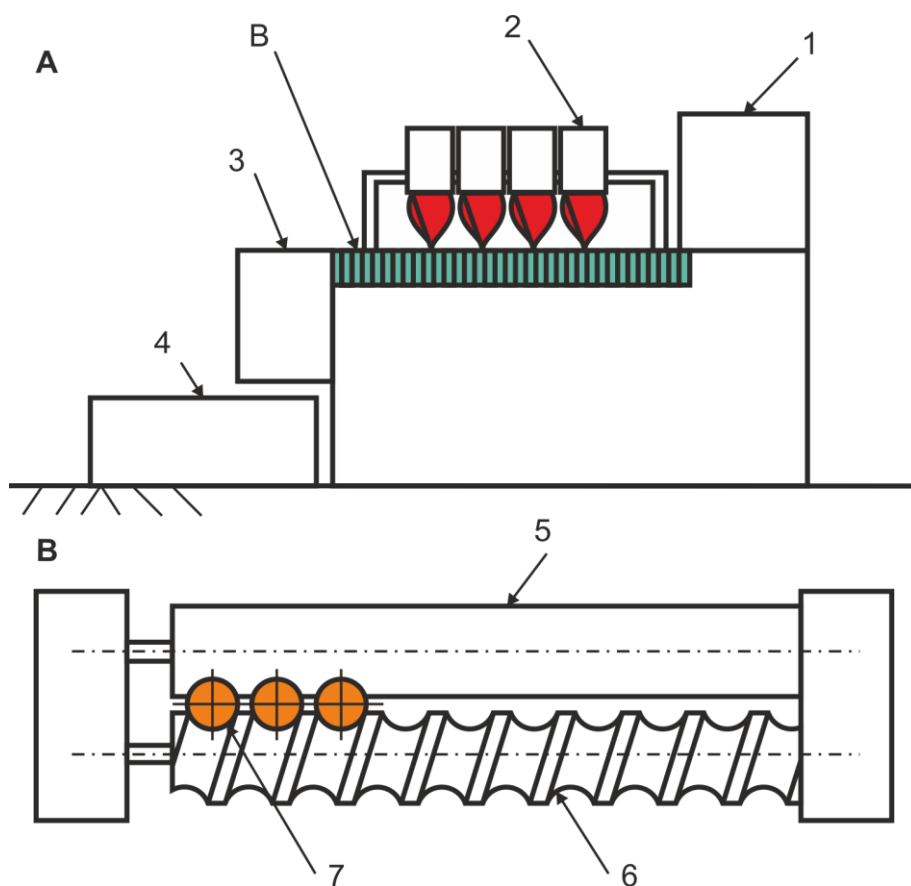
Obr. 9.12 Kopalovo mačkadlo: 1 – elektromotor, 2 – řemenový převod, 3 – břit nůžek, 4 – smýkadlo, 5 – nastavitelné táhlo, 6 – vačka pro pohyb horní části formy, 7 – vačka pro píchací mechanismus, 8 – ložisko hřídele, 9 – hnací hřídel, 10 – píchací mechanismus, 11 – smýkadlo jehelníku, 12 – horní část formy, 13 – spodní část formy, 14 – rám stroje

Jako příklad automatického zařízení s přímočarým pohybem formiček je uvedeno Maturovo mačkadlo, Obr. 9.13. Mačkadlo tvoří rám stojanu, v jedné jeho části je umístěn mačkáč mechanismus a ve druhé skříň s pohonem včetně ovládacích prvků. Proužek skloviny natéká vertikálně mezi dvojici vodou chlazených forem – kaplíků. Pevný kaplík je upnut v rámu mačkadla, druhý, pohyblivý, na posuvných saních. Pohyb saní je odvozen od vačky ovládající uzavírání forem. Vertikální pohyb obou kaplíků zajišťuje kývavý pohyb celého lisovacího (mačkáčského) mechanismu odvozený od příslušné vačky. Mačkadlo je vybaveno píchacím mechanismem, kterým lze píchat otvory ve směru osy kaplíků (tzv. píchání od vrchu) nebo kolmo k ose kaplíků (píchání ze strany), jehly jsou mazány olejem nebo olejovou mlhou. Všechny pohyby jsou řízeny vačkami na centrálním hřídeli, pohon stroje zajišťuje elektromotor přes variátor umožňující plynulou regulaci. Popsané Maturovo mačkadlo patří mezi nejčastěji používaná vzhledem ke své flexibilitě, poměrně vysokému výkonu a relativně nízkým výrobním nákladům.

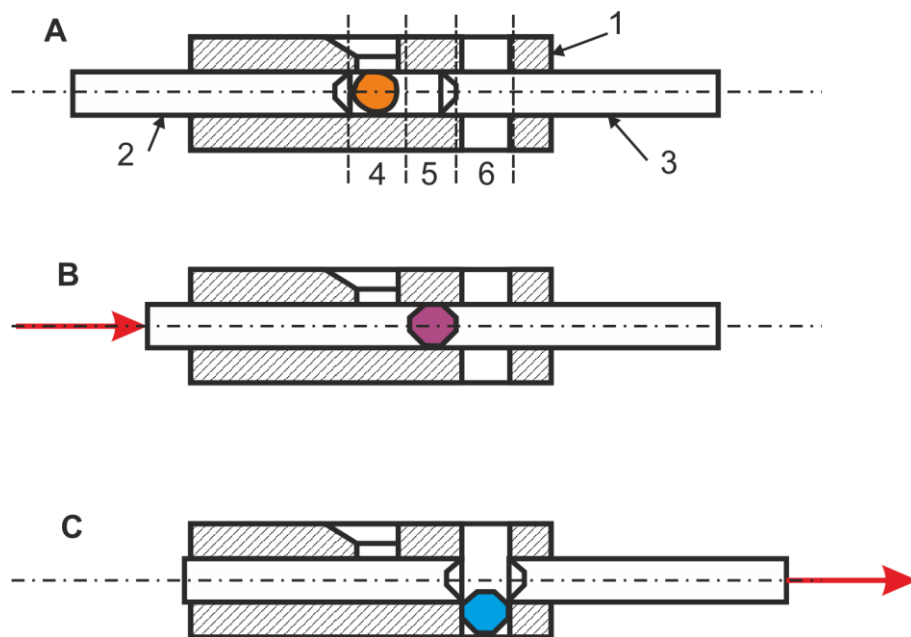


Obr. 9.13 Schéma Maturova mačkadla: A – mačkáací mechanismus, B – schéma stroje, 1 – zdroj skloviny, 2 – proužek žhavé skloviny, 3 – lisovací kaplík pohyblivý, 4 – lisovací kaplík pevný (vrchní), 5 – vačka, 6 – píchnací mechanismus, 7 – naznačený pohyb celého mechanismu pomocí další (nezobrazené) vačky, 8 – jehly, 9 – čelisti držáků, 10 – proužek výlisků s brokem, 11 – skříň s pohonem mechanismu a ovládáním, 12 – termobedna

Výše uvedená mačkadla tvarují drobné výlisky z proužku roztavené skloviny, při čemž výlisky zůstávají spojeny brokem. Technologicky nejmladšími jsou mačkadla bezbroková, která tvarují výlisek bez přelisku. Tento způsob mačkání předpokládá přesnou dávku skloviny odpovídající svým objemem objemu budoucího výlisku a speciálně upravenou formu, která při mačkání nedovoluje odtékání skloviny mimo formu a současně umožňuje kompenzovat malé difference v objemu dávky a výlisku. Typickým představitelem těchto zařízení je mačkadlo DS pracující ve dvoustupňovém režimu, přičemž prvním stupněm je tvarování dávky (kuličky) na rotačním mačkadle. Přesného objemu kuliček se docílí jejich omíláním a síťováním po předchozím měření objemu. Schéma DS mačkadla je uvedeno na Obr. 9.14 a je z něho patrná technologie, kterou mačkadlo pracuje. Vibrační podavač dávkuje kuličky na nahřívací dráhu tvořenou válcem hladkým a válcem opatřeným šroubovicí (šnekem). Otáčením válců se kuličky odvalují a současně postupují k tvarovací jednotce. Při tom jsou zahřívány plynovými hořáky. Předehřáté pak padají do tvarovací jednotky, kde dochází k lisování mezi dvěma kaplíky a po vylisování hotový výlisek padá do temperovacího zásobníku (Obr. 9.15). Pohyb kaplíků řídí vačkové mechanismy, celý stroj je poháněn elektromotorem s variátorem regulujícím otáčky. Mačkadlo lze opatřit pneumatickým píchnacím mechanismem, který vytváří otvory ve směru osy kaplíků. Na popsaném typu mačkadla se vyrábí nejčastěji šatonová surovina a jeho hlavní výhodou je vysoká rozměrová přesnost výlisků. Naopak nevýhodou je omezený sortiment a náročná příprava suroviny.



Obr. 9.14 Schéma DS mačkadla: A – schéma mačkadla, B – nahřívací dráha, 1 – vibrační podavač kuliček, 2 – hořáky, 3 – lisovací mechanismus, 4 – zásobník hotových výrobků, 5 – válec, 6 – šnek, 7 – nahřívaná skleněná kulička



Obr. 9.15 Princip mačkání na DS mačkadle, A – dávkování, B – mačkání, C – vyjímání vylisku z formy, 1 – těleso formy, 2 – levý kaplík, 3 – pravý kaplík, 4 – dávkovací část, 5 – mačkáč část, 6 – vyjímání polotovaru

Kromě DS mačkadel existují i mačkadla na bezbrokové tvarování lustrových hlaviček a lustrových ověsů. Jedním z nich je i BTH mačkadlo, do něhož je sklovina dávkována přímo z nátoky a jedná se tedy o jednostupňovou výrobu.

9.4 Tvarování obalového skla

Produkce obalů zahrnuje nápojové láhve a konzervové sklo vyráběné pro potravinářský průmysl (pivo, víno, likéry, nealkoholické nápoje, minerální vody, ovoce atd.) a dále pak skleněné obaly pro výrobky chemického, farmaceutického a kosmetického průmyslu.

Až na výjimky je tvarovací cyklus technologie výroby obalů dvoustupňový, tzn. vytvoření základního tvaru (baňky) v první fázi a jeho dotvarování v konečné formě. Pro celkový přehled zde budou stručně uvedeny rovněž i technologie již zastaralé. V současné době se obalové sklo vyrábí na výkonných automatických strojích řadových nebo karuselových. Stroje řadové jsou sestaveny z jednotlivých sekcí, z nichž v každé probíhá celý tvarovací cyklus samostatně s určitým časovým posunutím. Stroje karuselové mají formy umístěny na jednom nebo dvou otočných stolech. Při tvarování jsou používány tyto formy:

- ústní (ÚF), tvarující ústí obalu,
- přední (PF), kde se vytváří baňka,
- konečná (KF), kde dochází k dotvarování výrobku,
- meziforma (MF), používaná výjimečně.

Jako materiál je na výrobu forem používána litina nebo ocel (kap.9.11). Podle způsobu umístění dávky skloviny do přední formy se rozlišují stroje dávkovací a stroje sací. Tvarování obalu, jak již bylo řečeno, probíhá ve dvou fázích a podle nich rozeznáváme čtyři základní technologie:

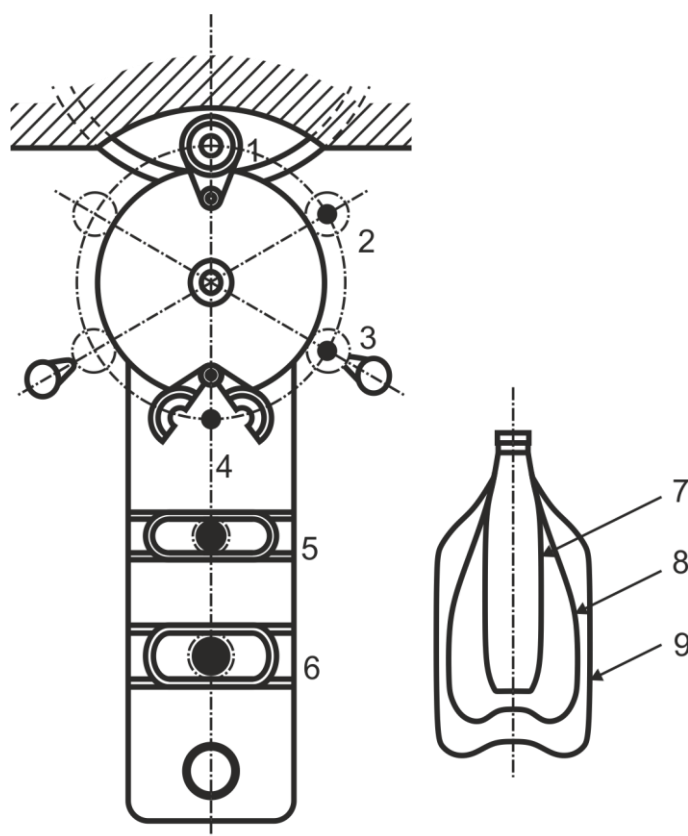
- způsob sací (SF),
- způsob dvakrát sací (SS),
- způsob dvakrát foukací (FF),
- způsob lisofoukací (LF) a od něj odvozený novější úzkohrdlý lisofoukací způsob (ÚHLF).

9.4.1 Sací technologie

Při tomto způsobu tvarování byla sklovina do dutiny přední formy nasáta vytvořením podtlaku. Následovaly dva impulzy tlakového vzduchu (předfuky), poté se kolem baňky uzavřela konečná forma a působením tlakového vzduchu se vytvoří definitivní tvar obalu. Toto zařízení bylo prvním automatem používaným při výrobě obalového skla a to již od roku 1905. Tento způsob tvarování patří do historie, poslední karuselové stroje typu Owens byly u nás vyřazeny z provozu v roce 1982 (závod Lesní Brána). Hlavními nevýhodami tohoto způsobu bylo silné ochlazování skloviny v místě nasátí dávky, nerovnoměrná tloušťka stěny obalu a stopa po odstřihu skloviny po nasátí do přední formy.

9.4.2 Dvakrát sací technologie

Typickým představitelem je stroj Roirant BB, na němž se vyrábějí velkoobsahové skleněné obaly (až do 60 litrů objemu). Stroj má dvě přední formy zavěšené na nosném ramenu, které se přerušovaně otáčí vždy o 60 stupňů, jednu meziformu a jednu konečnou formu. Celý výrobní postup je znázorněn na Obr. 9.16. Při tvarování je sklovina působením podtlaku nasáta do přední formy (poloha 1). Následují dva předfuky v polohách 2 a 3, v poloze 4 je baňka přemístěna do meziformy (pozice 5), kde se vytváří mezitvar odsáváním vzduchu z prostoru mezi baňkou a vnitřní stěnou meziformy. Poté je baňka přemístěna do konečné formy, pozice 6, kde dojde k vytvoření definitivního tvaru výrobku opět odsátím vzduchu z prostoru mezi baňkou a vnitřní stěnou formy. Z konečné formy je hotový obal přenesen na odstávku, kde se dotvaruje a zatuhne dno.



Obr. 9.16 Technologické schéma výrobního postupu na stroji Roirant BB: 1 – nasátí skloviny do přední formy, 2 a 3 – předfuk, 4 – přemístění do meziformy, 5 – meziforma, 6 – konečná forma, 7 – baňka, 8 – mezitvar, 9 – konečný tvar

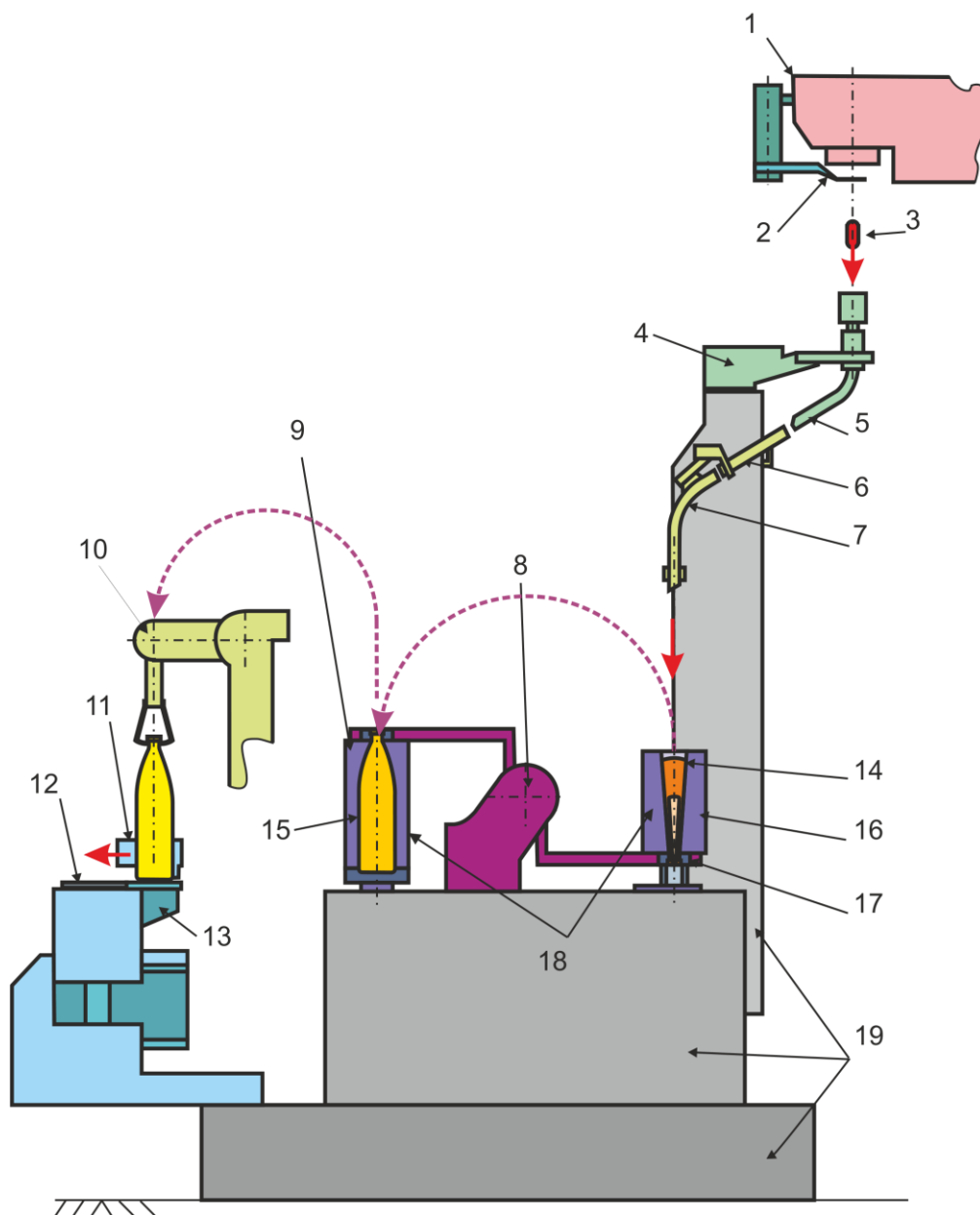
9.4.3 Technologie pracující s dávkou

Moderní sklářské technologie jsou založeny na dávkovacím režimu FF, LF a ÚHLF, vyráběny jsou jako stroje řadové. Řadový stroj je tvořen jednotlivými sekcemi, stroje často nesou označení IS (z angličtiny Individual Section). Sekce jsou řazeny vedle sebe a každá představuje strojně technologickou jednotku, která může samostatně vykonávat celý tvarovací cyklus, přičemž pracuje s jedno-, dvou-, tří- až čtyřkapkou. Na řadových strojích se vyrábějí obaly úzkohrdlé způsobem FF nebo ÚHLF, případně širokohrdlé způsobem LF.

Stroje pracující dvakrát foukacím způsobem jsou konstruovány tak, že umožňují poměrně snadnou přestavbu na způsob lisofoukací.

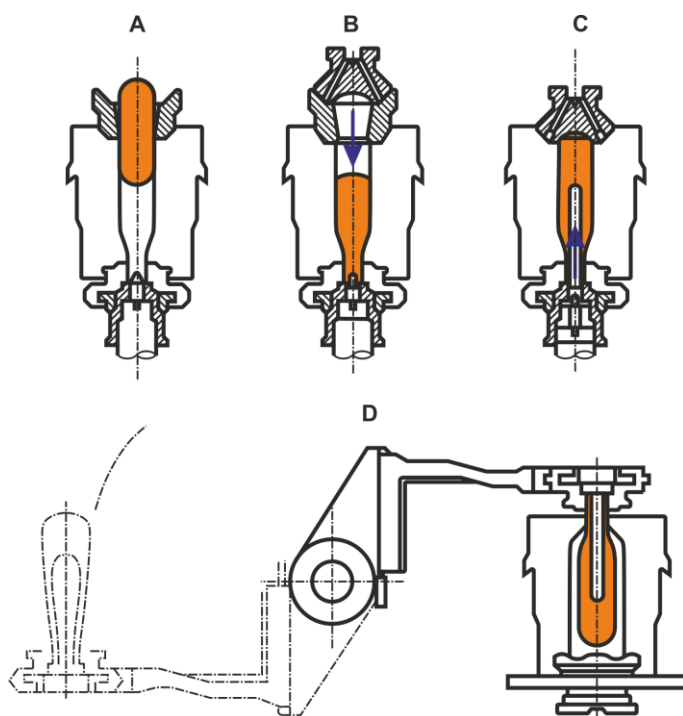
9.4.3.1 Tvarování způsobem dvakrát foukacím

Princip tvarování dvakrát foukacím způsobem je znázorněn na bočním schematickém pohledu na jednu sekci (Obr. 9.17).

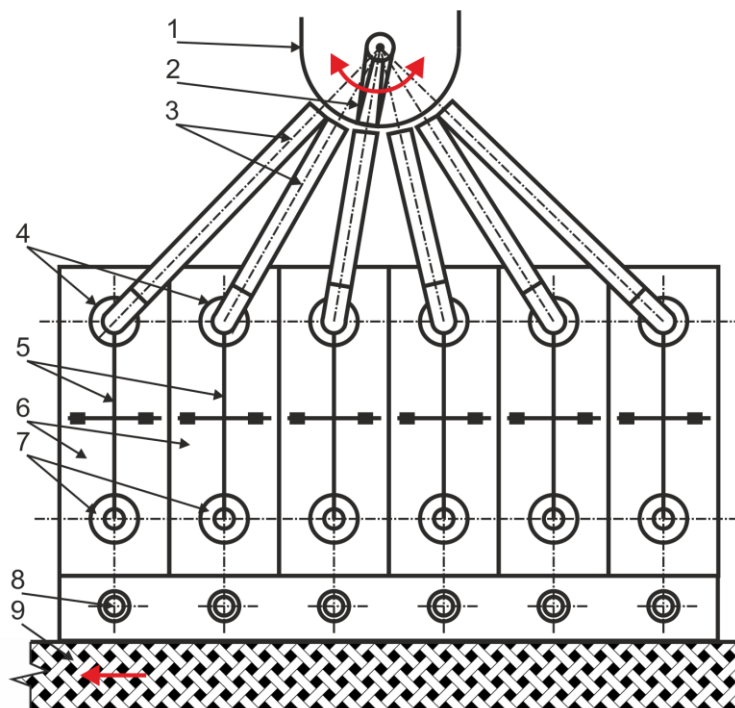


Obr. 9.17 Boční schematický pohled na jednu sekci řadového stroje: 1 – dávkovač, 2 – mechanismus strojních nůžek, 3 – kapka skloviny, 4 – rozdělovač kapek, 5 – žlábek, 6 – skluz, 7 – odchylovač kapek, 8 – obraceč (invert), 9 – konečná forma, 10 – odnímač lahví, 11 – přesouvač, 12 – dopravní pás, 13 – odstávka, 14 – baňka, 15 – láhev, 16 – přední forma, 17 – ústní forma, 18 – systém chlazení forem, 19 – rám řadového stroje

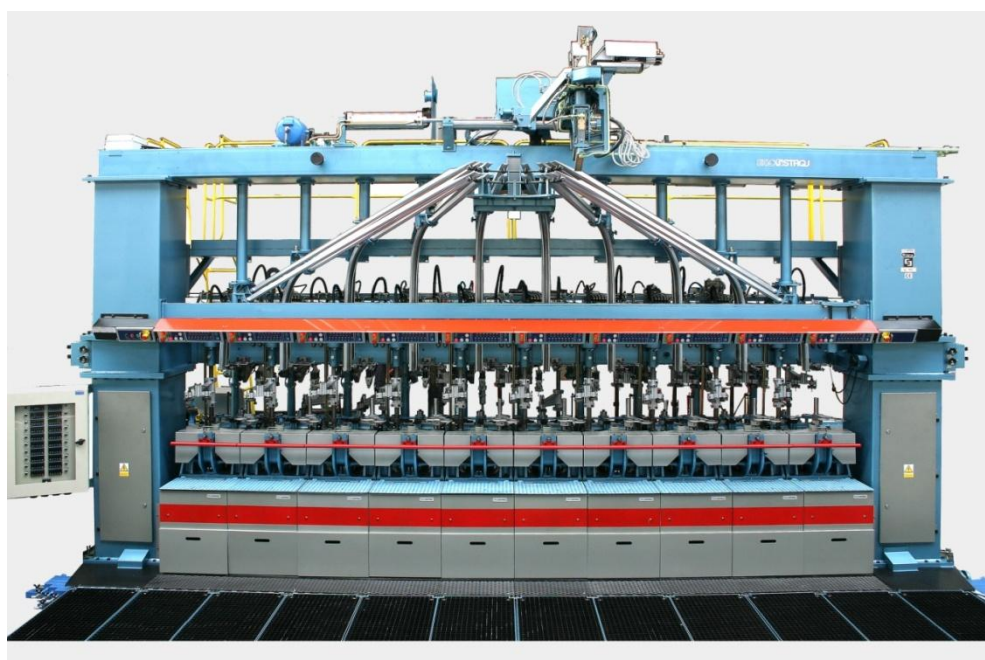
Dávka skloviny je přivedena přes rozdělovač kapek skluzem do přední formy a pomocí zafukovací hlavy je tlakovým vzduchem vtlačena do dutiny ústní formy, v níž je vytvarováno ústí obalu. Po vysunutí ústníku se předtvar vytváří foukáním tlakovým vzduchem (baňka je stále v poloze ústím dolů). Poté se baňka držaná v ústní formě přenesse (překlopí) pomocí obraceče (invertu) půlkruhovým pohybem do konečné formy, kde zůstane určitou dobu zavěšena. Dochází k prohřátí povrchových vrstev, které byly ochlazeny kontaktem s přední formou, od skloviny uvnitř stěn baňky. Baňka se přitom vlastní tíhou protahuje a v okamžiku doteku dna konečné formy je zaveden do dutiny baňky tlakový vzduch, který vytvaruje konečný tvar výrobku. Odnímač přenesse výrobek na odstávku, kde se dochlazuje dno a přesouvačem je láhev přemístěna na pásový dopravník, který ji přemístí před chladicí pec. Schéma tvarování FF způsobem je uvedeno na Obr. 9.18, uspořádání sekcí u šestisekčního stroje je na Obr. 9.19. Moderní stroje typu AL vyrábí Sklostroj Turnov v 4, 6, 8, 10 a 12 sekčním provedení, jsou vybaveny servo či hydraulickým řízením a umožňují výrobu FF, LF, ÚHLF nebo LPBB (odlehčená dvakrát foukací technologie - light production blow&blow) způsobem. Pohled na desetisekční stroj AL je na Obr. 9.20.



Obr. 9.18 Postup tvarování FF způsobem: A – dávkování skloviny do přední formy, B – „zafouknutí“ dávky a vytvoření ústí láhve, C – vytvoření baňky v přední formě tlakovým vzduchem (láhev se tvaruje dnem nahoru), D - přenesení baňky do konečné formy otočením o 180° pomocí obraceče (invertu) a vyfouknutí konečného tvaru.



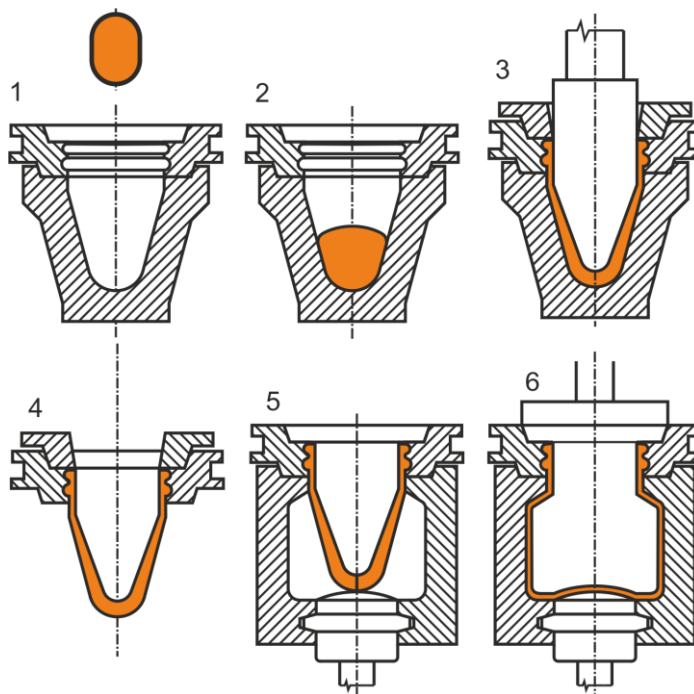
Obr. 9.19 Půdorys uspořádání šestisekčního stroje: 1 – dávkovač, 2 – rozvaděč kapek, 3 – skluzu, 4 – přední forma, 5 – obraceč, 6 – jednotlivé sekce, 7 – konečná forma, 8 – odstávka, 9 – dopravník,



Obr. 9.20 Pohled na desetisekční stroj AL (zdroj: Sklostroj Turnov CZ, s.r.o.)

9.4.3.2 Tvarování způsobem lisofoukacím

Princip tvarování lisofoukacím způsobem je charakterizován dvěma za sebou následujícími operacemi, a to lisováním do přední formy a foukáním do konečné formy. Schéma výroby širokohrdlého obalu s popisem výrobního cyklu jsou uvedeny na Obr. 9.21.



Obr. 9.21 Schéma tvarování lisofoukacím způsobem: 1,2 – dávkování kapky do přední formy, 3 – lisování (vytváření baňky a horního okraje obalu), 4 – přenesení baňky do konečné formy, 5 – prohřívání baňky, 6 – vyfukování konečného tvaru.

9.4.3.3 Stroje na tvarování způsobem ÚHLF

Úzkohrdlý lisofoukací způsob (ÚHLF) vyvinutý německou firmou Heye umožňuje tvarovat i úzkohrdlé obaly lisofoukacím způsobem. Hlavní charakteristiky této technologie jsou:

- přesné rozdělení skloviny umožňující výrobu tenkostěnných úzkohrdlých obalů o hmotnosti asi o 30 procent nižší,
- produktivnější výroba (přední formě jsou přiřazeny dvě konečné formy umístěné někdy na samostatných karuselech, takže odpadá prodleva v konečné formě nutná na zpětné prohřátí baňky),
- kapka je dávkována do přední formy v klidové poloze bez nutnosti transportu skluzem, což přináší zlepšení tepelné homogenity,
- poloha baňky v přední a konečné formě je souhlasná ústím nahoru (odpadá invert).

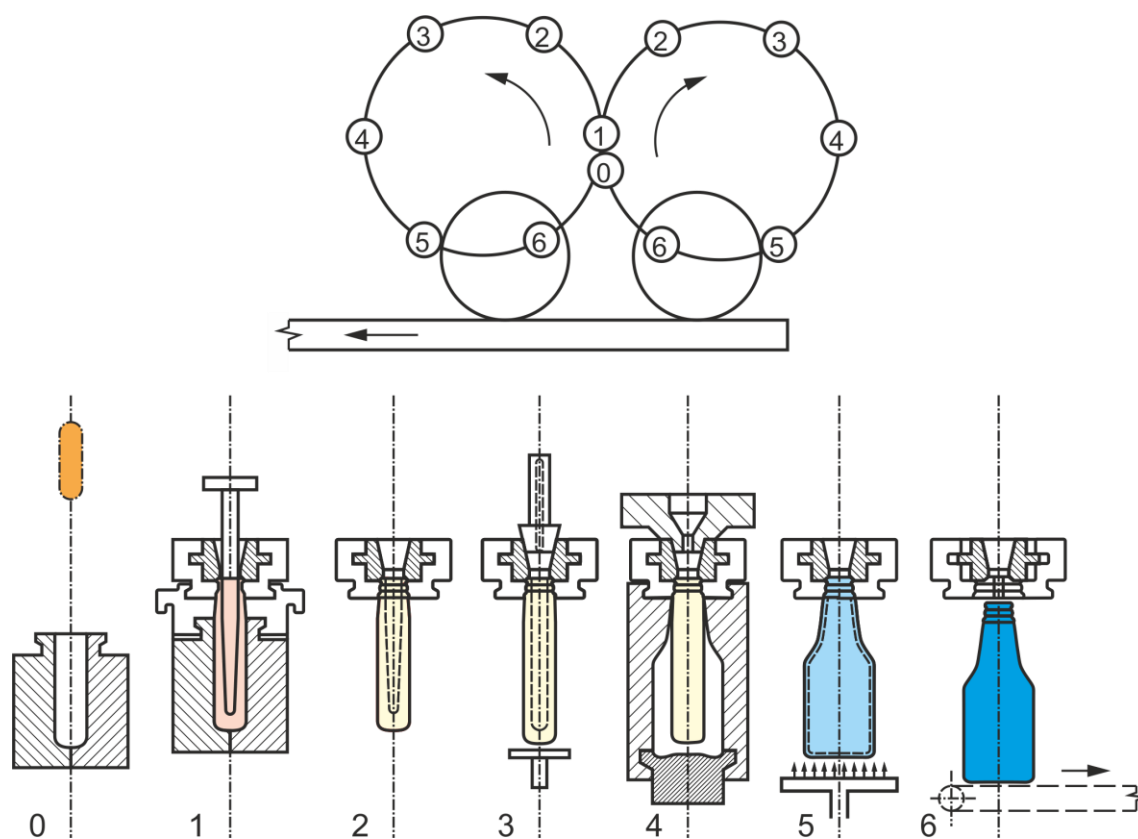
Schematicky je postup tvarování na stroji Heye 1-2 znázorněn na Obr. 9.22. Technologie ÚHLF byla následně přenesena i na řadové stroje, což umožňuje výrobu lahví s rovnoměrnější a tenčí tloušťkou stěny a tím i lehčí. Tyto odlehčené lahve vyrobené ÚHLF

mohou mít i o 50 % nižší hmotnost oproti FF. Odlehčením obalů lze dosáhnout hned několika cílů, a to především:

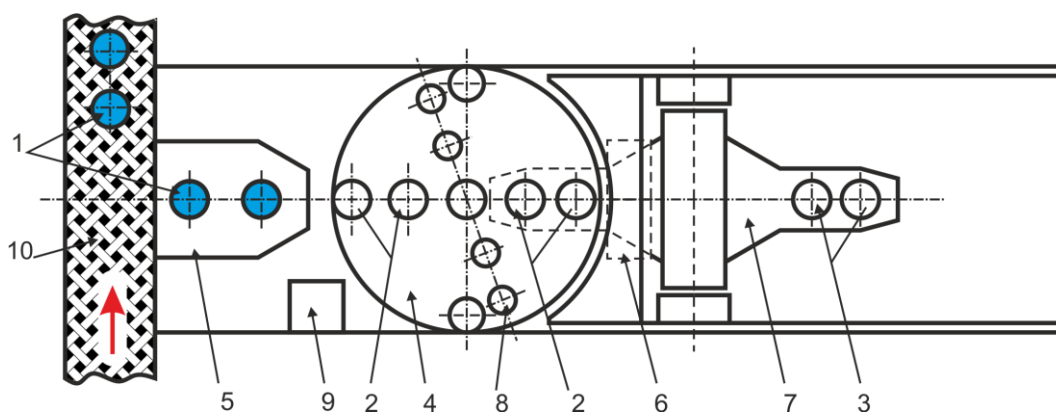
- snížení energetické a surovinové náročnosti na výrobu jedné láhve,
- snížení fixních nákladů na jednu láhev,
- snížení nákladů na dopravu surovin, naplněných obalů a střepů k recyklaci (hmotnost ovlivňuje 50 až 60 % výrobních nákladů).

9.4.3.4 Tvarovací stroj RIS

Jiný způsob moderního řešení přinesla firma Emhart. Jedná se o řadový stroj, u něhož v každé sekci připadají na jednu přední formu dvě konečné formy a dvě foukací hlavy umístěné na otočném stole. Systém se označuje jako RIS (rotační IS) a jeho přínos je v tom, že teoreticky umožňuje zdvojnásobit tvarovací rychlost, protože odpadá nutná časová prodleva v konečné formě. Schéma jedné sekce pro dvojkapku znázorňuje Obr. 9.23. Určitým omezením velikosti je nutnost umístění otočného stolu.



Obr. 9.22 Postup tvarování na stroji Heye 1-2 pro úzkohrdlé láhve: 0 – dávkování kapky do přední formy, 1 – lisování baňky, 2 – prohřívání baňky, 3 – prohřívání a vyfukování baňky, 4 – vyfukování výrobku v konečné formě, 5 – chlazení hotového výrobku, 6 – odebrání a transport do chladicí pece



Obr. 9.23 Schéma sekce stroje RIS: 1 – hotové lahve, 2 – konečné formy, 3 – přední formy, 4 – otočný stůl, 5 – odstávka, 6 – vložka, 7 – obraceč, 8 – foukací hlavy, 9 – odnímač, 10 – pásový dopravník

9.4.3.5 Tvarovací stroje ISS

Nejmodernější stroj na výrobu obalového skla ISS byl vyvinut firmou Sklostroj Turnov (Obr. 9.24). Je charakterizován jako univerzální, kompaktní a odolný, vybaven je nejmodernější servotechnologií a eliminuje komplikované mechanismy, což činí nový stroj více kompaktním a odolným. Může pracovat od jednoho až po čtyřkapkový způsob, dostupný je v 4, 6, 8, 10 a 12 sekčním provedení i v tandemovém uspořádání. Umožňuje tvarování FF, LF a ÚHLF způsobem, na stroji mohou být použity stávající formy. Konstrukce nového stroje splňuje jak ergonomické a bezpečnostní aspekty, tak i požadavky na rychlou výměnu příslušenství a pohonů. Nový stroj je navržen pro vysoké rychlosti, čehož je dosaženo především použitím servopohonů a efektivního chlazení. U tohoto stroje je uváděna úspora energie až 40 %.



Obr. 9.24 Stroj na tvarování obalového skla typ ISS (zdroj: Sklostroj Turnov CZ, s.r.o.)

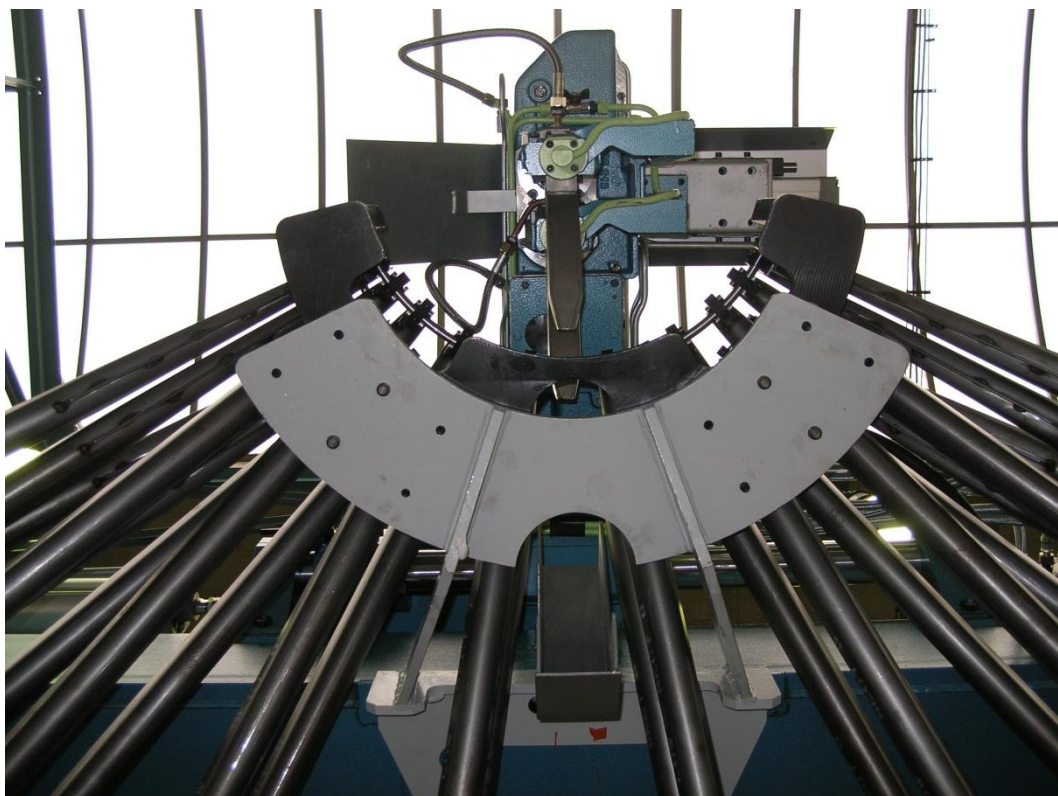
9.4.3.6 Příklad linky na výrobu obalového skla

Uvedený příklad linky na výrobu obalového skla je zpracován pro dávkovací stroje na výrobu obalového skla způsobem dvakrát foukacím při využití dvojkapky. Kromě principů popsaných v předchozích odstavcích je popis linky doplněn o charakteristiky přídatných systémů, bez nichž by provoz linky byl vyloučen (nůžky, rozdělovač, skluzy, odnímače, odstávka, přesouvače a inspekční část). Tato zařízení budou charakterizována jen stručně.

Nůžky – mají funkci oddělovat dávku skloviny z výtoku dávkovače. Jejich konstrukce je zmíněna v kap. 8.2.1. Ochrana břitů je provedena např. emulzí oleje s vodou. Oddělené kapky padají do rozdělovače.

Rozdělovač – dává kapky skloviny do jednotlivých skluzů, které je přivádějí do přední formy tvarovacích strojů.

Skluzy – jsou ocelové žlaby Obr. 9.25, které střídavě, v předem stanoveném pořadí, zásobují přední formy tvarovacích strojů sklovinou. Po dokončení tvarovacího cyklu jsou hotové výrobky přemístěny na odstávku.

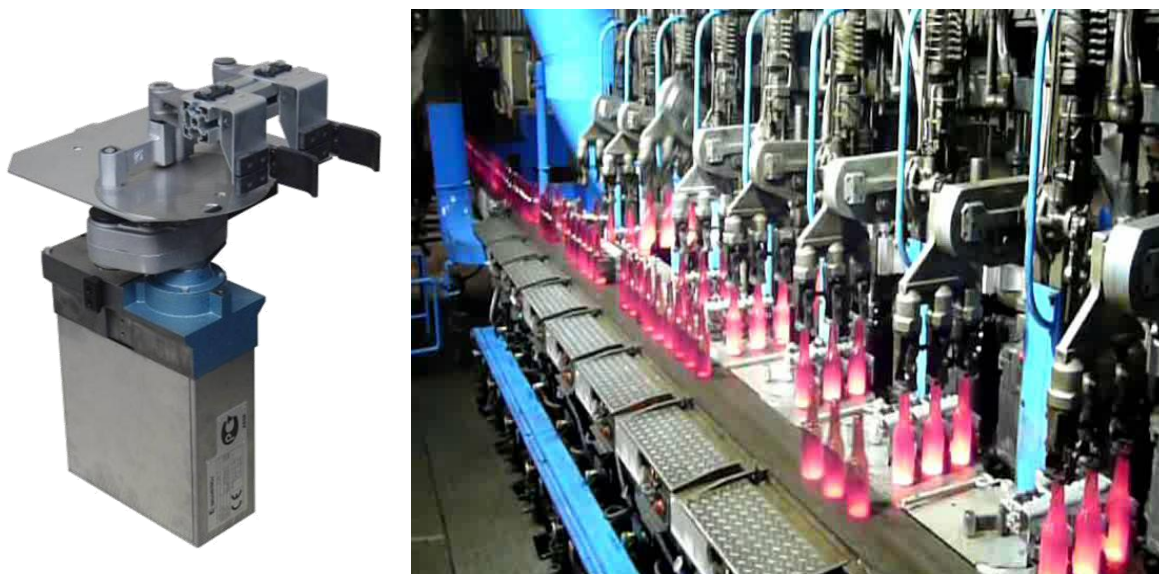


Obr. 9.25 Pohled na soustavu skluzů (zdroj: Sklostroj Turnov CZ, s.r.o.)

Odnímač – je systém pracující zvlášť pro každou sekci řadového stroje a jeho úkolem je odebrat vytvarovaný výrobek a přemístit jej na odstávku.

Odstávka – je samostatná pozice, na níž jsou výrobky dochlazovány před dalším transportem. Dochlazování odfukem vzduchu je směřováno především do oblasti dna obalu,

kde je soustředěno větší množství hmoty skla. Po dochlazení jsou obaly přemístěny přesouvačem na pásový dopravník. Na Obr. 9.26 je uveden pohled na přesouvač.



Obr. 9.26 Pohled na přesouvač a jeho umístění v řadovém stroji (zdroj: Sklostroj Turnov CZ, s.r.o.)

Dále jsou láhve dopravovány ke chladicí peci. Ještě před umístěním do chladicí pece procházejí prostorem, kde jsou krátce v kontaktu s parami chloridu cíničitého a pyrolýzou této sloučeniny se na horkém povrchu skla vytvoří ochranná vrstvička SnO_2 . Je to první fáze chemického zušlechťování povrchu, která probíhá na tzv. „horkém“ konci výrobní linky (podrobněji v kapitole o zušlechťování). Jakmile se řada lahví seřadí před chladicí pec, je automaticky zasunuta do prostoru chladicí pece pomocí mechanického hrabla.

Pásový dopravník přivádí hotové obaly k inspekčnímu zařízení, kde se automaticky, na základě optických nebo mechanických impulzů, provádí konečná kontrola kvality (např. vnější průměr ústí, vnitřní průměr ústí, výška, přítomnost nehomogenit apod.). Nevyhovující výrobky jsou mechanickým impulzem shazovány na sběrný dopravník, který je dopravuje do kmenárny jako druhotnou surovinu.

9.5 Tvarování tenkostěnného skla

Do skupiny tenkostěnných skleněných výrobků je možné zařadit odlivky, poháry, kádinky, žárovkové baňky aj. Společnou charakteristikou je, že tenkostěnné výrobky jsou bezešvé a vykazují velmi kvalitní povrch. Toho se docílí tak, že předlisovaný polotovár se vyfukuje ve formě za mírného otáčení (buď rotuje tvarovaná baňka nebo forma) a stěna formy je pokryta porézní vrstvou na bázi korku nebo grafitu pracující za mokra. Stykem žhavé skloviny s touto mokrou porézní vrstvou dochází k intenzivnímu vývoji páry a vzniklý parní polštář snižuje tření, tím umožňuje snadnější rotaci tvarované baňky v uzavřené formě a zároveň se uplatňuje povrchové napětí, které zajistí hladký povrch. Současně se nevytváří stopa po místě styku obou částí uzavřené formy a tím se tenkostěnné výrobky liší např. od

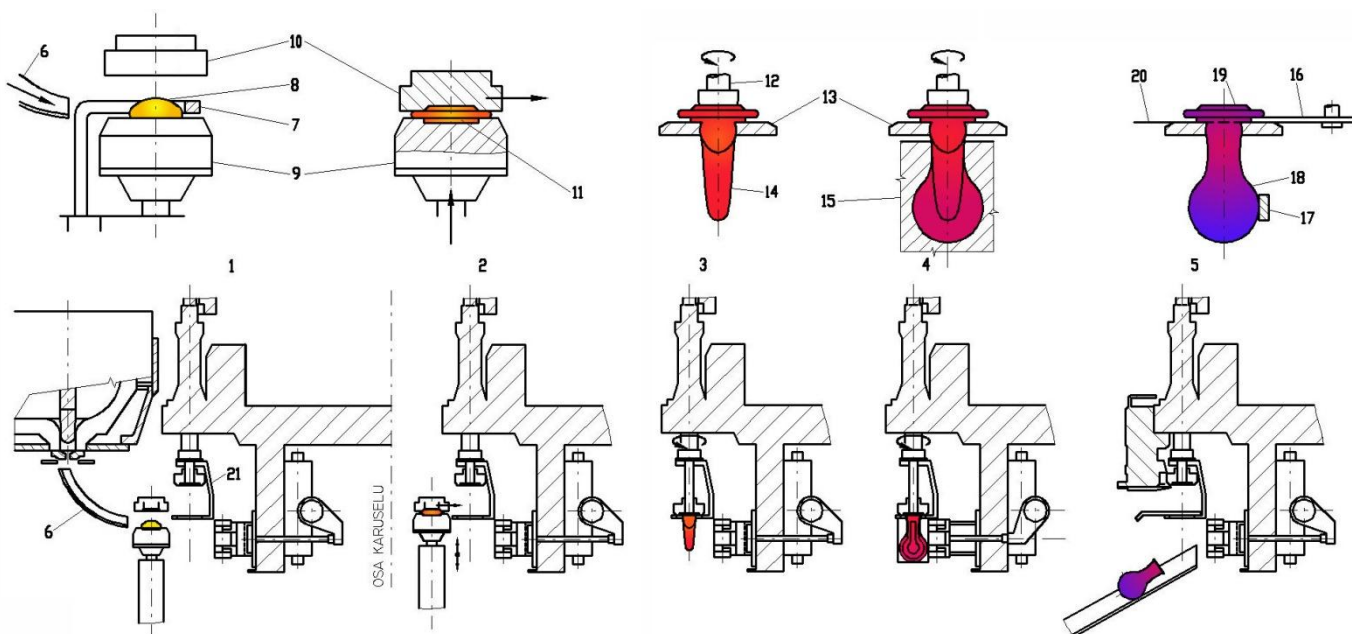
obalového skla, na jehož stěně zůstávají stopy po dotyku obou částí uzavřené konečné formy.

Při výrobě tenkostěnných výrobků vzniká většinou technologický odpad tzv. kopna, která je důsledkem použité technologie, a to jak při ruční, tak automatické výrobě. Kopna se v další fázi odstraňuje např. odtavováním, kap. 11.2.3.

Stroje na výrobu tenkostěnného skla rozdělujeme podle technologie výroby na stroje sacofoukací a lisofoukací, podle konstrukčního uspořádání na stroje karuselové a konvejerové. Dále budou některé typy charakterizovány.

9.5.1 Technologie výroby na strojích typu M

Technologie je v současné době vcelku rozšířená. Jedná se o technologii lisofoukací, tedy podobně jako u obalového skla se nejprve vytvoří předlisek lisováním, který ovšem nemá tvar baňky, ale placky. Následně je při rotaci (formy nebo výrobku) foukáním vytvořen konečný tvar baňky. Stroje typu M jsou konstruovány podle potřeby s 12, 16, 18, 20, 24 až 28 tvarovacími stanicemi. Jedná se o karuselové stroje s kontinuálním otáčením karuselu. Na Obr. 9.27 je zobrazeno principiální schéma tvarovacího cyklu stroje typu M na horních pěti obrázcích, na spodních pak jejich konstrukční provedení.

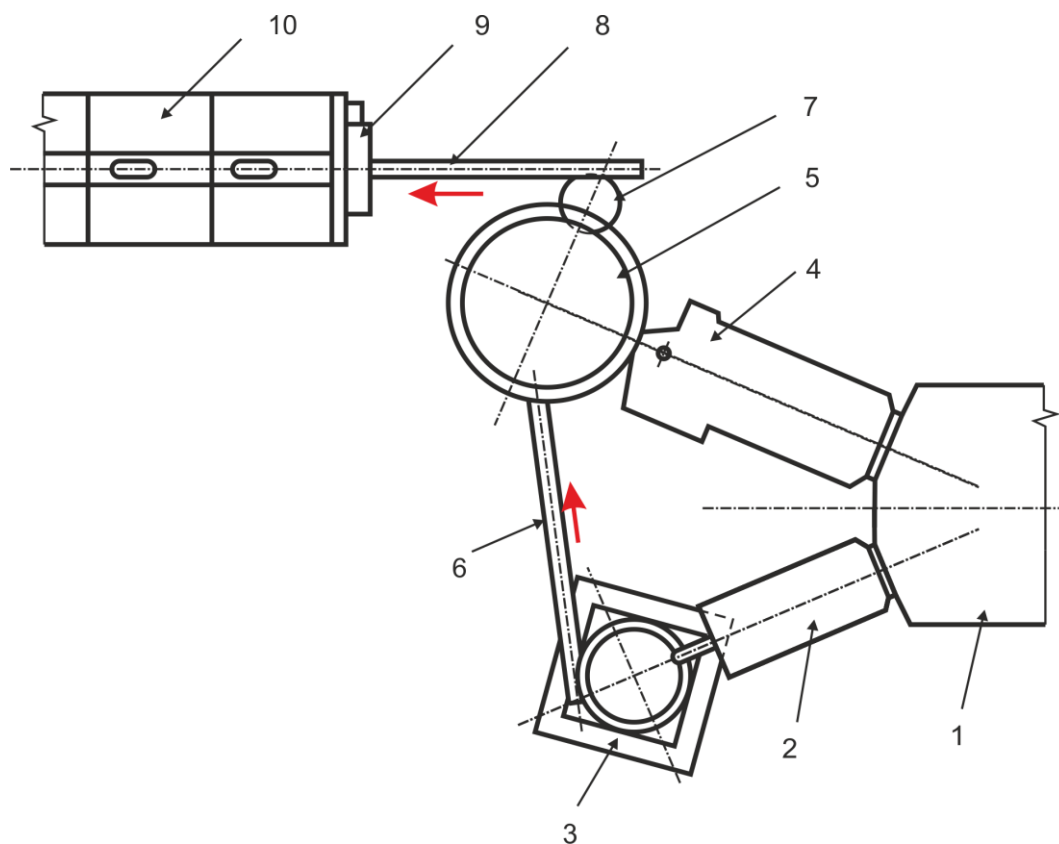


Obr. 9.27 Schéma tvarovacího cyklu stroje M: 1 – dávkování kapky na lisovací hlavu, 2 – vylisování předlisku (placky) a jeho přenesení sací a přenášečí hlavou do foukací stanice, která se při předávání neotáčí, 3 – pozvolné vyfukování baňky za jejího otáčení, 4 – vytvarování baňky v konečné formě za rotace, 5 – oddělení hotové baňky kruhovým nožem, 6 – vodící žlábk kapky, 7 – přidržovač kapky, 8 – kapka skloviny, 9 – lisovací hlava, 10 – vakuová přenášečí hlava, 11 – předlisek, 12 – píšťala, 13 – ústní forma, 14 – postupné tvary baňky, 15 – konečná forma, 16 – kruhový nůž, 17 – narážka vyhazovače, 18 – hotová žárovková baňka, 19 – kopna, 20 – dělicí rovina

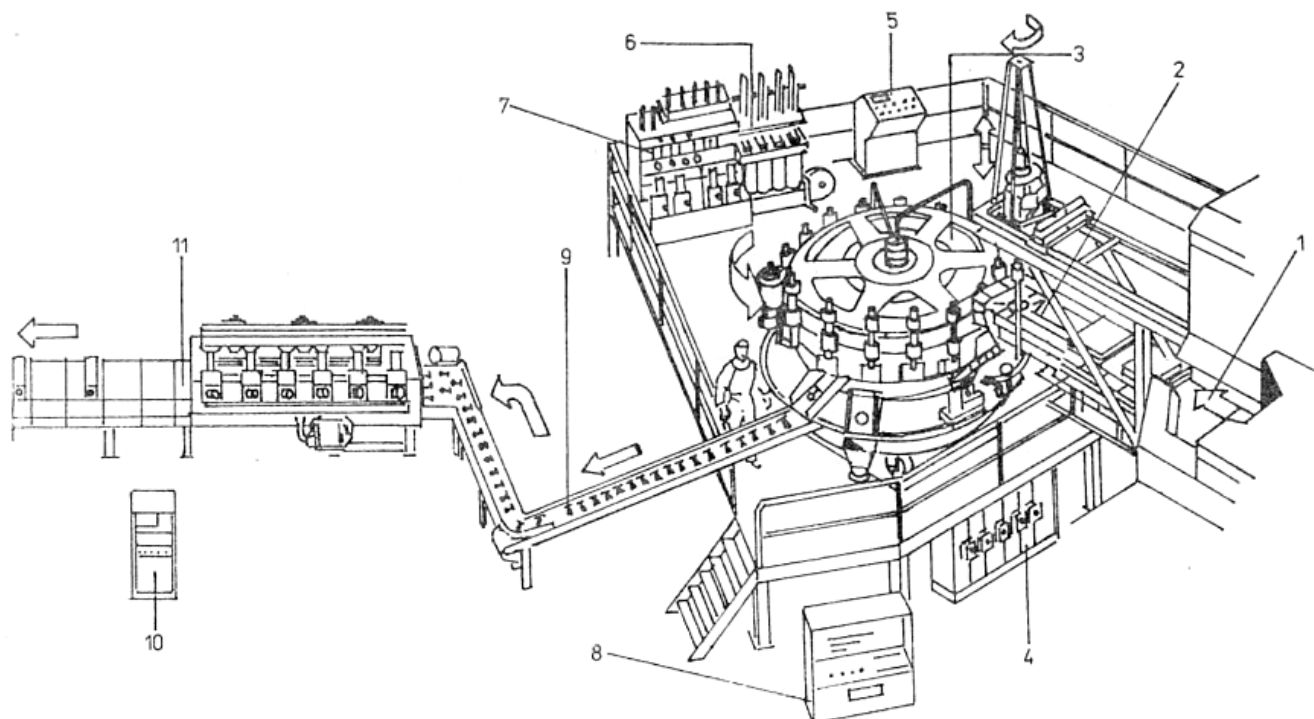
Kapka skloviny sklouzne do lisovací stanice, kde dojde k vylisování na plochou placku. Výlisek je předán na otočný stolek tvarovací stanice, přitlačením píšťaly se poněkud

prohloubí a současně je sklovina zalisována do ústní formy. Nyní na výlisek začíná působit tlak vzduchu z foukací píšťaly, která současně rotuje. Po volném tvarování foukáním za rotace se provede dotvarování foukáním za rotace v uzavřené formě. Poté je baňka odlomena kruhovým nožem a dopravena k dalšímu zpracování.

Uvedené stroje jsou součástí technologických celků. Příkladem zařazení stroje do technologického celku může být automatická linka na výrobu kalíšků (LINKUŽ – **linka užitkového skla**). Linku tvoří automat na lisování stonků a karuselový lisofoukací stroj, který zajišťuje i spojování baňky s předem vylisovaným stonkem. Na Obr. 9.28 je ukázána varianta uspořádání jednotlivých strojů, na které dále navazuje chladicí pec, zařízení na dělení kopen, opracování hran po oddělení kopny, výstupní kontrola a balení. Výrobky mohou být dále zušlechťeny. Na Obr. 9.29 je pohled na výrobní linku firmy Olivotto, ukazující schematicky výrobu tenkostěnného užitkového skla se strojem M 16.



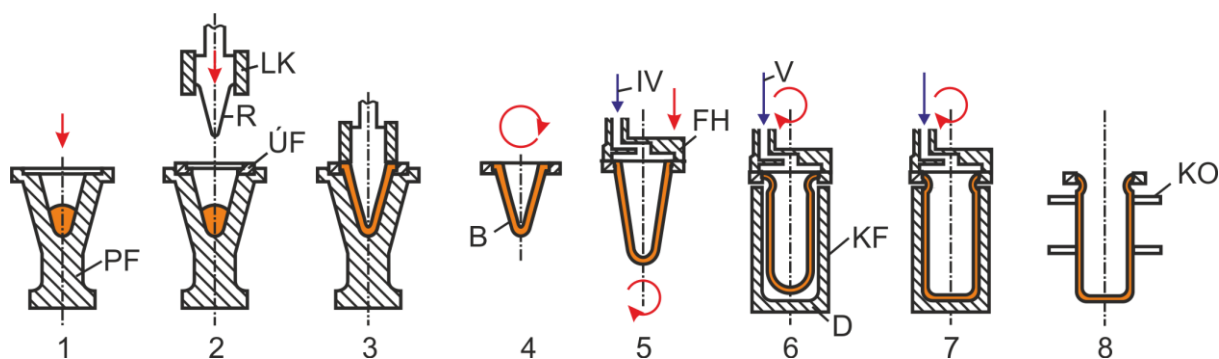
Obr. 9.28 Schéma linky na výrobu kalíšků: 1 – tavicí agregát, 2 – dávkovač automatického lisu, 3 – lis, 4 – dávkovač foukacího stroje, 5 – foukací automat, 6 – dopravník vylisovaných stonků, 7 – odnímač kalíšků se stonky, 8 – dopravník výrobků k chladicí peci, 9 – zakladač výrobků do chladicí pece, 10 – chladicí pec



Obr. 9.29 Výrobní linka fy Olivotto: 1 – tavicí agregát, 2 – žlab s kapkovým dávkovačem, 3 – stroj M 16, 4 – směšovací stanice plynu se vzduchem, 5 – regulace rozvodu chladicího vzduchu, 6 – regulace a rozvod foukacího vzduchu, 7 – stanice stlačeného vzduchu, 8 – kontrolní panel, 9 – pásový dopravník, 10 – kontrolní panel, 11 – chladicí pec

9.5.2 Technologie strojů typu H-28

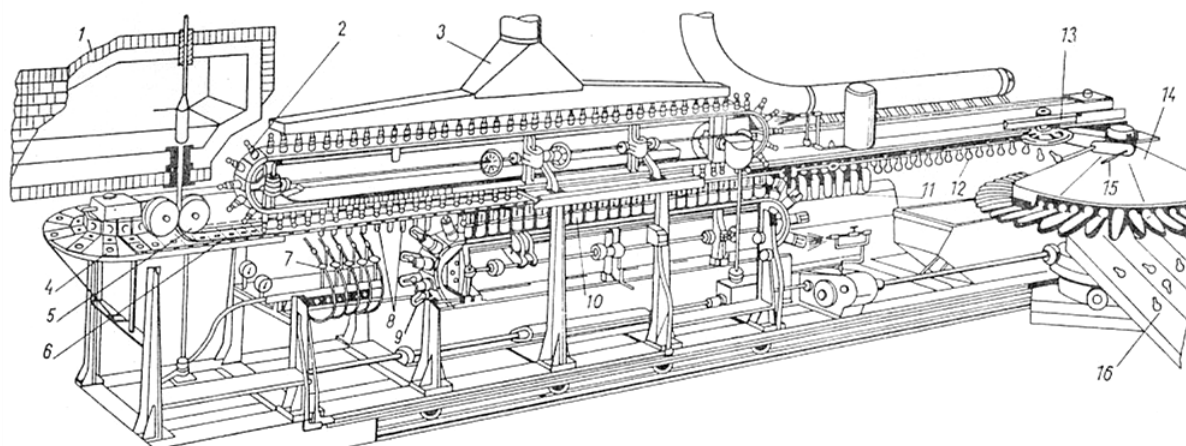
Jedná se opět o technologii lisofoukací, kdy je často předlisek tvarován do tvaru baňky. Stroje typu H-28 jsou stroje karuselové s kontinuálním otáčením karuselu. Kapka skloviny se dávkuje do přední formy. Ta se zdvihne k ústní formě, na kterou se usadí lisovací kroužek a do přední formy se zasune razník, který vylisuje baňku. Razník s lisovacím kroužkem se po lisování zvednou, přední forma poklesne a baňka se s ústní formou začne otáčet, přičemž se prohřívá. Na ústní formu dosedne foukací hlava a baňka je vyfukována nízkým tlakem vzduchu, okolo 2,5 kPa. Následně se přisune dno, dvoudílná konečná forma se uzavře a baňka se dále rozfukuje. Po uzavření tlakového vzduchu se konečná forma otevře, dno se odsune a ústní forma se přestane otáčet. Následně odnímač uchopí výrobek a po otevření ústní formy jej přesune na dopravník, který jej dopraví k odtavovacímu stroji. Tvarovací cyklus stroje je znázorněn na Obr. 9.30.



Obr. 9.30 Tvarovací cyklus stroje H-28: 1 – dávkování skloviny, 2 – příprava lisování, 3 – lisování, 4 – otáčení a prohřívání, 5 – pofukování, 6 – uzavření konečné formy kolem baňky, 7 – foukání konečného tvaru, 8 – vyjmutí hotového výrobku, PF – přední forma, ÚF – ústní forma, R – razník, LK – lisovací kroužek, B – baňka, FH – foukací hlava, IV – impulzy vzduchu o nízkém tlaku, V – vzduch o nízkém tlaku, KF – konečná forma, D – dno konečné formy, KO – kleště odnímače

9.5.3 Technologie konvejerového (stužkového) stroje

Ke strojům na výrobu tenkostěnného skla patří i velkokapacitní automat na výrobu žárovkových baněk, tzv. stužkový stroj (Obr. 9.31).



Obr. 9.31 Automat na výrobu žárovkových baněk: 1 – pracovní část vany, 2 – píšťaly, 3 – chladič, 4 – nosný destičkový pás, 5 – válec, 6 – skleněný pás, 7 – zařízení na ochlazování baněk vodní mlhou, 8 – baňky, 9 a 10 – otevřené a uzavřené dělené konečné formy, 11 – chladicí zóna, 12 – konečné tvary baněk, 13 – oddělovací zařízení, 14 – rotační stůl, 15 – oddělování baněk, 16 – pásový dopravník

Tvarování probíhá tak, že sklovina ve tvaru proužku nepřetržitě natéká mezi válce, které rotací předliskují tlustší čočkovitá místa. Na tato zesílení najíždějí shora píšťaly umístěné na článkovém dopravníku, prolisují a slabě rozfouknou čočkovitá zesílení, která jsou ochlazována vodní mlhou. Poté na ně zdola najíždějí konečné formy rovněž umístěné na pásovém dopravníku, dělené formy se uzavřou a uvedou do rotace, při které se baňka vyfukuje do konečného tvaru. Po dotvarování se formy otevřou, baňky se ochlazují proudem

vzduchu a procházejí oddělovacím zařízením. Výkon tohoto stroje dosahuje až 1 000 000 kusů za 24 hodin.

9.6 Technologie výroby plochého skla

Historicky se ploché sklo vyrábělo ručně, např. ještě ve druhé polovině 20. stol. to byla výroba signálního skla, kdy se tabule získávaly rovnáním vyfouknutých válců. Kvalita ani produktivita ruční výroby neuspokojovaly poptávku, proto byly vyvíjeny technologie strojní výroby. Rozdělit technologie výroby plochého skla je možno na tažení, válcování (lití) a plavení.

9.6.1 Technologie tažení skla

Technologie strojního tažení plochého skla se provádí směrem nahoru (řada způsobů, z nichž některé budou dále popsány) nebo směrem dolů. Tažení směrem nahoru můžeme dále rozlišovat na způsoby používající výtlačnici a způsoby bez výtlačnice.

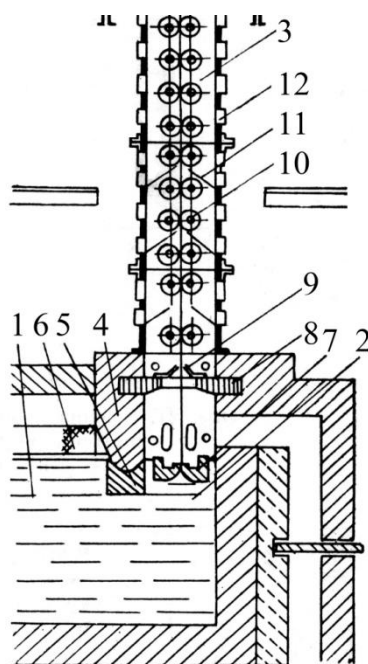
9.6.1.1 Tažení směrem nahoru

Fourcaultův způsob (Obr. 9.32) vertikálního tažení nekonečného skleněného pásu je založen na použití šamotové výtlačnice, která vytváří zárodek tvarované tabule a současně umožňuje udržet zúžení taženého pásu v přijatelných mezích. Mechanismus tohoto účinku spočívá ve skutečnosti, že šamot dobrou smáčivostí svého povrchu sklem zabraňuje okrajům taženého pásu v jejich sbíhání. Sklovina používaná pro tažení Fourcaultovým způsobem je tavena v kontinuálních tavicích agregátech a do podstrojové komory, v níž začíná vlastní tažení, je přiváděna kanály. K tažení dochází pomocí šamotové výtlačnice, držáků okrajů taženého pásu a chladičů. Vytvořený pás skla je nepřetržitě odtahován směrem nahoru tažným strojem svislou šachtou, která má současně funkci chladičské pece. Na horní pracovní plošině probíhá odřezávání a odlamování základních formátů tabule skla. Tento způsob se nejvíce rozšířil v Evropě.

Tato technologie je charakteristická tím, že po určité době dochází ke zhoršování kvality taženého skla, snižuje se teplota spodních vrstev skloviny v podstrojové komoře, takže je nutné přerušit tažení, sklovinu dokonale prohřát a obnovit tažení. Tyto tažné cykly mají rozdílnou dobu trvání, od zhruba 200 provozních hodin se je podařilo prodloužit až téměř na dva měsíce. Obnova tažení probíhá po prohřátí skloviny pomocí nabíracího rámu, který se spustí shora a ponoří do skloviny. Asi po třech minutách dojde k přichycení skloviny k rámu a začíná pomalé tažení za postupného odtlačování přítlačných válců. Po dosažení potřebné rychlosti probíhá tažení nepřetržitě.

Tloušťka skla vyrobeného tažením podle Fourcaultova způsobu se pohybuje mezi 1,2 mm až 9 mm, při čemž horní hranicí je 14 mm, větší tloušťky nelze táhnout, protože třecí síla mezi tabulí a tažnými válci sklo neudrží. Šířka taženého pásu je dána délkou štěrbiny výtlačnice a pohybuje se nejčastěji od 1600 mm do 2500 mm, dosažené maximum bylo přes 3000 mm. Byly ovšem postaveny i stroje na tažení pásu šířky do 1000 mm.

Kvalita povrchu taženého skla je ovlivněna především šamotovou výtlačnicí, která způsobuje vznik jemných proužků. Tato vada se nazývá „optikou“ způsobenou výtlačnicí.



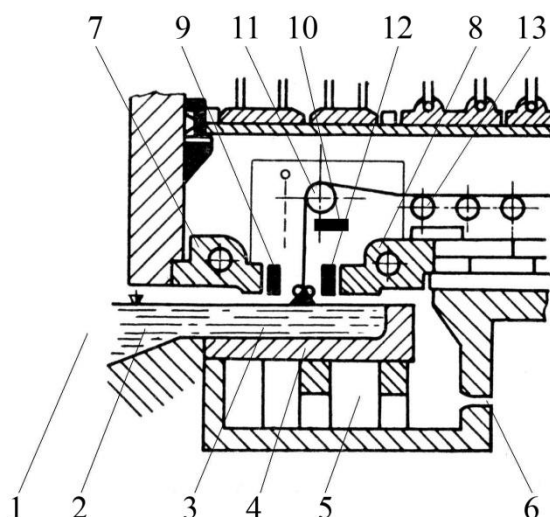
Obr. 9.32 Řez podstrojovou komorou Fourcaultova způsobu tažení: 1 – sklovina před pevným mostem, 2 – sklovina v podstrojové komoře, 3 – tažný stroj, 4 – pevný most, 5 – podmost, 6 – manipulační otvor, 7 – šamotová výtlačnice, 8 – horní uzávěr podstrojové komory, 9 – úhlová železa, 10 – tažné válce, 11 – plechy sloužící k zachycování střepů, 12 – pracovní otvory

Za určitou variantu Fourcaultova způsobu je možné považovat japonský způsob Asahi, kde byla šamotová výtlačnice nahrazena dvěma válcovými bloky ze žárovzdorného materiálu. Válce byly otočné, ale při tažení se nepohybovaly. Pootočit je bylo možné v případě potřeby a tím zlepšit „optiku“.

Americká technologie Libbey-Owens (nazývaná též Colburn, Obr. 9.33) byla vyvinuta o několik let později než technologie Fourcault. Technologie je charakterizována tažením skleněného pásu z volné hladiny skloviny přes celou šířku podstrojové komory (tedy bez použití výtlačnice), přičemž zhruba ve výšce 400 až 600 mm nad hladinou skloviny je tažený pás ohýbán do vodorovného směru přes dutý ocelový válec (dutina slouží k ochlazení proudícím vzduchem). Další tažení probíhá ve vodorovném směru, při kterém pás skla prochází chladicí pecí.

Další technologií tažení bez výtlačnice je způsob Pittsburgh, který je oproti výše uvedeným technologiím mladší a je jejich kombinací. Zachováno bylo především tažení pásu skla z volné hladiny a vertikální tažná šachta mající současně funkci chladicí pece.

V současné době se lze setkat s technologií Fourcault pro výrobu speciálních skel jako jsou svářečská skla (např. Severosklo Kamenický Šenov s.r.o.).

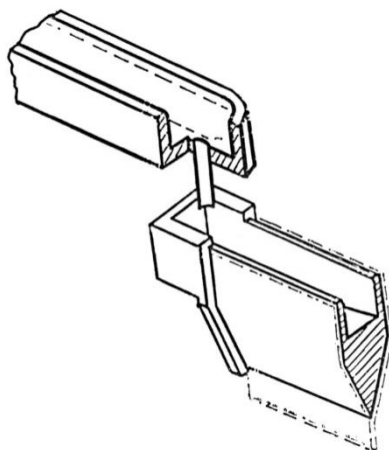


Obr. 9.33 Řez pracovní komorou Libbey-Owensovy pece: 1 – bazén pece, 2 – předkomora, 3 – tažná komora, 4 – dno podstrojové komory, 5 – topná komora, 6 – hořáky, 7 a 8 – speciální uzavírací tvárnice, 9, 10, 12 – vodní chladiče, 11 – ohýbací válec, 13 – transportní válečky

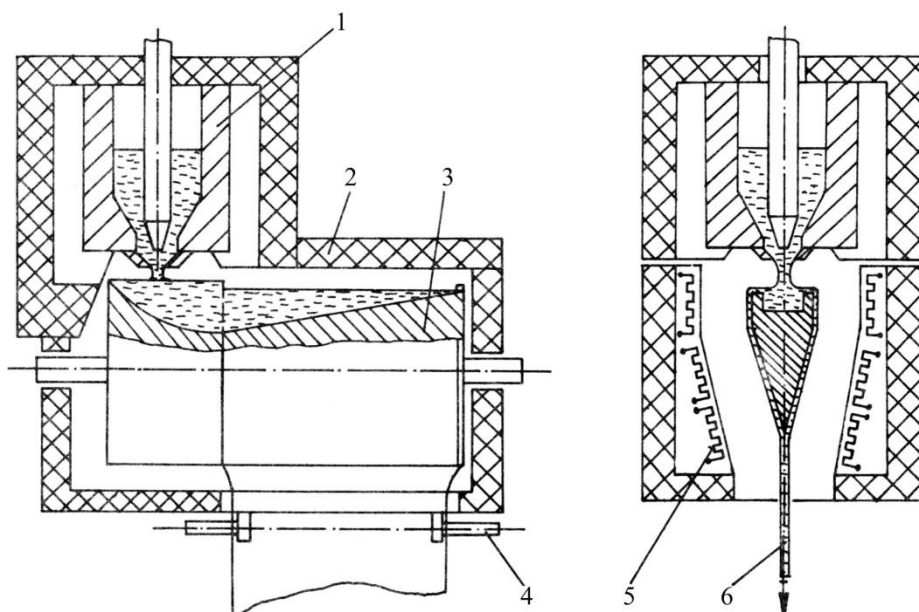
9.6.1.2 Tažení směrem dolů

Originálním způsobem byla vyřešena výroba plochého skla tabulí menších rozměrů s možností častější obměny sortimentu především s ohledem na barvu taveného skla.

Tažení plochého skla směrem dolů je schematicky znázorněno na Obr. 9.34. Utavená sklovina je přiváděna z pracovní části tavicí pece krátkým žlabem, v jehož spodní části je výtokový otvor, z něhož sklovina natéká na rozplavovací klín umístěný v rozplavovací komoře, viz Obr. 9.35. Prostor rozplavovací komory je dobře izolován a jsou v něm zabudovány topné odporové elementy umožňujícími přesnou regulaci teploty. Rozplavovací klín je vyroben ze žárovzdorné oceli a v příčném řezu má tvar obráceného písmene A. Horní část klínu je konstruována jako vanička, jejíž prostor je vymezen zvýšenými okraji. Do této části natéká sklovina, vyplňuje ji a přes zvýšené okraje přetéká a po obou šikmých stěnách klínu stéká až na spodní hranu, kde se obě stékající vrstvy spojují. Rovnoměrnost tloušťky vznikajícího pásu skla je ovlivněna snižující se hloubkou skloviny v části „vaničky“ na opačném konci rozplavovacího klínu (je způsobena zvýšením viskozity skloviny a hydrodynamickými ztrátami při natékání skloviny), který je proto opatřen regulací sklonu podélné osy. Povrch tvarovaného pásu skla je velmi kvalitní (není v kontaktu s žádným tvarovacím prvkem), jeho zúžení eliminují kovové válečkové držáky okrajů. Tyto válečkové držáky nejsou poháněny, jsou volně otočné, mají rýhovaný povrch. Mezi rozplavovací komorou a svislou šachtou chladicí pece je další prostor pro přesnou regulaci teploty (stěny tvoří tvarovky opatřené topnými spirálami, mezerami mezi tvarovkami je možno z tohoto prostoru odsávat vzduch). Chlazení pásu skla probíhá ve čtyřoddílové svislé chladicí peci, tři horní oddíly jsou elektricky vyhřívány. V každém oddílu jsou umístěny dva páry tažných, resp. přidržovacích, osinkocementových válců. Pod chladicí pecí je umístěno dělicí zařízení pro vytváření základních formátů.



Obr. 9.34 Pohled na rozplavovací klín s částí žlabu dávkovače



Obr. 9.35 Konstruktivní uspořádání nátoky skloviny na rozplavovací klín: 1 – žlab dávkovače, 2 – rozplavovací komora, 3 – rozplavovací klín, 4 – držáky okrajů pásu skla, 5 – topné elementy, 6 – tažený pás skla

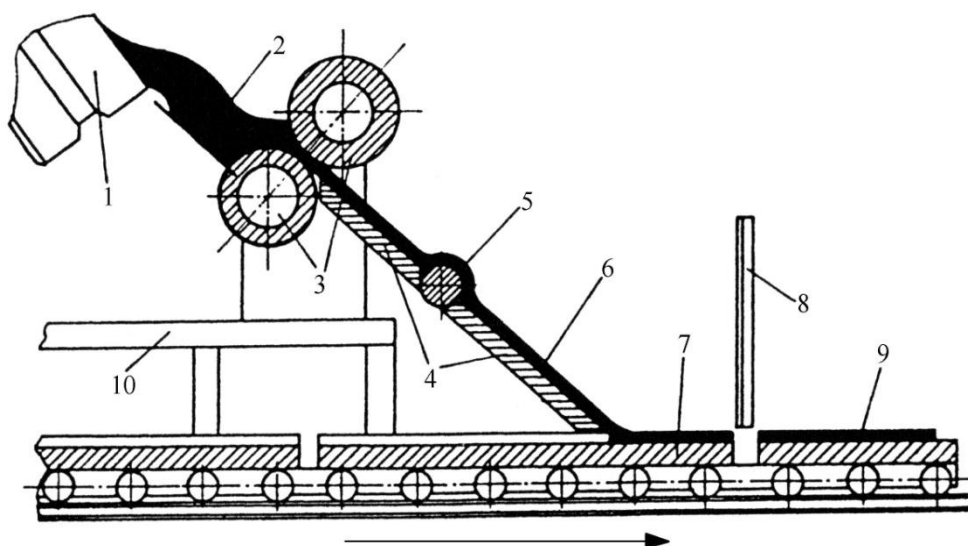
V podmínkách československého sklářství se jednalo o náhradu ruční výroby signálního skla, která byla v provozu ještě v devadesátých letech 20. století. Již dříve bylo podobné zařízení v provozu u firem Corning a PPG s možností vyrábět ploché sklo v rozmezí tloušťky 0,3 až 12 mm o šířce taženého pásu 1000 mm. Technologie se objevuje i u moderních linek na výrobu speciálních sklokeramických materiálů.

9.6.2 Technologie lití

Technologie lití je založena na tvarování skloviny mezi minimálně dvěma licími válci. Dochází tak k přímému kontaktu s tvarovacím zařízením, což vede k nízké kvalitě povrchu. V současné době je technologie používána k výrobě ornamentního skla (vzorovaného skla

dekorem), drátoskla a také k výrobě krycích skel solárních článků opatřených strukturou, která má snížit odraz světla od povrchu skla a tak zvýšit efektivitu článků.

Strojní lití plochého skla probíhá přetržitě nebo kontinuálně. Nejdokonalejší způsob přetržitého lití mezi soustavu licích válců byl v našich sklárnách (Chudeřice) v provozu ještě asi v 60. letech 20. století. Jedná se o způsob Bicheroux, jehož schéma je uvedeno na Obr. 9.36. Sklovina se taví v pánvích o obsahu okolo 1500 kg. Po utavení je pánev 1 pomocí jeřábu dopravena k licímu stroji, sklovina vytéká do žlabu 2 a je tvarována dvěma kovovými vodou chlazenými válci 3. Vytvarovaný pás skla přichází na vodou chlazený skluz 4, na němž je umístěn menší váleček 5 umožňující snazší oddělení pásu skla 6 od skluzové desky a pokračuje až na kovový stůl 7. Transport vytvarovaného pásu skla je zprostředkován buď několika licími stoly, nebo válečkovou dráhou do chladicí pece. Linka Bicheroux umožňuje tvarování pásu skla o šířce až 4000 mm do tloušťky 30 mm. Z jedné pánve je možno vyrobit tři tabule skla o rozměrech 4000 x 6500 mm.



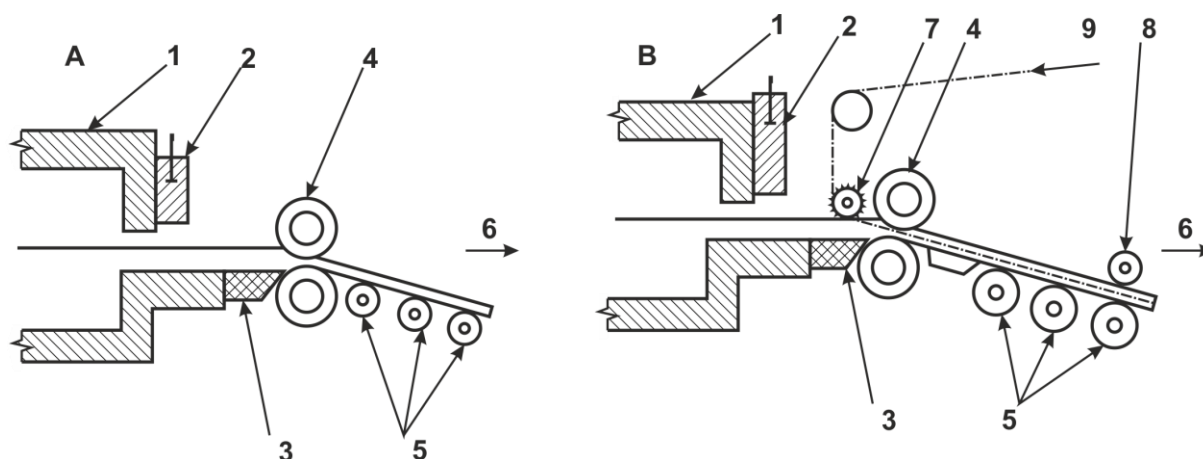
Obr. 9.36 Přetržité lití skla způsobem Bicheroux: 1 – pánev (s obsahem asi 1500 kg skloviny), 2 – sklovina, 3 – tvarovací válce, 4 – vodou chlazený skluz, 5 – pomocný váleček, 6 – vytvarovaný pás skla, 7 – transportní stůl, 8 – nůžky, 9 – odříznutá tabule, 10 – pracovní plošina

V současné době se lití plochého skla provádí kontinuálním způsobem. Sklovina je z tavicí pece přiváděna mezi válce licího stroje (Obr. 9.37 A), kde dochází ke tvarování a posléze k chlazení ve válečkové chladicí peci, za kterou následuje dělení na výstupní formáty. Kontakt s licími válci má za následek vytvoření nepříliš kvalitního povrchu, proto se často volí válce opatřené povrchovým reliéfem, který vytváří na pásu skla jedno- nebo oboustranný dekor.

Materiál a povrchová úprava vodou chlazených kovových válců významně ovlivňuje kvalitu povrchu litého pásu skla. Nejčastěji jsou pro výrobu licích válců používány dvě skupiny materiálů. Jednak je to chromová ocel s obsahem 12 až 15 % chromu používaná pro válce hladké nebo uhlíková, dobře obrobitelná ocel, z níž se vyrábějí válce vzorované. Způsob vytvoření vzoru na povrchu licího válce se nazývá moletování. Vzor je kovorytecky

vytvořen na ocelovém válečku malého průměru a po jeho zakalení se působením vysokého tlaku přenes na hladký povrch licího válce.

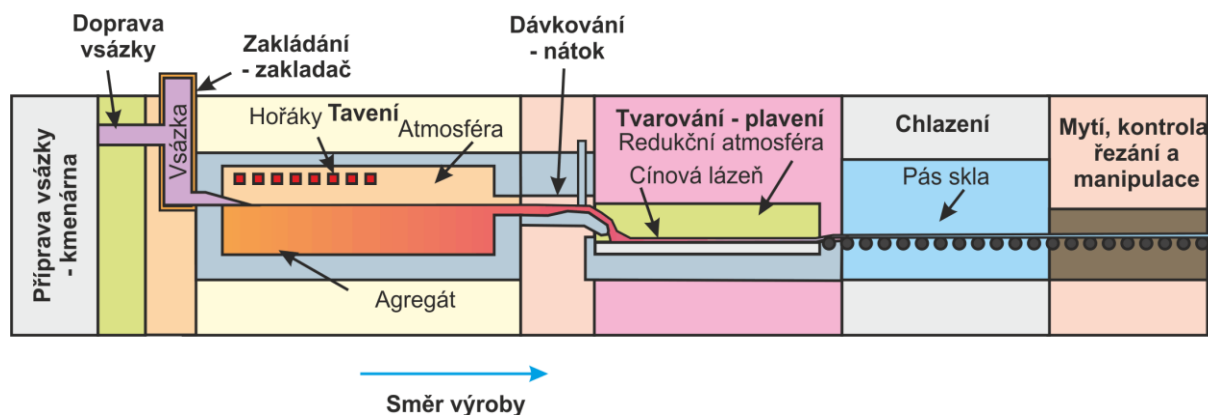
Používanou variantou je zavádění drátěné sítě (Obr. 9.37 B) v průběhu lití. Tato síť zajišťuje soudržnost tabule i při mechanickém poškození např. nárazem a představuje variantu bezpečnostního skla.



Obr. 9.37 Schéma nepřetržitého lití plochého skla: A – licí stroj se stejnou velikostí tvarovacích válců, B – licí stroj s úpravou pro zavádění drátěné vložky, 1 – pracovní část tavícího agregátu, 2 – hradítko, 3 – strojový kámen 4 – licí válce (duté, chlazené vodou), 5 – válečky skluzové dráhy, 6 – chladicí pec, 7 – zaváděcí prvek drátěné vložky (drážkovaný válec), 8 – leštící válec, 9 – drátěná síť

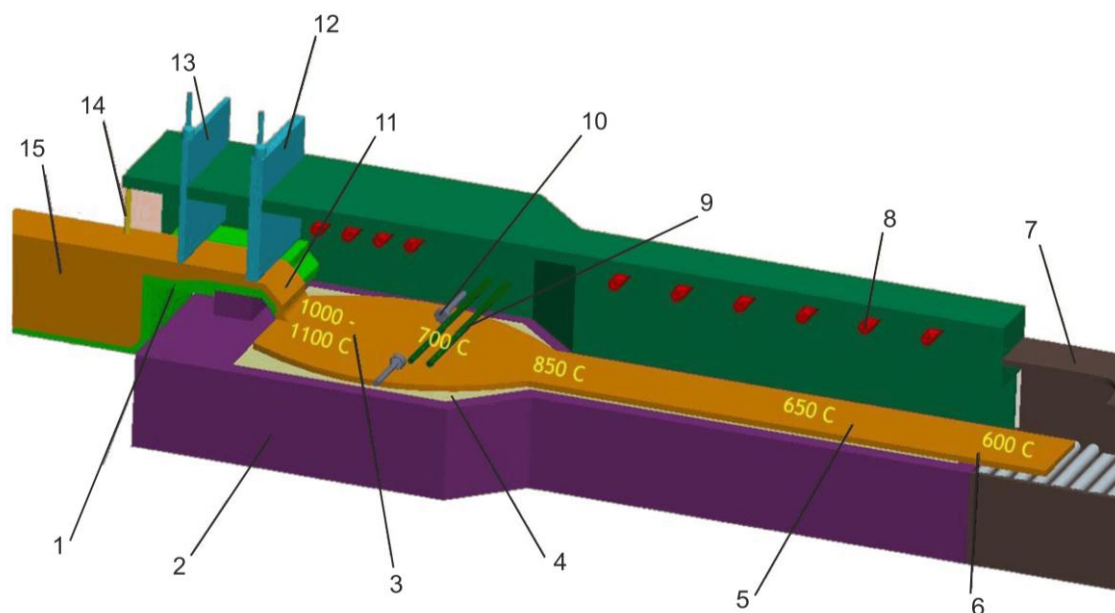
9.6.3 Technologie plavení (FLOAT)

Jedná se o nejmodernější způsob výroby plochého skla, který se vyznačuje vysokou kvalitou povrchu vyrobeného pásu skla a vysokou produktivitou výroby. Princip technologie (Obr. 9.38) spočívá v přivádění utavené skloviny na lázeň roztaveného cínu a odtahování vytvořeného pásu skla vodorovným směrem přes chladicí pec. V průběhu tažení může docházet k cílenému ovlivnění některých vlastností konečného produktu (např. pasivace povrchu, vytváření funkčních vrstev na povrchu pásu, mytí apod.). Po výstupu z chladicí pece dochází k detekci vad, odřezávání okrajů a dělení na výstupní formáty.



Obr. 9.38 Schéma celé výrobní technologie plavení skla na cínové lázni (FLOAT)

Na Obr. 9.39 je znázorněn pohled na tvarovací část linky FLOAT. Sklovina z pracovní části STA teče nátokovým kanálem přes tzv. LIP (nátokový kámen vyrobený z elektrotaveného žárovzdorného materiálu) na cínovou lázeň.



Obr. 9.39 Pohled na tvarovací část linky FLOAT: 1 – žlab tavicího agregátu, 2 – vana s cínovou lázní, 3 – sklovina, 4 – roztavený cín, 5 – pás formovaného plochého skla, 6 – výstup z tvarovací lázně (zvedací válce), 7 – chladičí pec, 8 – topná tělesa, 9 – průtokový vodní chladič, 10 – kovové drážkované rolny, 11 – nátok skloviny, 12 – regulační hradítko, 13 – hradítko, 14 – pyrometr, 15 – sklovina

Sklovina přivedená na povrch cínové lázně se rozlije tak, že její horní a spodní povrch jsou planparalelní, což je způsobeno účinkem gravitace a sil povrchového napětí. Tyto veličiny vlastně provádí tvarování skloviny. Rztavená sklovina vytvoří na povrchu cínu „kaluž“, o tvaru znázorněném na Obr. 9.40. Středová tloušťka „kaluže“ je výslednicí rovnováhy, která se ustálí mezi gravitační silou a silou povrchového napětí vyvolávající tah směrem dovnitř. Tato rovnovážná tloušťka t_L [m] je dána vztahem

$$t_L = \sqrt{(S_s + S_t + S_{st}) \cdot \frac{2\rho_t}{g \cdot \rho_s \cdot (\rho_t - \rho_s)}} \quad (9.4)$$

kde S_s je povrchové napětí na rozhraní skloviny a atmosféry [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$],

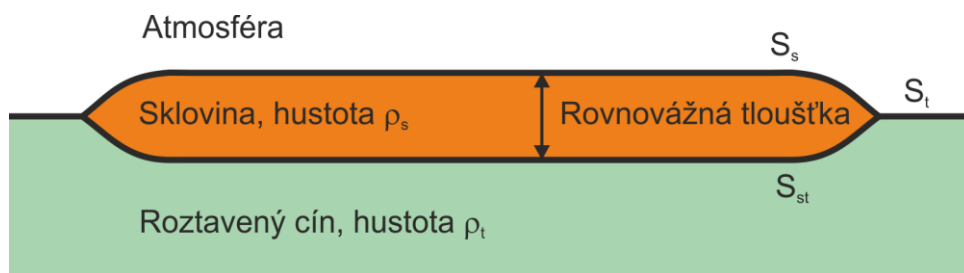
S_t - povrchové napětí na rozhraní taveniny cínu a atmosféry [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$],

S_{st} - povrchové napětí na rozhraní skloviny a taveniny cínu [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$],

ρ_t - hustota taveniny cínu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

ρ_s - hustota skloviny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

g - gravitační zrychlení [$9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$].



Obr. 9.40 Vertikální řez „kaluží“ skloviny na povrchu cínové lázně

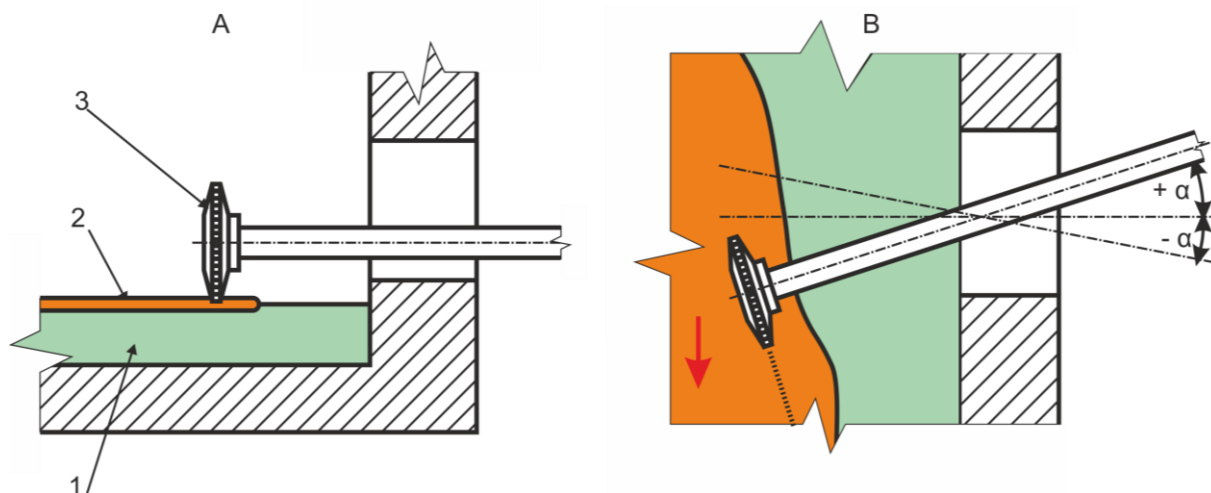
Roztavená sklovina je na cínovou lázeň přiváděna kontinuálně a má teplotu přibližně 1050 °C. Pohyb na povrchu lázně je ovlivněn trakční silou vyvolanou třením pásu skla a nosných válečků dopravujících pás skla chladicí pecí. Zpočátku je viskozita skloviny dosti nízká (okolo bodu zpracování, 10^3 Pa·s, viz poz.¹³), aby mohlo dojít k jejímu rozlití na povrchu taveniny cínu a vyrovnání nepravidelností povrchu. Sklovina ovšem nesmí dosáhnout okrajů lázně, aby nedošlo k jejímu „přichycení“. S postupným zmenšováním tloušťky směřujícím za normálních podmínek k hodnotě rovnovážné tloušťky dochází k postupnému zvyšování viskozity až k hodnotám 10^{10} Pa·s (viz pozn.¹⁴). Tato viskozita již umožňuje zvednutí pásu skla z cínové lázně, aniž by hrozila deformace spodního povrchu pásu kontaktem se zvedacími válci.

Rovnovážná tloušťka je u běžného složení plochého skla okolo 6 mm. Pokud by se rychlost odtahu skloviny z cínové lázně zvýšila, výsledkem by bylo zmenšení šířky pásu, ale nikoliv tloušťky skla. Při výrobě jiné tloušťky, než je tloušťka rovnovážná, se používají vodou chlazené otočné kovové rolly s drážkovanými okraji, které pás skla na cínové lázni roztahují nebo zužují. Na Obr. 9.41 a Obr. 9.42 je ukázána funkce kovových roln při ovlivnění tloušťky pásu skla. Kromě tohoto mechanického zásahu je nutné u tažení menších tloušťek skla přehřívát prostor cínové lázně pomocí odporových topných elementů. Při výrobě větších tloušťek skla tento přehřev odpadá, protože tvarovaná sklovina si přináší zvýšený obsah tepla již při nátoku na lázeň.

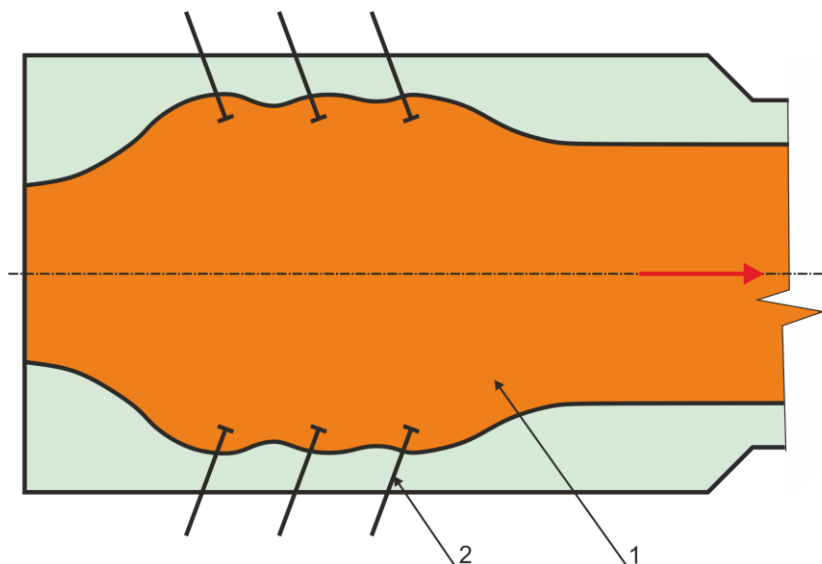
Cínová lázeň je proti oxidaci chráněna redukční atmosférou tvořenou směsí dusíku a vodíku (podíl vodíku se pohybuje od 5 do 12 %), její parametry jsou závislé především na tavicím výkonu pece (při výkonu 700 tun skloviny za 24 hodin a šířce pásu skla 3,5 m je šířka lázně 6 m, délka 45 až 70 m, množství roztaveného cínu 170 až 200 t, hloubka se pohybuje přibližně od 52 do 105 mm).

¹³ Viskozita 10^3 Pa·s odpovídá u běžných sklovin pro výrobu plaveného skla teplotám kolem 1050 °C.

¹⁴ Viskozita 10^{10} Pa·s odpovídá u běžných sklovin pro výrobu plaveného skla teplotám kolem 600 °C.



Obr. 9.41 Ovlivnění šířky pásu skla pomocí kovových drážkovaných roln (bokorys), B - polohy a nastavení rolny (půdorys), 1 – tavenina cínu, 2 – sklovina, 3 – rolna chlazená vodou, $+\alpha$ – menší tloušťka pásu (roztahování), $-\alpha$ – větší tloušťka pásu (shrnování)



Obr. 9.42 Použití tří párů roln při snižování tloušťky pásu (pohled shora): 1 – pás skla, 2 – kovové rolly

Vedle taveniny cínu by bylo prakticky možné použít i jiných materiálů, které splňují určité podmínky:

- vytváří taveninu v oblasti 520 až 1080 °C,
- jejich tavenina má hustotu vyšší než sklovina,
- mají nízkou tenzi par,
- chemicky nereagují (příliš) se sklovinou.

Těmto požadavkům vyhovují taveniny tří kovů: cín, galium a indium. Volba cínu byla otázkou dostupnosti a ceny. Cín má bod tání 232 °C, bod varu 2 362 °C, téká od 1 200 °C.

Je známo, že vlastnosti „cínové“ a „necínové“ strany pásu skla se poněkud liší, spíše než o chemickou reakci se jedná o difúzi cínu do povrchových vrstev skla a lokálně mechanicky zachycené oxidy cínu na povrchu skla. Některé optické vlastnosti, mechanické i chemické, jsou většinou horší u cínové strany. Je proto nutné u řady následných zpracovatelských a zušlechťovacích operací tyto vlastnosti zohlednit vhodnou orientací stran.

Z důvodu kompletnosti výrobní linky jsou v následujícím textu uvedeny následné technologické operace, které navazují na tvarování.

Po výstupu z kovové lázně přichází pás skla do tunelové chladicí pece, což je kontinuální zařízení s válečkovým dopravníkem, které je většinou konstruováno jako několikasekční. Chlazení se provádí z důvodu snížení trvalého vnitřního napětí (kap. 3.7.2) na povolenou mez chladicím postupem (kap. 10.1). Základní členění chladicí pece je možné provést na šest zón. První, předchlazovací zóna, zahrnuje teploty od zhruba 600 do 540 °C a je určena především k vyrovnání teplot napříč pásem skla a k jeho vytemperování k horní chladicí teplotě (10^{12} Pa·s). Druhá, chladicí zóna, zahrnuje rozsah teplot zhruba od 540 do 470 až 500 °C dochází k pozvolnému poklesu teplot k dolní chladicí teplotě ($10^{13,5}$ Pa·s). Rychlost musí být dostatečně nízká, aby zbytkové trvalé vnitřní napětí bylo nižší než přípustné. Třetí, dochlazovací zóna, zahrnuje pokles ze 470 až 500 °C na 380 až 400 °C. V této zóně vzniká pouze přechodné napětí (kap. 3.7.1), takže rychlost ochlazování může být vyšší. V dalších zónách již dochází k ochlazování nucenou konvekcí, tj. přiváděním vzduchu. Ve čtvrté zóně jsou chlazeny oba povrchy pásu teplým vzduchem. V páté zóně je chlazeno studeným vzduchem. V poslední šesté zóně (pod 220 °C) je skleněný pás již odkryt a je z obou stran dochlazován studeným vzduchem. Výstupní teplota skla je okolo 60 °C.

Následuje nouzový řez, který je používán pro dělení skla a jeho střeptování. Dělí skleněný pás příčně (kap. 11.1.1.1) a směřuje střepy do drtiče a na dopravní pás pod linkou. Využíván je například v případech přechodu na jinou tloušťku (přechodná tloušťka není využitelná), zhoršení kvality (do doby odstranění vady), technické problémy na studeném konci linky, ...

Po chladicí peci může být zařazeno mycí zařízení. Mytí se provádí horkou demineralizovanou vodou, která je přiváděna na horní i spodní povrch pásu válcovými rotujícími kartáči, které se povrchů skla nedotýkají, ale pouze je ostříkují, následuje sušení horkým vzduchem. Následovat může pasivace povrchu pasivačním přípravkem¹⁵, který je nanášen pasivačním válcem.

Následuje detekce vad pomocí laseru a na pásu skla jsou vyznačeny barevně vady, které se podle velikosti dělí do několika skupin. Počet, velikost a rozmístění vad jsou ukládány do optimalizačního systému, který zařazuje jednotlivé tabule do určitých skupin v souvislosti s kvalitativními požadavky. Detekovány jsou vady i s velikostí pod 0,5 mm. Při detekci vad neslučitelných s danými kvalitativními požadavky je část skla vyříznuta a sklo s vadou se střepeje. Pod celou výrobní linkou vede dopravní pás, který střepy vrací do kmenárny.

¹⁵ Roztok pasivačního přípravku se připravuje rozpouštěním kyseliny citrónové, chelatonu, síranu zinečnatého a slimcidu.

Dělení nekonečného pásu plaveného skla se provádí lámáním (kap. 11.1.1.1), které probíhá ve dvou operacích. První je „podélný řez“, kterým se od tabule oddělují okraje, kde jsou otisky rolen a není zajištěn požadavek konstantní tloušťky, tzv. borty. Jedná se o technologický odpad. Druhou operací je „příčný řez“, kterým se dělí z pásu skla tabule požadovaných rozměrů. Zařízení je vybaveno minimálně jedním příčným mostem, který je vůči pásu umístěn nikoliv napříč, ale šikmo, aby byl kompenzován pohyb pásu skla při naškrábnutí. Rychlost pohybu řezací hlavy je odvozena od pohybu pásu skla, což zajišťuje kolmý řez i při změně sortimentu, tedy změně rychlosti pásu.

Následuje práškování prokládacím práškem, které zabrání lepení tabulí skla. Tabule jsou pak stohovány pomocí překladačů na přistavené rámy. Rámy jsou odváženy do skladu a následně expedovány.

9.7 Technologie výroby trubíc a tyčí

Skleněné trubice se vyrábějí kontinuálním tažením z nátoku skloviny. Technologie se rozlišují podle směru tažení na horizontální a vertikální. Společným prvkem všech používaných způsobů je dutý trn, přes který sklovina vytéká a který vytváří zárodek dutiny, jinak by byla tažena tyč. Do trnu je pod mírným tlakem přiváděn vzduch.

Skleněné tyče se mohou vyrábět stejnou technologií tažení bez použití trnu anebo technologií tzv. lití.

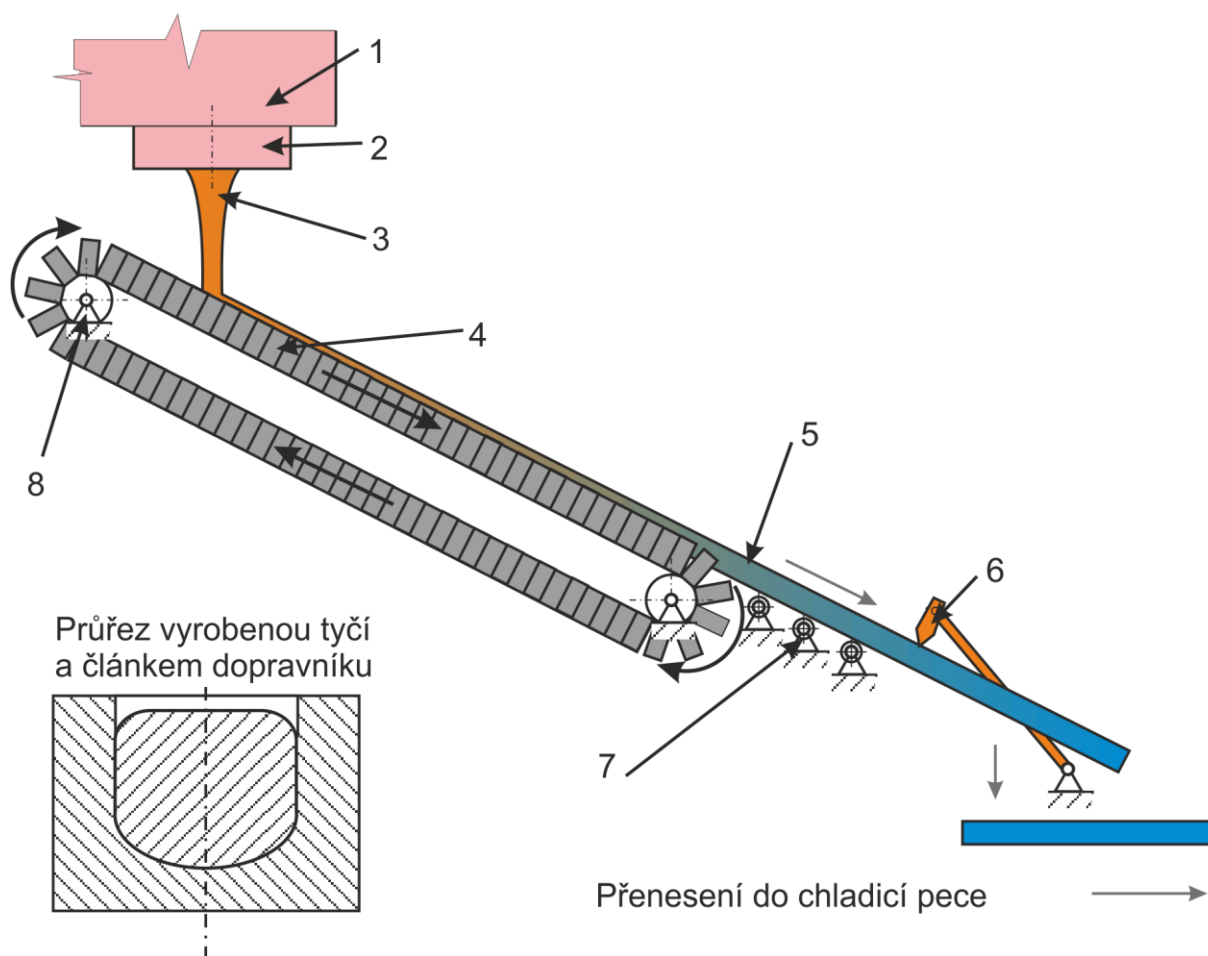
9.7.1 Lití mačkárenských tyčí

Technologie lití na nekonečný článkový dopravník se uplatňuje při výrobě polotovaru pro další zpracování při dvoustupňové výrobě. Použití nachází především při výrobě mačkárenských tyčí produkovaných ve větších sériích.

Sklovina se buď taví v pánvi (obsah asi 400 kg) s kruhovým otvorem, který je po dobu tavení uzavřen kovovou, vodou ochlazovanou zátkou (pro menší série) nebo v denní či kontinuální vaně (větší série). Přes výtakovou misku natéká sklovina na kovový článkový dopravník („článkovou formu“), jehož články vytvářejí nekonečný žlábek, který je sklovinou vyplněn (obr. Obr. 9.43). Článková forma tvaruje boky a spodek skleněné tyče a odvádí většinu tepla. Vrch tyče je tvarován povrchovým napětím a horní plochou je také odváděna část tepla do okolí.

Parametry, které se při lití tyčí nastavují, jsou rychlost dopravníku a teplota vytékající skloviny (viskozita). Článková forma musí odvést dostatek tepla, aby se tyč následně samovolně nedeformovala. Po opuknutí a odlomení tyče na požadovanou délku (obvykle 1200 mm) se tyče ukládají do chladicí pece.

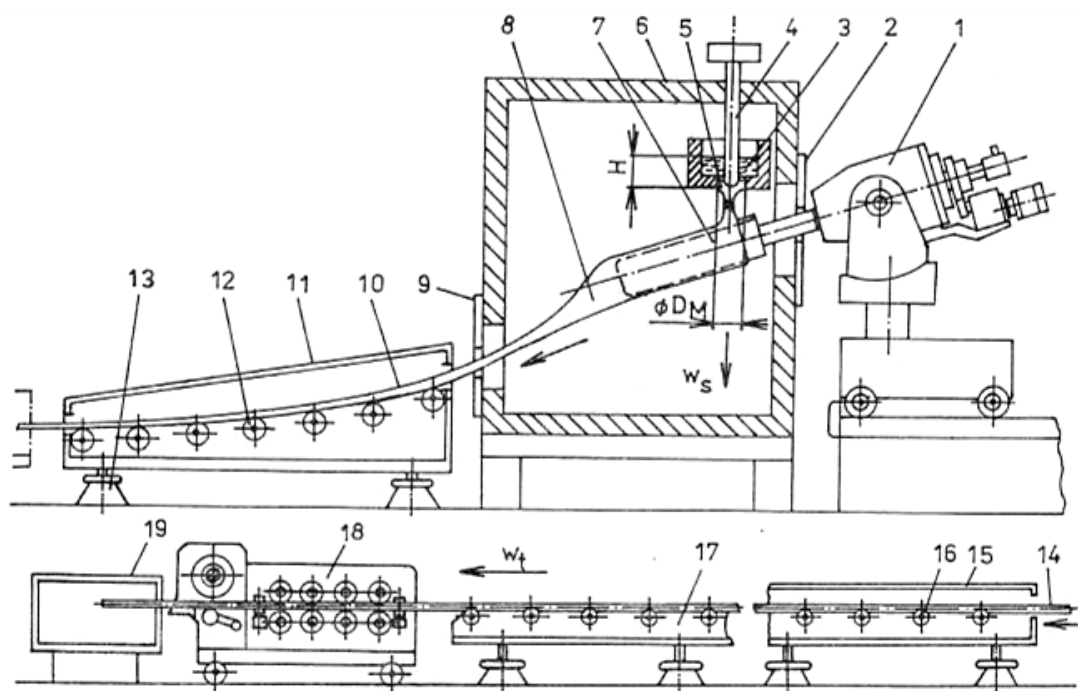
Touto technologií se vyrábějí i bloky pro výrobu větších kusů výrobků ze skla (např. 60 x 58 mm a 90 x 30 mm). Pohyb článkového dopravníku je oproti výrobě mačkárenských tyčí mnohem pomalejší.



Obr. 9.43 Schéma strojní výroby mačkárenských tyčí: 1 – pánvová pec, žlab denní nebo kontinuální vany, 2 – výtoková miska s kruhovým výtokem, 3 – výtok skloviny (okolo 1000 °C), 4 – článkový dopravník tvořící „nekonečnou“ formu, 5 – tyč, 6 – mechanismus opuknutí a odlomení, 7 – kladková dráha, 8 – rám stroje

9.7.2 Horizontální tažení (způsob Danner)

Tato technologie je již zastaralá, ale je nedílnou součástí vývoje technologií tvarování trubic. Při tomto způsobu tažení natéká sklovina na skloněnou rotující šamotovou hubici, vytváří na ní nábal, pozvolna stéká a jako trubice je odtahována tažným strojem zpočátku na kladkové dráze s odnímatelným krytem (pomalé stejnoměrné ochlazování), dále na kladkové dráze bez zakrytování. Za tažným strojem je dělena na požadované délky. Strojní zařízení způsobu Danner je znázorněno na Obr. 9.44. Vnější průměr tažených trubic se pohybuje v rozmezí 8 až 50 mm, tlak vzduchu přiváděného do píšťaly je zhruba 6 kPa, rychlost tažení je 4 až 80 m·min⁻¹.

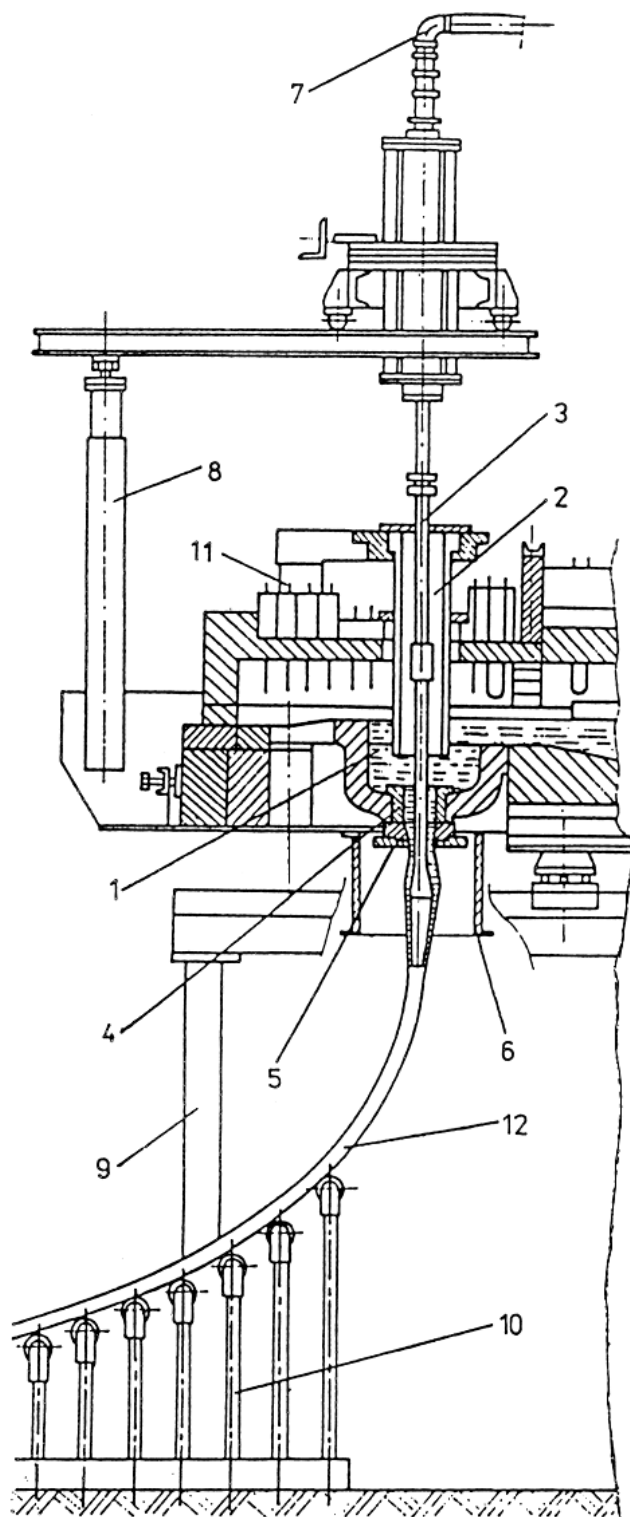


Obr. 9.44 Strojní zařízení na horizontální tažení trubíc: 1 – tvarovací stroj, 2 – izolační clona, 3 – žlab s výtokem, 4 – zářež, 5 – proužek vytékající skloviny, 6 – komora, 7 – hubice s píšťalou, 8 – zárodek trubice, 9 – izolační clona, 10 – trubice, 11 – krytá část tažné dráhy, 12 – rolna, 13 – výšková aretační podložka, 14 – trubice, 15 a 17 – krytá a otevřená dopravní trať, 16 – rolna, 18 – tažný stroj, 19 – paleta

9.7.3 Vertikální tažení tyčí a trubíc směrem dolů

Tato technologie se vyskytuje ve dvou provedeních – tažení trubíc velkých průměrů přes 80 mm (způsob Verta) a tažení trubíc do průměru okolo 50 mm (systém Vello). Rozdíl je pouze v tom, že se původně vertikální směr tažení trubice způsobem Vello mění na horizontální a probíhá pak stejně jako u systému Danner. Schéma zařízení pracujícího způsobem Vello je uvedeno na Obr. 9.45. Sklovina vytéká dnem dávkovací hlavy, obtéká tvarovací trn, jehož dutinou se vhání vzduch. Vzniká tak trubice, jejíž rozměry jsou dány výškou hladiny skloviny, viskozitou skloviny, průměrem výtokové misky, rychlostí tažení, polohou plunžru a jeho průměrem, tlakem vzduchu v dutém trnu – píšťale.

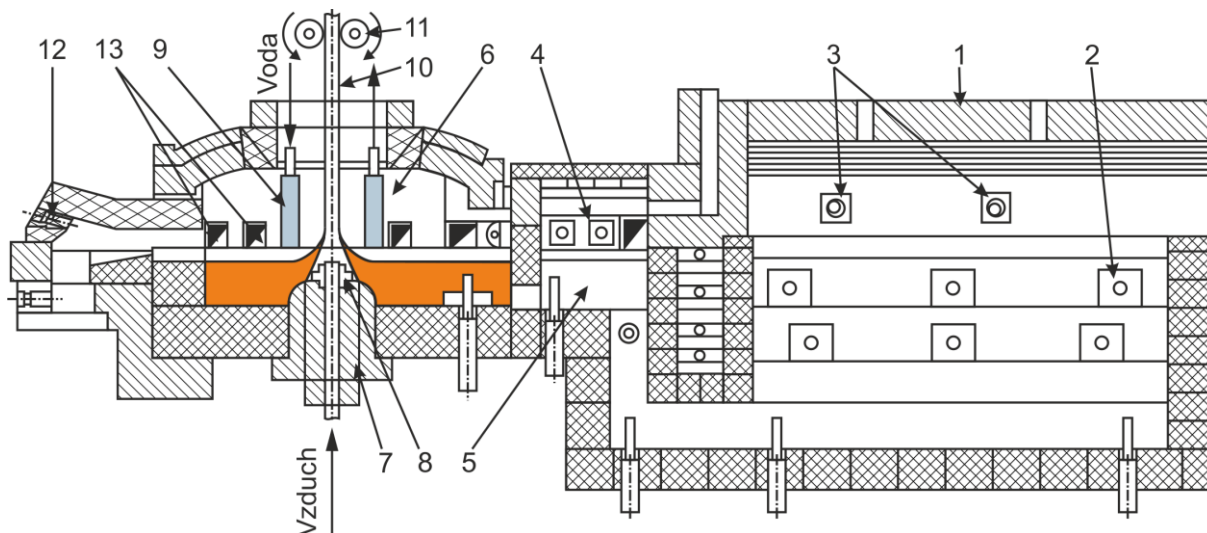
Průměr trubíc vyráběných způsobem Vello se pohybuje zhruba od 5 do 55 mm. Ve srovnání se způsobem Danner probíhá tažení přibližně dvojnásobnou rychlostí, asi 10 až 160 m·min⁻¹. Tento způsob tažení se používá v průmyslu skleněné bižuterie k výrobě tlustostěnných kapilár s přesným otvorem a kvalitním vnitřním povrchem. Vytažené kapiláry se dále zpracovávají rozbrušováním. Na lince lze táhnout i skleněné tyče.



Obr. 9.45 Schéma linky Vello na vertikální tažení trubic směrem dolů: 1 – sklovina ve žlabu, 2 – trubka, 3 – píšťala s tvarovací koncovkou, 4 – výtoková vložka, 5 – držák misky, 6 – stabilizační válec, 7 – přívod tlakového vzduchu, 8 – nosná konstrukce ovládacího zařízení píšťaly, 9 – nosná konstrukce feedru, 10 – válečková dráha, 11 – topný elektrický systém, 12 – tažená trubka

9.7.4 Vertikální tažení trubic směrem nahoru

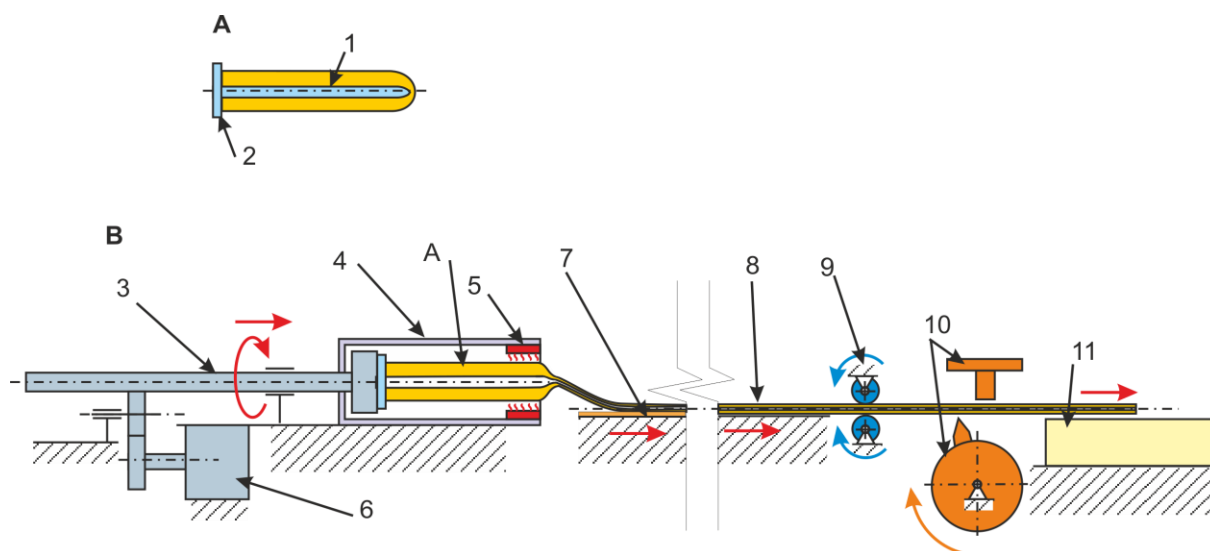
Tímto způsobem se táhly trubice větších průměrů (jedná se o starší způsob), zhruba od 50 do 200 mm. Schéma zařízení je na Obr. 9.46, rychlost tažení se pohybuje od 2 do 25 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$. Přes přítokový kanál je do kruhového předpecí přiváděna sklovina o viskozitě $10^{2,4}$ Pa·s až $10^{2,9}$ Pa·s. Ve středu předpecí (průměru 1,8 až 2,3 m) je umístěna šamotová hubice s nástavcem, do které je přiváděn vzduch o přetlaku 900 Pa. Nad hladinou je umístěn vodou chlazený chladič, který odebrá teplo z trubice a hubice.



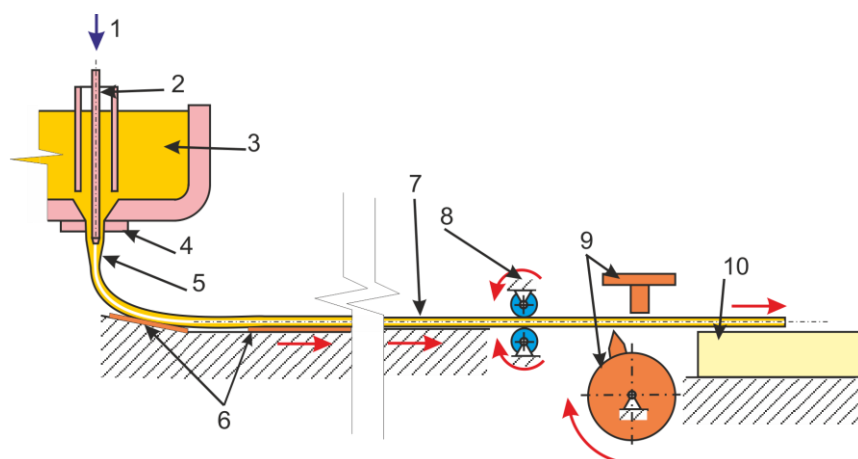
Obr. 9.46 Zařízení na tažení trubic směrem nahoru: 1 – tavicí agregát, 2 – elektrody, 3, 4 – hořáky, 5 – přítokový kanál, 6 – pracovní komora, 7 – tvarovací těleso, 8 – tvarovací hubice, 9 – chladič, 10 – tažená trubice, 11 – tažné rolny, 12 – hořáky, 13 – odtahy

9.7.5 Tažení rokajlových trubiček

Toto zařízení se používá v průmyslu skleněné bižuterie na výrobu základní suroviny pro skleněné perličky, tzv. rokajl. Systém je buď dvoustupňový nebo jednostupňový. U dvoustupňového způsobu se tažení provádí z předem připraveného ingotu (Obr. 9.47), u jednostupňového způsobu je princip tažení podobný technologii Vello a je znázorněn na Obr. 9.48. Sklovina natéká na dutý trn, do jehož dutiny je přiváděn pod mírným tlakem vzduch. Tažení probíhá zpočátku svisle, pak přechází do vodorovného směru, za tažným zařízením dochází k dělení.



Obr. 9.47 Schéma dvoustupňového tažení rokajlových trubiček: A – ingot, B – výroba, 1 – trn (před vložení do pícky je vyjmut), 2 – kovový kroužek, 3 – ozubený vodící hřídel, 4 – tažná pícka, 5 – topné spirály, 6 – pohon vodícího hřídele, 7 – dřevěná deska, 8 – tažená trubička, 9 – tažné zařízení, 10 – dělicí zařízení, 11 – zásobník



Obr. 9.48 Schéma jednostupňového tažení rokajlových trubiček: 1 – tlakový vzduch, 2 – plunžr, 3 – sklovina, 4 – výtoková miska, 5 – výtok skloviny, 6 – dřevěná deska, 7 – tažená trubička, 8 – tažné zařízení, 9 – dělicí zařízení, 10 – zásobník

9.8 Technologie výroby skleněných vláken

Skleněná vlákna představují samostatnou skupinu výrobků. Rozdělována jsou do dvou základních skupin, jednak jsou to vlákna nekonečné délky (rajón), jednak vlákna konečných délek (stříž, staple). Tomuto rozdělení odpovídá i charakteristika výrobních technologií a jim odpovídající strojní zařízení. Nekonečná skleněná vlákna se vyznačují stejnou kvalitou a vyrábějí se nejčastěji v tloušťkách od 5 do 12 μm . Zpracovávají se technologiemi používanými v textilním průmyslu, jejich využití je možné pro výrobu skleněných tkanin nebo laminátů, další využití je v oblasti optoelektronické (vlnovody). Nekonečná skleněná vlákna mají několikanásobně vyšší pevnost nežli kusové sklo stejného chemického složení. Jejich použitelnost pro textilní zpracování určuje především pevnost v ohybu, která klesá

s rostoucím průměrem. Odolnost skleněných vláken proti otěru a mechanická pevnost se zvyšuje povrchovou úpravou, tzv. lubrikací, tedy ochranou povrchu proti poškození. Skleněná vlákna konečných délek vykazují širší rozptyl tloušťek, zhruba od 0,5 do 30 μm a někdy nestejnou kvalitou (mohou obsahovat i granálie). Jejich zpracování se provádí nejčastěji vrstvením a pojením do rohoží a desek, speciálních tvárnic, případně zpracováním některou z technologií výroby netkaných textilií, využití je pro akustické, tepelné nebo elektrické izolace. Do této skupiny se zahrnují i vlákna se zvýšenou odolností proti vysokým teplotám, skleněná vata, vlákna strusková a horninová. Pro výrobu skleněných vláken se v praxi využívají čtyři základní principy:

- mechanické tažení,
- odstředivý způsob,
- tažení plynným médiem,
- kombinované způsoby.

9.8.1 Technologie mechanického tažení skleněného rajónu

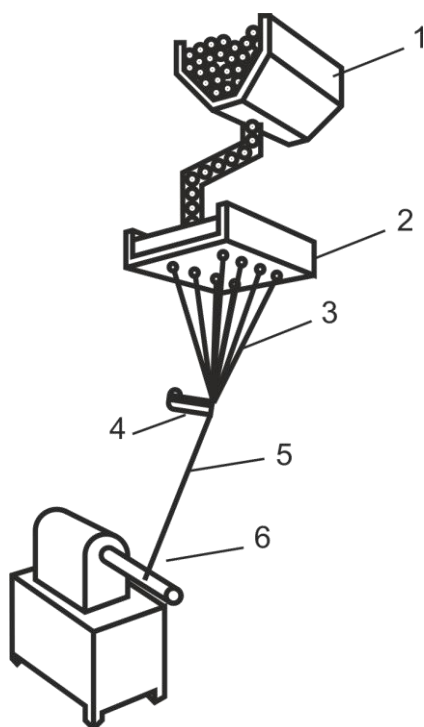
Výroba je založená na tažení vláken při současném jejich navíjení rotujícím bubnem navíječky. Sklovina vytéká přes platinové pícky s malými tryskami.

9.8.1.1 Dvoustupňová technologie

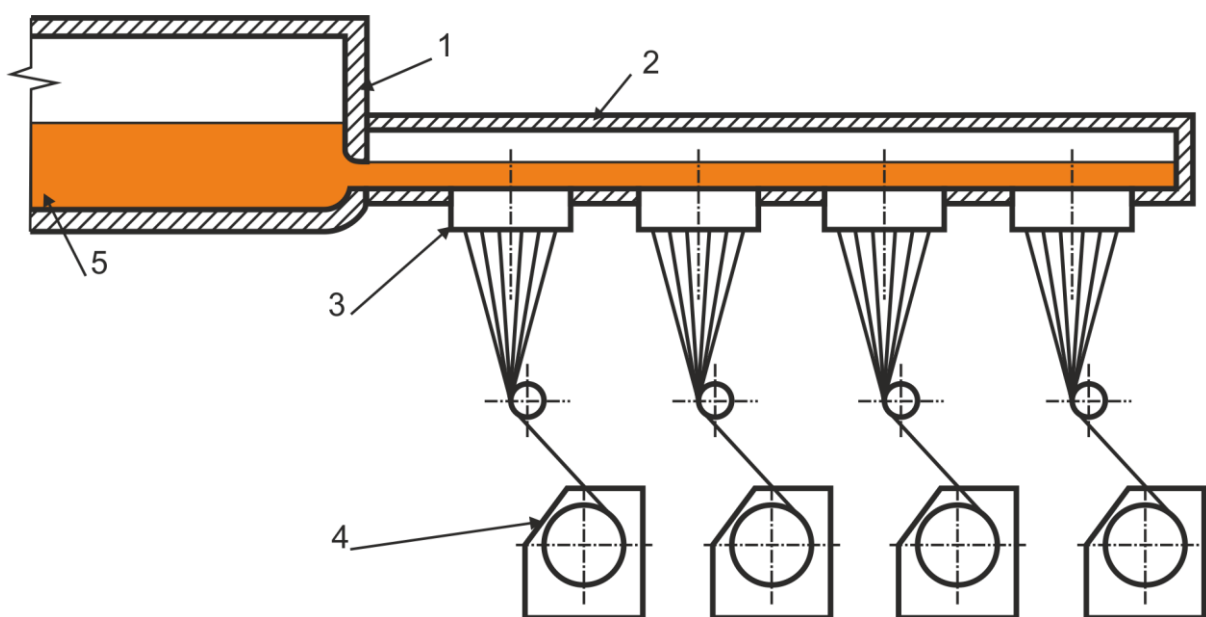
Schéma dvoustupňového způsobu výroby je na Obr. 9.49. Surovinou jsou skleněné kuličky, které jsou automaticky dávkovány ze zásobníku do platinové pícky, v níž jsou roztaveny, a sklovina vytéká tryskami ve dně pícky. Zárodkem monofilu (samostatného vlákna) je kapka tvořící se na trysce. Kapky jsou pomocí ručního přípravku spojeny do podoby „slepence“ a jako pramenec všech monofilů navedeny na cívku umístěnou na bubnu navíječky. Mezi navíječkou a dnem pícky dochází k aplikaci lubrikace, a to buď na lubrikační patce (Obr. 9.49, pozice 4) nebo průchodem par. Po nábalu určitého množství pramence je cívka sejmuta a nahrazena další. Průměr monofilu je funkcí teploty (viskozity) skloviny, průměru otvoru trysky, velikosti hydrostatického tlaku a rychlosti odtahování.

9.8.1.2 Jednostupňová technologie

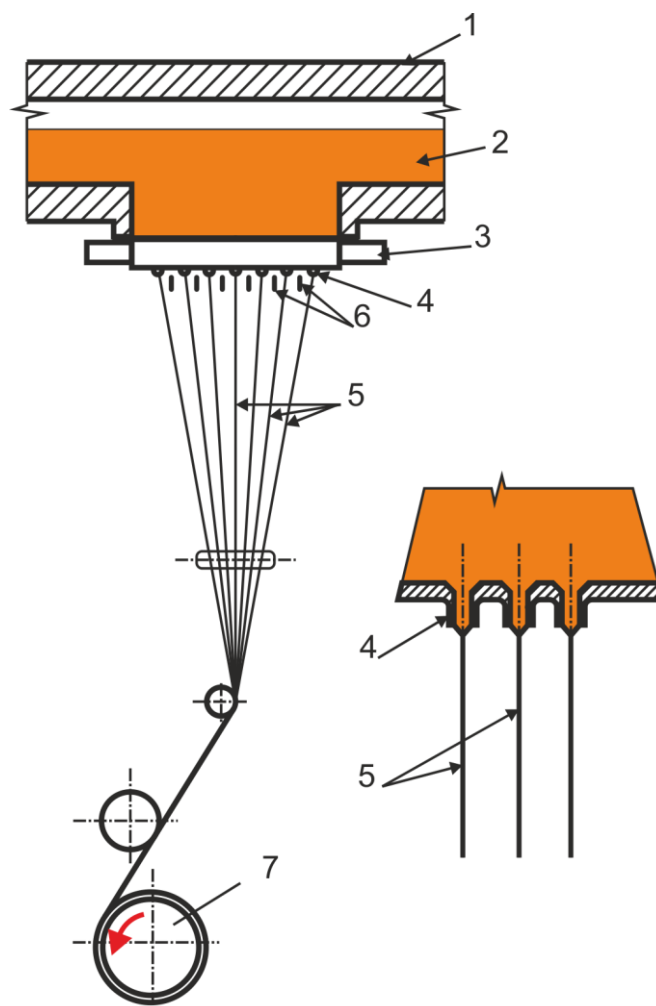
Schéma strojního zařízení jednostupňového způsobu výroby skleněného rajónu je uvedeno na Obr. 9.50. Bylo vyvinuto jako dokonalejší a výrazně produktivnější způsob, který vychází z dvoustupňového způsobu, při němž jednotlivé pícky nahrazují platinové přípravky (plechy) opatřené tryskami a umístěné jako části dna nátokového kanálu, kterým je přiváděna sklovina. Podrobnější výkres dna „jedné pícky“ je uveden na Obr. 9.51. Počet trysek se postupně měnil, zvyšoval se z původních 400 až zhruba na 2000. U modifikovaných zařízení (C-proces) se počet trysek zvýšil až na 4000. Množství vyrobeného vlákna z jedné trysky činí 0,020 až 0,022 kg za hodinu, výkon jedné pícky obnáší 45 kg za hodinu u klasického způsobu, u C-procesu 80 až 84 kg za hodinu.



Obr. 9.49 Schéma dvoustupňového tažení skleněného rajónu: 1 – zásobník kuliček s podavačem, 2 – platinová píčka, 3 – jednotlivá vlákna, 4 – lubrikace, 5 – pramenec, 6 – navíječka



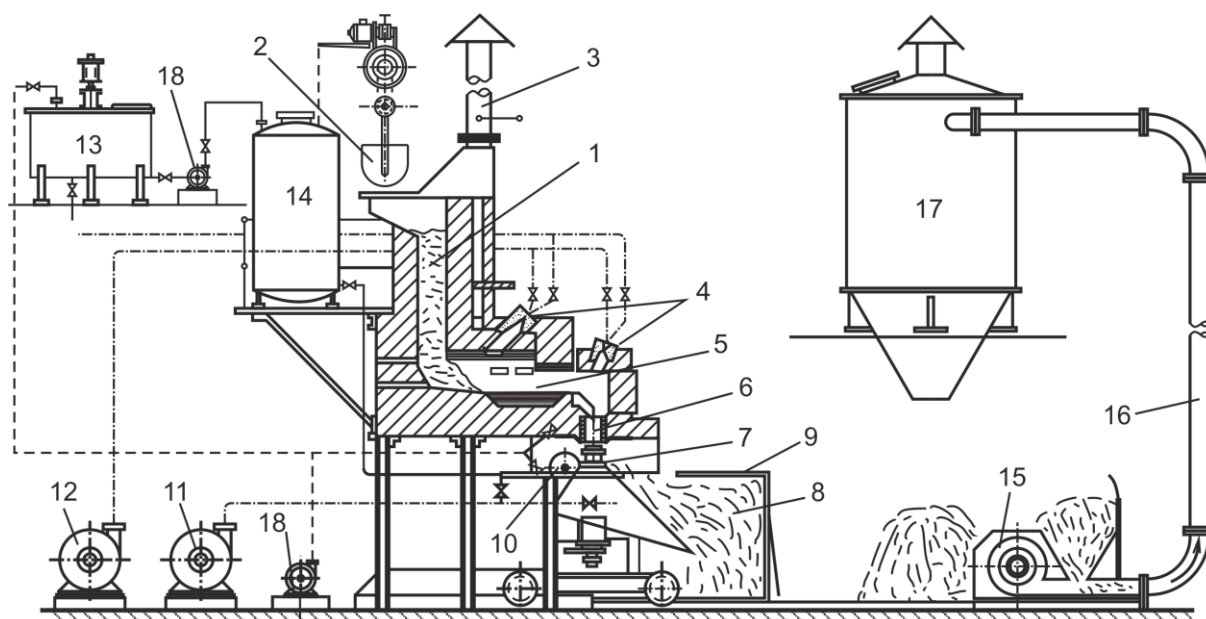
Obr. 9.50 Schéma jednostupňového tažení skleněného rajónu: 1 – tavicí agregát, 2 – nátokový kanál, 3 – píčka, 4 – navíječka, 5 – sklovina



Obr. 9.51 Podrobnější schéma jednostupňového tažení skleněného rajónu: 1 – nátokový kanál, 2 – sklovina, 3 – pec, 4 – tryska, 5 – vlákna, 6 – pevný chladič, 7 – navíjení

9.8.2 Technologie odstředivého tvarování staplu

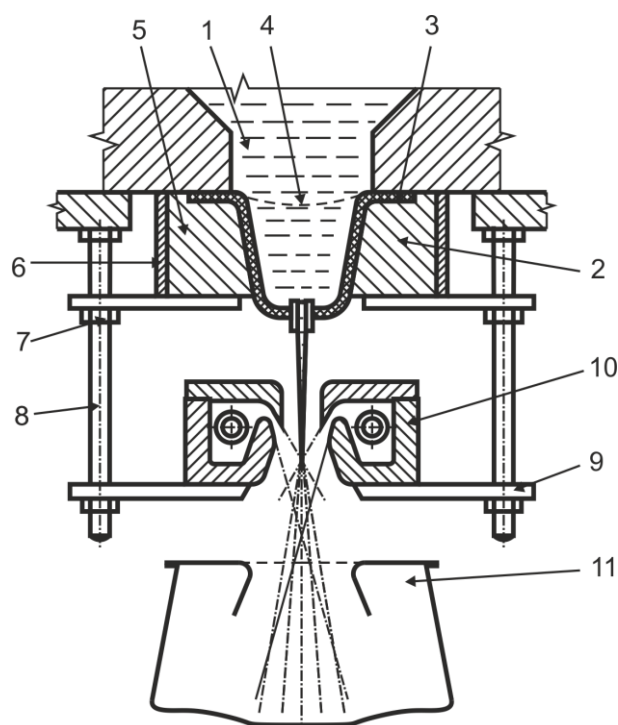
Tato technologie (Obr. 9.52) zpracovává jako surovinu drcené skleněné střeby, které se taví v šachtové peci. Utavená sklovina stéká do homogenizační jímky, z níž přetéká chlazeným přetokovým můstkem a šamotovým kuželovým otvorem vytéká na střed rotujícího rozvlákňovacího kotouče. Kotouč je keramický, je umístěn v ocelolitinové hlavě, jeho průměr je přibližně 200 mm a tloušťka 50 mm. Povrch kotouče je opatřen radiálními drážkami a otáčí se rychlostí 3000 až 5000 otáček za minutu kolem svislé osy. Sklovina se po dopadu na střed rotujícího kotouče rozstříkuje a trhá na jemná vlákna o průměru do 30 μm . Vlákna vytvářejí kolem rotující hlavy uzavřený věnec a proudícím vzduchem jsou unášena do sběrného koše, odtud se periodicky přemisťují k pneumatickému dopravníku a poté k dalšímu zpracování. Popsaným způsobem se vyrábějí i čedičová vlákna používaná stejně jako vlákna skleněná k izolačním účelům.



Obr. 9.52 Schéma linky strojního zařízení na odstředivé tvarování staplu: 1 – šachtová pec, 2 – zakladač střepů, 3 – odtahový komín, 4 – plynové hořáky tavící sklo, 5 – vyrovnávací část pece, 6 – kuželový výtokový otvor, 7 – rozvlákňovací stroj, 8 – sběrný koš, 9 – ochranný kryt, 10 – okružní pila, 11 – ofukovací ventilátor, 12 – ventilátor spalovacího vzduchu, 13 – recirkulační vodní nádrž, 14 – tlaková vodní nádrž, 15 – dopravní ventilátor, 16 – potrubí pro pneumatickou dopravu, 17 – odlučovač a zásobník, 18 – vodní čerpadlo.

9.8.3 Tažení plyným médiem

K tažení skleněných vláken se využívá energie proudícího plynu nebo vodní páry. Jako příklad je zde uvedena technologie rozfukování párou proudící vertikálním směrem. Utavená sklovina natéká do dávkovače a výtokovými otvory v hlavě dávkovače protéká do platinových píček připevněných na dno dávkovače. Tyto píčky jsou podobné jako u mechanického tažení skleněného rajónu – ve dně mají výtokové trysky. Pod každou platinovou píčkou je umístěna parní tryska a směs páry a vzduchu proudící rychlostí 400 až 700 m·s⁻¹ strhává praménky skloviny vytékající z trysek platinové píčky a vytváří nepravidelně dlouhá vlákna. Ta procházejí difuzorovým krytem a ukládají se na pásový dopravník. Výšku vrstvy ukládajících se vláken je možno regulovat rychlostí pásu. Ukládání je způsobeno silným sacím účinkem ventilátoru umístěného pod pásovým dopravníkem. V průběhu ukládání se vlákna postříkují pojivem obvykle na bázi vodného roztoku syntetických pryskyřic nebo organického původu, vrstva se přítlačným válcem stlačuje na určitou výšku, suší a vytvrzuje teplem. Uspořádání platinové píčky a parní trysky je zřejmé z Obr. 9.53. Produktem jsou rohože nebo desky pro izolační účely.



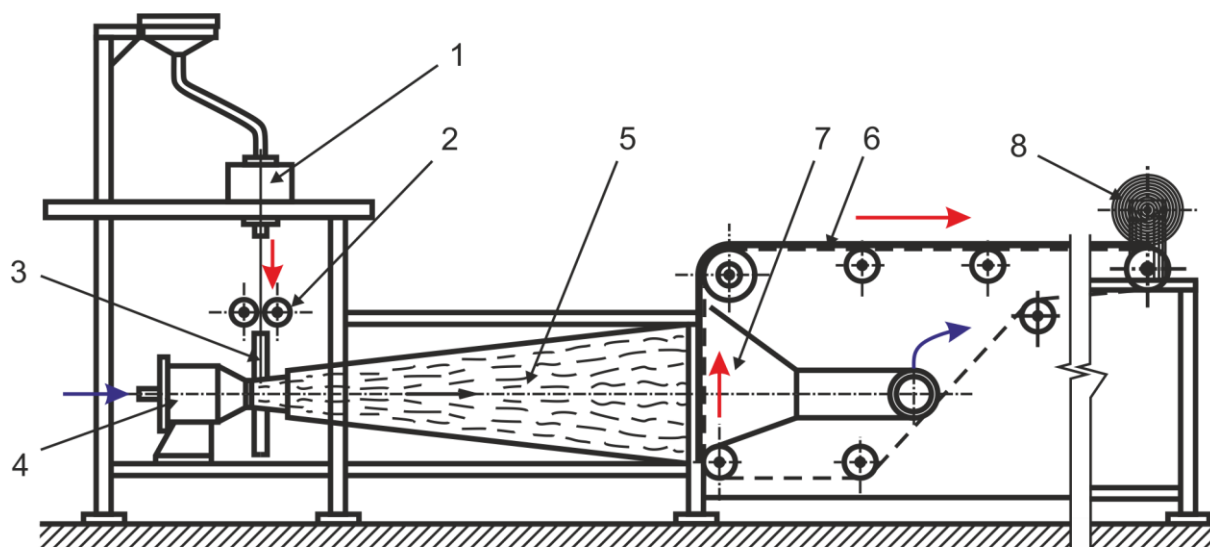
Obr. 9.53 Platinová pírka s parní tryskou: 1 – otvor v dávkovači, 2 – platinová pírka, 3 – přípojná příruba pírky, 4 – děrované víko, 5 – šamotové obložení pírky, 6 – kryt, 7 – matice k uchycení pírky, 8 – přípojovací šrouby, 9 – spodní deska parní trysky, 10 – parní tryska, 11 – difuzor

9.8.4 Kombinované způsoby

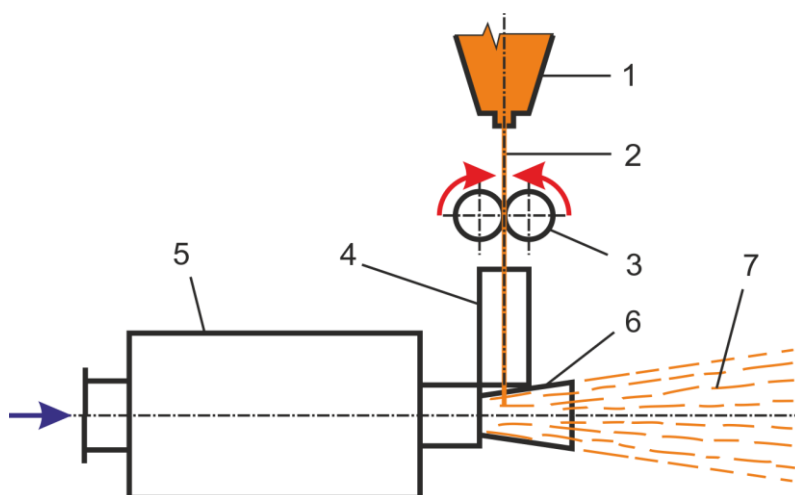
Tyto výrobní způsoby jsou založeny na mechanickém tažení primárních vláken a jejich následným rozfukováním.

9.8.4.1 Výroba vláken mechanickým tažením a rozfukem

Dvoustupňového způsobu se využívá k výrobě velmi jemného vlákna o průměru 1 až 3 μm kombinací mechanického tažení a následného rozfukování velmi horkými plyny proudícími vysokou rychlostí. Schéma výrobní linky je uvedeno na Obr. 9.54. V platinové pírce se taví sklo ze skleněných kuliček, z trysek se vytahují vlákna pomocí tažných válečků, ta postupují po vodící desce drážkami pro každé vlákno do rozfukovací komory, kde je umístěn hořák, z jehož štěrby proudí spaliny o teplotě 1 500 až 1 800 $^{\circ}\text{C}$ rychlostí 400 až 700 ms^{-1} kolmo na řadu tažených vláken. Konce vláken se natavují a rozfukují na velmi jemná vlákénka, která postupují difuzorem a působením podtlaku se ukládají na pásový dopravník. Vrstva vláken se navíjí na válec a po dosažení určité tloušťky vrstvy se pás odstřihne. Jsou vyráběny role nebo rohože izolačního vlákna. Schéma dvojího tažení je uvedeno na Obr. 9.55, rozfukovací hořák na Obr. 9.56. Výkon zařízení je 0,5 až 1,5 $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$.



Obr. 9.54 Schéma linky na výrobu velmi jemného vlákna: 1 – platinová pícka, 2 – tažné válečky, 3 – vodící deska, 4 – rozfukovací komora, 5 – difuzor, 6 – pásový pletivový dopravník, 7 – odsávání, 8 – navíjecí zařízení

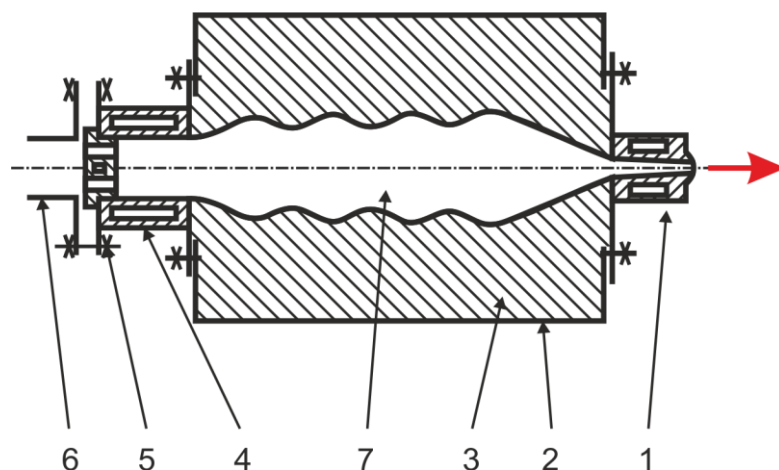


Obr. 9.55 Schéma dvojího tažení: 1 – platinová pícka, 2 – primární vlákno, 3 – tažné válečky, 4 – vodící deska, 5 – hořák, 6 – rozfukovací komora, 7 – sekundární vlákno

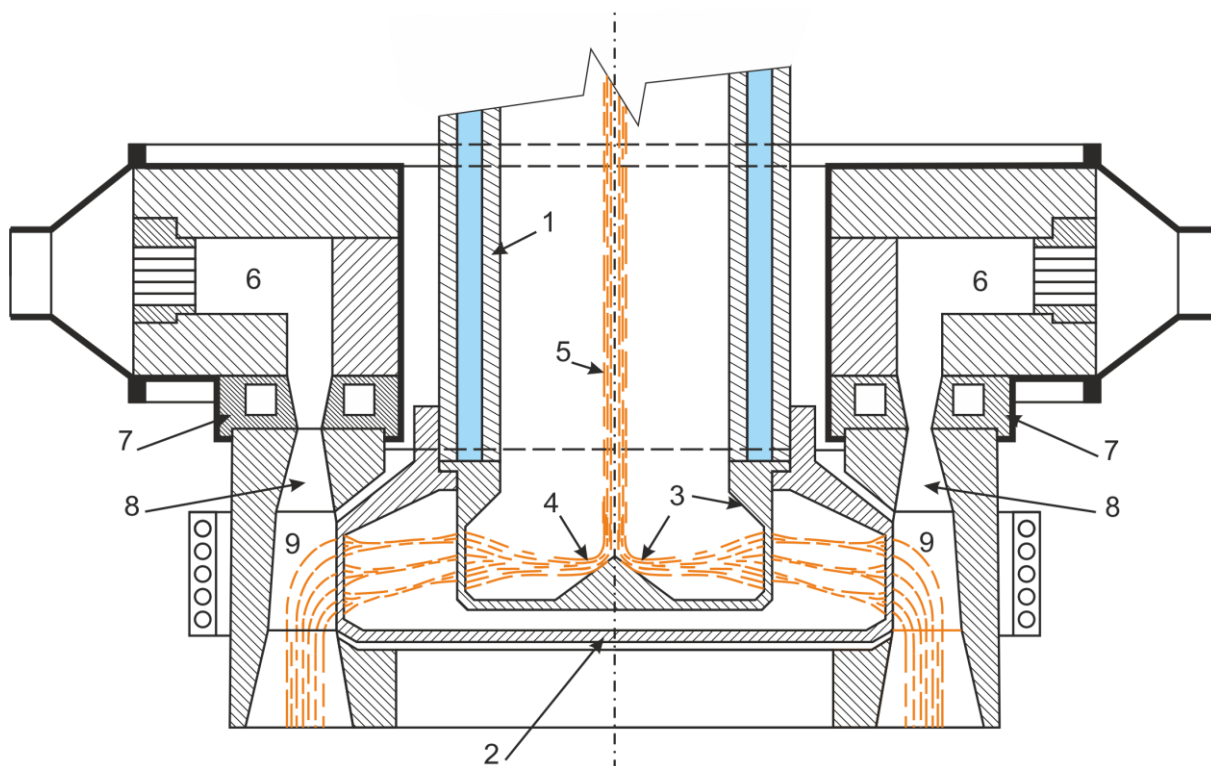
9.8.4.1 Výroba vláken rozfukem za rotace

Tímto způsobem se vyrábějí staplová skleněná vlákna pod technickým názvem Rotaflex. Utavená sklovina natéká svisle do kovové vnitřní rozdělovací rotující hlavy (rychlost rotace činí 3 000 až 5 000 ot.min⁻¹) opatřené otvory, kterými protéká tavenina působením odstředivé síly do vnější předtvarovací hlavy a z ní vystupují vlákna před ústí kruhového hořáku. Vysokou teplotou a rychlostí spalin dochází ke změně směru tvarovaných vláken na axiální a k sekundárnímu rozvlákňování, vlákna jsou unášena kyvnými difuzory a během dráhy jsou postřikována pryskyřičným pojivem. Na výstupu z difuzorů se ukládají na pásový dopravník, vytvořená vrstva prochází sušicí a vypalovací pecí a za ní dochází k navíjení pásu na navíjecí buben, při čemž je vrstva prokládána papírem. Schéma rozvlákňování

ukazuje obr. Obr. 9.57. Popsaným způsobem jsou vyráběna staplová vlákna o průměru 7 až 10 μm , výkon rozvláknovací jednotky je 8,4 tun za 24 hodin. Vyrobené rohože jsou používány pro tepelné a zvukové izolace.



Obr. 9.56 Rozfukovací hořák: 1 – kovová vodou chlazená rozfukovací tryska, 2 – plášť spalovací komory, 3 – vyzdívka, 4 – vodou chlazený mezikus, 5 – pojistná hořáková destička, 6 – přívod směsi plynu a vzduchu, 7 – spalovací komora hořáku



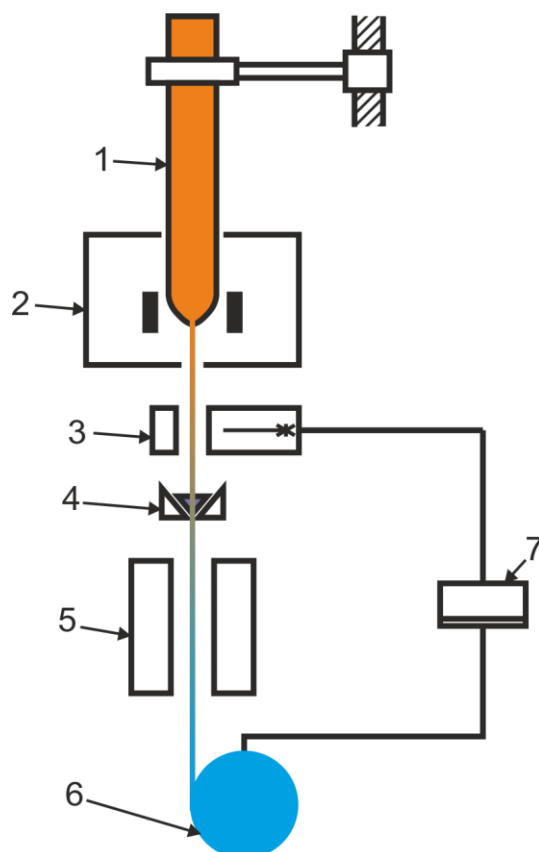
Obr. 9.57 Schéma rozvláknovací hlavy: 1 – vodou chlazená dutá hřídel, 2 – vnější předtvarovací hlava, 3 – vnitřní (rozdělovací) hlava, 4 – rozdělovací kužel, 5 – proužek skloviny, 6 – kruhová spalovací komora, 7 – vodou chlazená mezikruhová tryska, 8 – mezikruhová spalovací komora, 9 – proud spalin

9.8.5 Technologie výroby optických vláknových vlnovodů

Optické vláknové vlnovody jsou založeny na úplném odrazu světla, 3.9.1. Základem vláknového vlnovodu je skleněné vlákno tvořené dvěma vrstvami. Jádrem má větší index lomu než obvodová vrstva, na které se světelný paprsek úplně odráží a světlo se šíří po dráze dané tvarem vlákna. Optická vlákna jsou využívána v komunikacích, kde umožňují přenos na větší vzdálenosti a při vyšších přenosových rychlostech. Jsou výhodnější než kovové vodiče, protože signál je přenášen s menší ztrátou a jsou odolné vůči elektromagnetickému rušení. Mezi další výhody patří bezpečnost (optiku lze jen obtížně odposlouchávat), malé rozměry a nízká hmotnost, flexibilita, dobré mechanické vlastnosti, nízké pořizovací náklady, velký objem přenášených dat a další.

Optická vlákna se vyrábějí několika způsoby. Při výrobě standardních optických vláken jsou v první fázi připraveny preformy větších rozměrů, z nichž se tažením vytváří tenké optické vlákno. Metody jsou dvě,

- metoda dvojího kelímku (vlákno je taženo ze dvou koncentrických kelímků, v jednom je tavenina jádra, ve druhém, vnějším, je tavenina materiálu pláště – výhodou je možnost neustálého doplňování obou tavenin) a
- metoda „tyčka v tyčce“ (vlákno je taženo z tyčinky materiálu jádra zatavené v trubce z materiálu pláště, z tzv. preformy), Obr. 9.58.



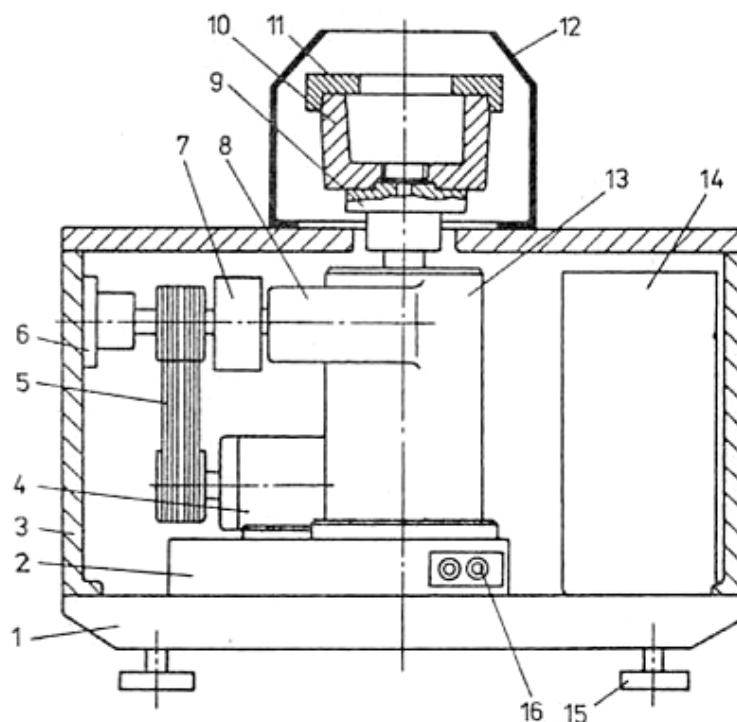
Obr. 9.58 Schéma principu tažení optického vlákna z preformy: 1 – preforma, 2 – pec, 3 – měření průměru vlákna, 4 – tryska pro nanášení ochranného polymeru, 5 – vytvrzování polymeru, 6 – navíjecí cívka, 7 – kontrolní a řídicí systém

9.9 Technologie tvarování skloviny odstředivým litím

Tvarování tlustostěnných skleněných výrobků rotačního tvaru odstředivým litím je ve srovnání s lisováním v mnoha směrech výhodnější. Tvarovaný výrobek je v kontaktu se stěnou formy pouze vnější plochou, vnitřní plocha se tvaruje pouze působením odstředivé síly a účinkem sil povrchového napětí skloviny. Rovněž tloušťka stěny výrobku je rovnoměrná a výrobek se ve formě nedeformuje. Podle orientace osy rotace rozdělujeme technologie na technologii se svislou osou rotace a technologii s vodorovnou osou rotace.

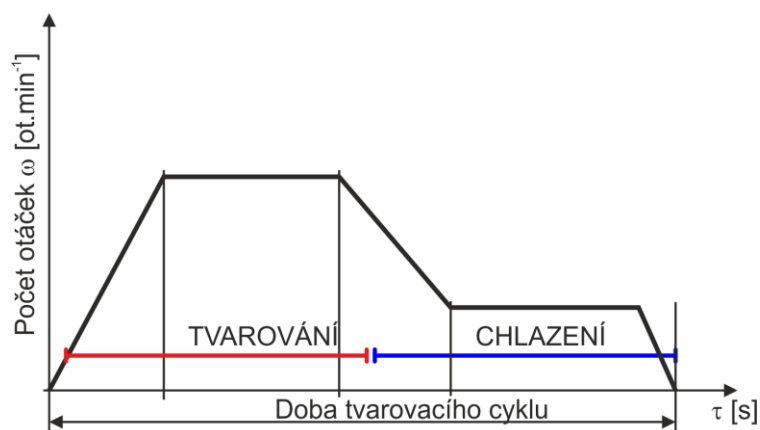
9.9.1 Odstředivé tvarování se svislou osou rotace

Princip odstředivého lití bude ukázán na příkladu jednostanického stroje (Obr. 9.59). Častěji se lze ale setkat s vícepozicovými stroji, které budou uvedeny níže.



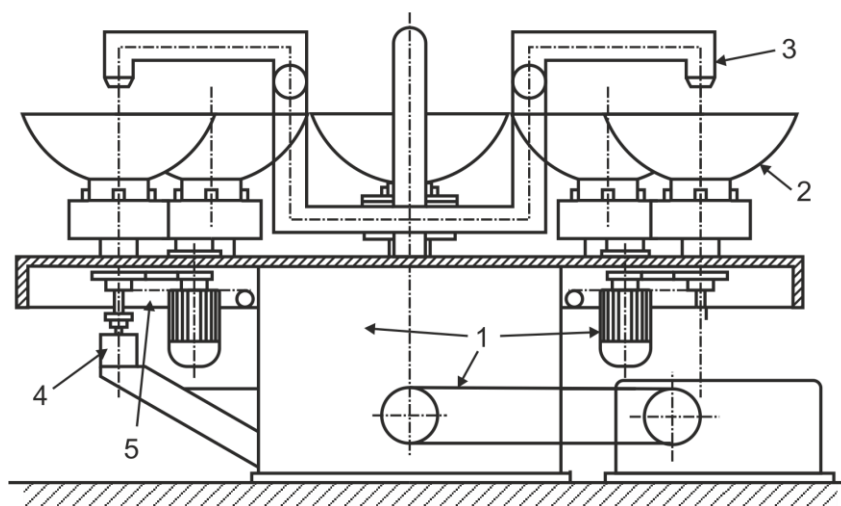
Obr. 9.59 Jednostanický stroj na odstředivé lití: 1,2,3 – součásti rámu stroje, 4 – elektromotor s regulací otáček, 5 – klínový řemen, 6 – patní ložisko, 7 – elektromagnetická spojka, 8 – pohon kuželovými koly, 9 – příruba, 10 – forma, 11 – závěrný kroužek, 12 – kryt, 13 – ložisková skříň, 14 – ovládací panel, 15 – nivelační patka, 16 – přípojka médií

Tvarovací postup spočívá v umístění dávky skloviny do formy (ručně pomocí sklářské píšťaly nebo využitím např. kulového naběrače, kap.8.2.2), uvedení formy do rotace se zvyšujícím se počtem otáček, pak následuje perioda konstantní rychlosti, dále období snižující se rychlosti rotace, ochlazování výrobku a jeho vyjmutí z formy. Tvarovací cyklus odstředivého lití je uveden na Obr. 9.60.



Obr. 9.60 Tvarovací cyklus odstředivého lití

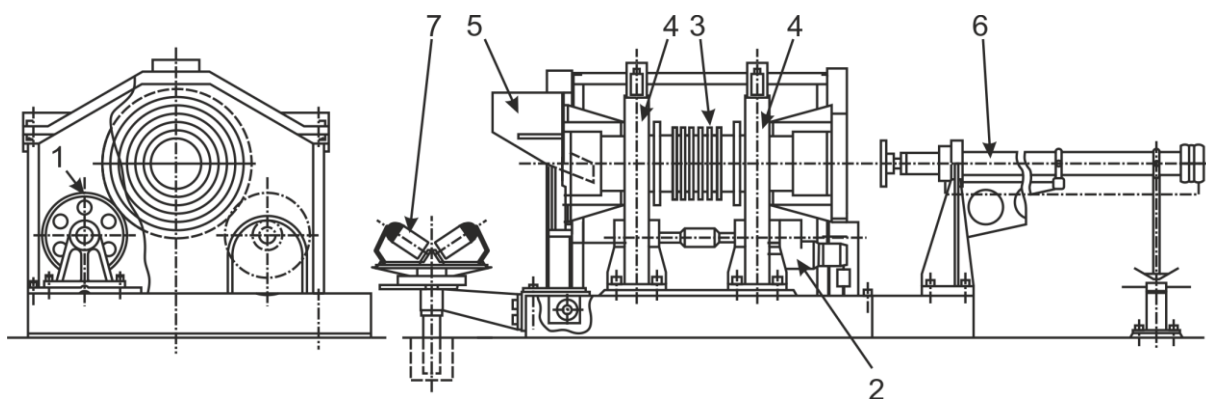
Vysoká produktivita procesu je docilována vícepozicovými stroji, na kterých se tvarují tlustostěnné výrobky do průměru zhruba 320 mm, výšky až 200 mm a max. hmotnosti 10 kg. Na obr. Obr. 9.61 je zobrazen osmipozicový stroj firmy Bowe. Současná zařízení dokážou vyrábět odstředivě i výrobky nejen kruhového, ale i elipsovitého tvaru.



Obr. 9.61 Osmipozicová odstředivka fy Bowe: 1 – rám stroje s příslušnými pohony, 2 – forma s krytem, 3 – stavitelný přívod chladicího vzduchu, 4 – vyhazovač, 5 – zdroj chladicího vzduchu

9.9.2 Odstředivé tvarování s vodorovnou osou rotace

Technologie tohoto typu jsou méně časté. Jako příklad je uvedena technologie výroby čedičové trubky velkých rozměrů (Obr. 9.62). Na mohutném rámu jsou uchyceny dva páry motorem poháněných nosných kladek, na nichž se odvaluje litinová forma. Tavenina čediče se do formy nalévá za plné rotace a tvaruje se do zpevnění tvaru ochlazením. Hotový výrobek se z formy vysune vyřázečem a přemístí do chladicí pece. Litinová forma je výměnná podle druhu vyráběných trub. Tvarovat lze trubky do délky 1 000 mm o vnitřním průměru 150 až 500 mm a tloušťce stěny 20 mm.



Obr. 9.62 Stroj na odstředivé lití čedičových trub: 1 – dva páry nosných kladek, 2 – pohon, 3 – litinová forma, 4 – nákržky, 5 – nálevka, 6 – vyrážeč hotových trub, 7 – manipulátor pro hotové výrobky

9.10 Technologie výroby zvláštních výrobků

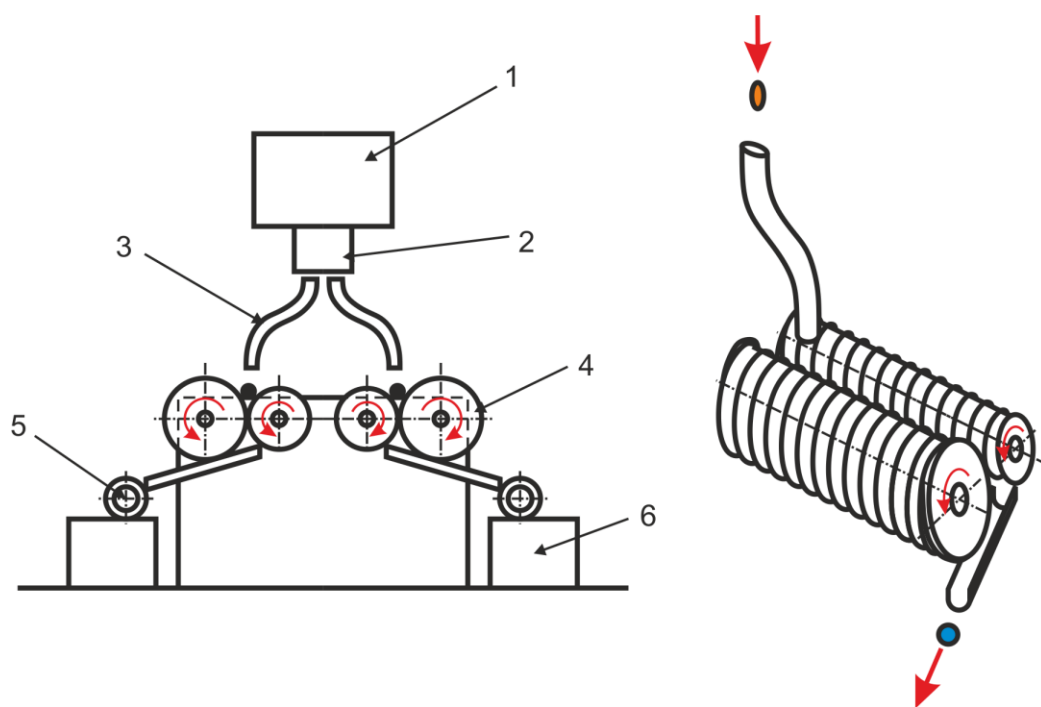
Některá strojní zařízení nemohla být pro svá specifika zařazena do předchozích kapitol, proto o nich bude pojednáno na tomto místě.

9.10.1 Výroba kuliček

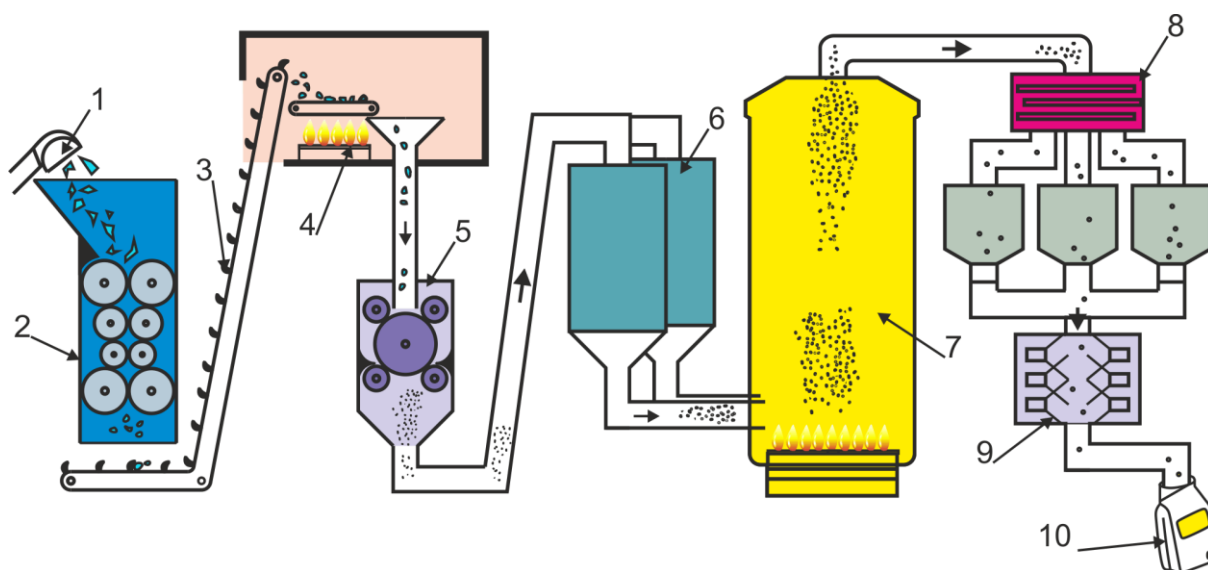
Na tomto stroji se vyrábějí skleněné kuličky o průměru přibližně 18 mm, které jsou výchozím polotovarem při dvoustupňové výrobě skleněného rajónu, kap. 9.8.1. Princip stroje je znázorněn na Obr. 9.63. Jeho hlavními součástmi jsou čtyři páry spirálovitě drážkovaných bubnů. Profil drážek je půlkruhový, vždy dva bubny jsou přisunuty těsně k sobě, takže profil drážek je kruhový. Drážkování bubnů má stejné stoupání. Bubny jednoho páru mají rozdílný průměr a stejný počet otáček (50 až 60 ot.min⁻¹). Při stejném smyslu rotace zůstává kruhový profil drážek stálý a dávka skloviny umístěná v krajní poloze bubnů při jejich rotaci postupuje na opačnou stranu. Při tom se třením o stěny drážek v důsledku rozdílné obvodové rychlosti postupně tvaruje do kuličky a vypadává jako hotový výrobek do zásobníku.

9.10.2 Výroba balotiny

Balotina je technické označení pro skleněné kuličky do průměru 1,25 mm. Jejich použití je časté např. v dopravě (vodorovné i svislé reflexní značení), dále se používají při otryskávání kovových dílů (odstranění starých nátěrů, úprava povrchu), při čištění a regeneraci forem ve slévárenství, jako plnivo do speciálních filtrů, jako mlecí médium apod. Výroba balotiny se principiálně provádí drcením skla a fluidním způsobem kulacení, při němž se drcené sklo zahřeje až k teplotě měknutí a kulacení nastává účinkem sil povrchového napětí. Konečnou operací je třídění podle velikosti. Schéma linky na výrobu balotiny je použito od fy Sovitec (Obr. 9.64).



Obr. 9.63 Princip stroje na výrobu skleněných kuliček: 1 – dávkovací žlab, 2 – dávkovač, 3 – skluz, 4 – tvarovací drážkové bubny, 5 – podávací šnek, 6 – zásobník hotových kuliček



Obr. 9.64 Schéma výrobní linky na výrobu balotiny: 1 – zavážení skleněnými střepy, 2 – drcení, 3 – odstraňování cizích tělísek, 4 – sušení, 5 – mletí, 6 – mezisklad drti, 7 – kulacení, 8 – granulometrické síťování, 9 – povrchová úprava, 10 – balení

9.10.3 Výroba pěnového skla

Pěnové sklo je porézní materiál (jedná se o uzavřené póry), který má vynikající tepelně izolační vlastnosti, jeho měrná hmotnost je kolem 150 kg.m^{-3} , má nulovou nasákavost, je nehořlavý, odolává působení bakterií a je-li výrobkem tvarovka, má i dostatečnou mechanickou pevnost. Jeho mechanické opracování je velice snadné.

Pěnové sklo se vyrábí ze speciálního hliníkokřemičitého skla nebo v levnější variantě z recyklovaného skla. Sklo je utaveno a následně rozemleto na velmi jemný prášek. Tento skleněný prach je při mletí smíchán s ještě jemnějším uhlíkovým prachem. Výsledná směs je v tenké vrstvě rozprostřena do ocelových forem. Formy jsou následně zahřáté v tunelové peci na zhruba $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tak dojde k opětovnému roztavení skleněného prášku a k současné oxidaci částic uhlíku. Tento plyn vytvoří drobné bublinky, které až dvacetinásobně zvětší původní objem roztaveného skla a vyplní celou formu. Po vypěnění je vzniklý blok pěnového skla zvolna ochlazován z $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ na $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po konečném zchlazení pěnového skla zůstává v jeho jednotlivých buňkách CO_2 v podtlaku zhruba $1/3$ atmosférického tlaku, který vzniká z důvodu zmenšení objemu ochlazovaného plynu. Po vychlazení jsou bloky pěnového skla obroušeny, zbaveny povrchové "kůrky". Bloky, které vyhoví všem kontrolám, jsou dále řezány na desky například formátu $600 \times 450 \text{ mm}$ s konstantní tloušťkou (často od 30 do 180 mm) nebo na spádované desky či jiné tvarovky. Celá výroba je plně automatizovaná.

9.10.4 Výroba sintrovaného skla

Sintrované neboli slinuté skleněné výrobky se vyrábějí lisováním skleněného prášku (lisovací hmoty, frity) do požadovaného tvaru a následným tepelným zpracováním (slinováním) dochází ke slinutí zrna prášku do kompaktní hmoty. Při slinování nedochází ještě k tavení skla, ale částice na povrchu zrn jsou již natolik pohyblivé, že na rozhraní zrn chovají jako tavenina, tzn., že jsou schopny vytvořit jednu fázi a jednotlivá zrnka tak spojit.

V důsledku této technologie používající skleněného prášku jsou výrobky jen bílé nebo v sytých barvách a nelze dosáhnout transparentního skla (v důsledku jemných – prachových bublinek vzduchu uzavřených ve hmotě).

Výrobní postup se skládá z tavení, fritování, drcení a mletí skla. Následuje příprava lisovací hmoty, barvení a homogenizace, přidání 3 až $4,5\%$ vody, která plní funkci plastifikátoru.

Následuje lisování hmoty z práškových skel. Při lisování je nejzávažnějším činitelem lisovací tlak. Během tvářecího procesu dochází k zhutnění v uspořádání částic ve výlisku a zvětšení styčného povrchu mezi částicemi. Oba efekty jsou důsledkem prolamování vzniklých můstků mezi částicemi, vyplňování prostoru mezi velkými částicemi částicemi menších rozměrů a vzájemného tvarového přizpůsobení sousedních částic. Tyto efekty vzrůstají se zvyšováním lisovacího tlaku a následně též ovlivňují průběh slinování ve vypalovacích pecích.

Slinování je ovlivněno vlastnostmi výchozího práškového skla, tvarováním polotovaru z práškového skla (hmoty) a působením teplotního režimu při slinování. Slinovací proces a jeho děje probíhají, s ohledem na funkční vztah viskozity a teploty u skel, již od počátku pozvolného ohřevu na sintrovací teplotu. Od určité teploty dochází ke smršťování výlisků

(T_{Dst} – *dolní sintrovací teplota*), které skončí při určitých teplotách za vzniku opakního skla a dosažením konečného lineárního mrštění (T_{Hst} – *horní sintrovací teplota*). Nad touto teplotou se v určité oblasti teplot lineární smrštění měřitelně nemění (tzv. „prodleva slinutí“) až do bodu T_{def} – *teploty počínající deformace* výlisku. Průběh slinování různých skel je obecně identický a tudíž na základě teplotní závislosti viskozity lze snadno určit teplotu slinování použitého výchozího skla. Technologické parametry, jako je granulometrie práškového skla, lisovací tlak, rychlost ohřevu a další, musí být přísně dodržovány, má-li být docíleno dobré reprodukovatelnosti výsledků celého procesu.

Při použití úzké distribuce velikosti skleněných částic, nižších lisovacích tlaků a nižších teplot při sintrování jsou reprodukovatelně vyráběny skleněné filtry pro laboratorní i průmyslové využití (filtrace kapalin a plynů). Pro tyto účely se využívá hlavně chemicky odolné boritokřemičité sklo (například Simax).

9.11 Sklářské formy

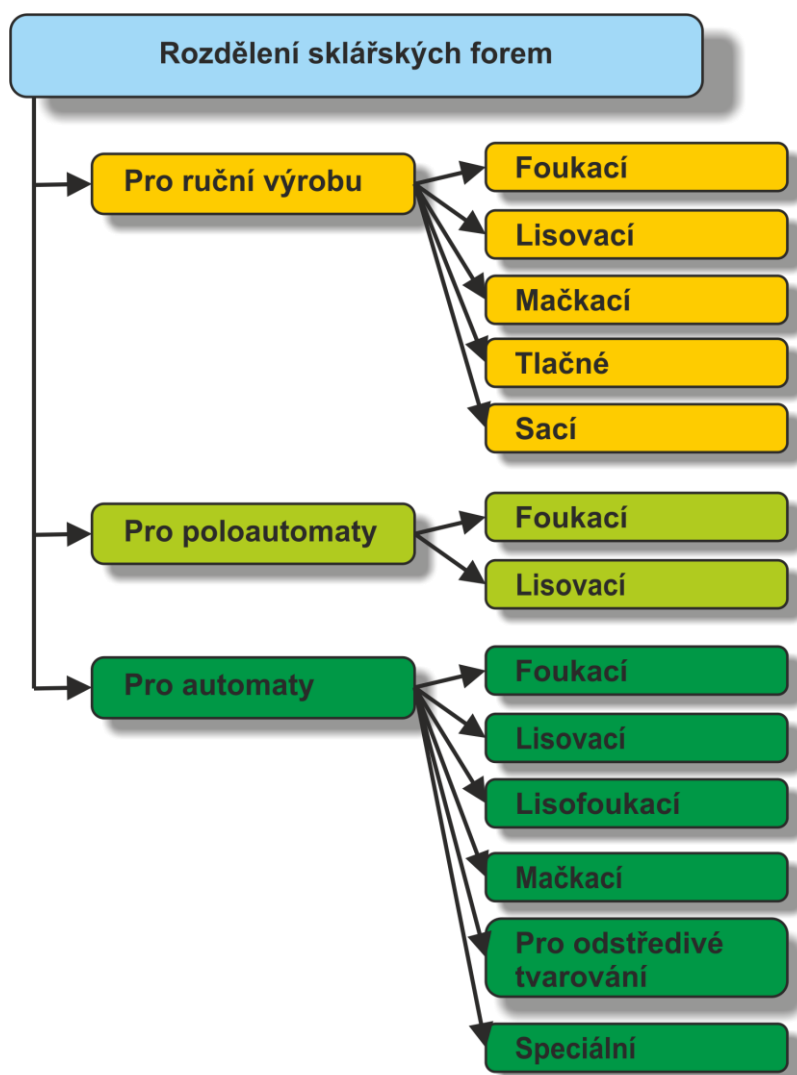
Materiál a povrchové vlastnosti formy mají významný vliv na kvalitu konečného výrobku u technologií, které využívají k tvarování přímého styku skloviny s formou. Rozhodující je provedení a materiál. Ve sklářství se používá na výrobu forem kovů a dřeva, ale lze se setkat i s grafitem a keramikou. Povrchy sklářských forem mohou být upraveny chemicky, tepelně, opatřeny kovovým nebo organickým povlakem, či speciálními plasty. Obecné rozdělení sklářských forem podle výroby je uvedeno na Obr. 9.65. Specifickým případem je užití cínové lázně pro tvarování plochého skla technologií FLOAT, kde hladina roztaveného cínu vlastně nahrazuje formu. Další technologie využívají k tvarování vlivu povrchového napětí a dalších vlastností.

Při tvarování je nutno odvést tolik tepla, aby se výrobek při další manipulaci nedeformoval. Odvede-li se tepla méně, výrobek se po vyjmutí z formy bortí a vzniká vadný výrobek (kap. 9.2). Při delších dobách chlazení naopak dochází k nadměrnému odvodu tepla, zbytečně se prodlevami snižuje výkon a může vzniknout vadný výrobek jiného druhu.

Požadavky na sklářské formy z hlediska tvarovacího procesu jsou:

- rychlé a přesné vytvoření požadovaného tvaru skleněného výrobku a dosažení dobré jakosti povrchu skleněného výrobku,
- rychlé ochlazení tvarované skloviny, aby se skleněný výrobek vyjmutím z formy při následné manipulaci nedeformoval,
- vysoká životnost,
- nízké výrobní náklady.

Sklářská forma je na vnitřním povrchu (razník na vnějším) periodicky ohřívána žhavou sklovinou a v zápětí po vyjmutí skleněného výrobku chlazena. Podle druhu skloviny a technologie tvarování se její povrch na styku se žhavou sklovinou ohřívá na 300 až 720 °C a teplota kolísá v průběhu tvarovacího cyklu asi o 60 až 150 °C, přičemž gradient teploty na jejím povrchu bývá 1 až 10 K.mm⁻¹ (°C.mm⁻¹). S větším tepelným namáháním se snižuje životnost formy.



Obr. 9.65 Rozdělení sklářských forem podle sklářské výroby

Požadavky na materiál sklářské formy jsou:

- velká tepelná vodivost,
- velká tepelná akumulační schopnost,
- malá teplotní roztažnost - velká objemová stálost,
- vysoká odolnost proti účinkům roztavené skloviny a oxidaci za vyšších teplot,
- dobrá odolnost proti teplotním rázům,
- dobrá obrobiteľnosť a lešiteľnosť,
- vysoká odolnosť proti opotrebení (především otěruvzdornost),
- levnost a dostupnost.

9.11.1 Používané materiály

V praxi je materiál forem zpravidla určen skleněným výrobkem, technologií výroby a provozními zvyklostmi. V historii nejčastěji používaným materiálem bylo dřevo. Dnes se používá především kovů, dřevo je často používáno na různé přípravky a při ruční výrobě užitkového, dekorativního a uměleckého skla.

Nejpoužívanějším materiálem ve sklářství je obecně **grafitická litina s lupínkovým grafitem** (šedá litina) pro své vlastnosti, jako je vysoká tepelná vodivost, snadná obrobitelnost, operativní výroba a možnost získat poměrně jednoduše kvalitní odlitky za relativně nízkou cenu. Odolnost vůči povrchové oxidaci je většinou vyhovující. Nevýhodou je nižší strukturní stabilita, malá leštitelnost, téměř nulová tažnost a mnohdy nevyhovující odolnost proti opotřebení.

Tam, kde je třeba vyšší životnosti, vyšší kvality povrchu formy (tedy i vyšší kvality výrobku) a lepší odolnosti proti účinkům roztavené skloviny a oxidaci za vyšších teplot, používá se litin legovaných nebo slitinových ocelí, neželezných kovů a jejich slitin, případně slinutých karbidů. Často se provádějí speciální úpravy povrchů forem, které přicházejí do styku se sklovinou, také se lze setkat s tzv. plátováním výbuchem.

Oceli uhlíkové (používá se cementační ocel 12 020 -VAR a nástrojová ocel 19 191 - EZH) mají dobrou obrobitelnost běžnými řeznými nástroji, formy z nich ale vykazují nižší životnost. Tvářitelnost je dobrá u nástrojových ocelí jen za vysokých teplot (ocel 19 191 v intervalu 800 – 1000 °C), s teplotou nad 400 °C klesá jejich tvrdost.

Oceli slitinové - nástrojová ocel 19 436 (Poldi 2002) je při výrobě forem obtížně obrobitelná, oproti uhlíkovým ocelím však vykazuje o 50 % vyšší životnost. Cementační ocel 14 220 je dobře obrobitelná a tvárná, její tvrdost nad 400 °C neklesá tak dramaticky. Používá se na výrobu ručních i strojních forem. (Cementování je sycení povrchu oceli uhlíkem a následné zakalení. Používají se tři způsoby cementování: v prášku, v solných lázních a v plynech.)

Nitridační ocel – 14 340 se používá převážně na výrobu rotačních forem. Tato ocel je značně závislá na dobře provedené nitridaci. (Nitridace je sycení povrchu dusíkem za účelem vzniku vrstvy nitridů.) Výhodou nitridační vrstvy je vysoká tvrdost, která při pracovní teplotě téměř neklesá.

Austenitická ocel – 17 255 (AKC) má dobrou odolnost proti korozi a životnost, ale je špatně obrobitelná a má špatnou tepelnou vodivost. Tato ocel obsahuje 20 % niklu a 22 % chrómu.

Nikl bývá v bižuterní výrobě často užívaným materiálem, neboť skleněné výlisky mají vysokou kvalitu povrchu. Nevýhodou je především cena.

Hliníkový bronz má 9 až 11 % hliníku. Oproti jiným materiálům používaných na sklářské formy má s rostoucí teplotou zvyšující se tepelnou vodivost a tepelnou akumulaci schopnost.

Slinuté karbidy – mají velice dobrou otěruvzdornost, která je nejdůležitější vlastností ovlivňující životnost forem. Formy z tohoto materiálu jsou relativně drahé, mají ale dobrou

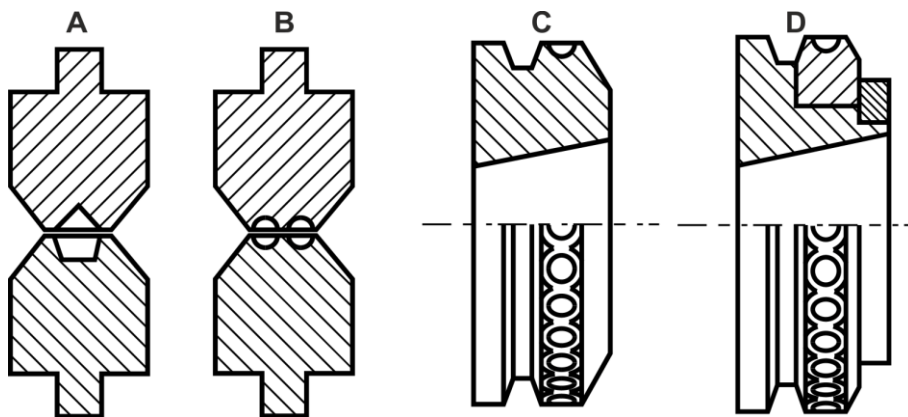
životnost, a tak se uplatňují u forem pro velké série a na vysoce produktivních strojích (např. rotační mačkadla). Materiálem užívaným v bižuterní výrobě je slinutý karbid wolframu (G3), který obsahuje 85 % karbidu wolframu a 15 % kobaltu jako pojiva. Sklářské jehly jsou vyráběné z cementované uhlíkové oceli anebo wolframu.

V případě sklářských forem na užitkové sklo (kap.9.5), kdy výrobky jsou vyráběny za mírné rotace skleněného výrobku nebo formy, je nutné zajistit nízké tření mezi formou a tvarovanou sklovinou. V tomto případě jsou formy opatřovány povrchovými vrstvami, které toto zajistí. Formy jsou před tvarováním intenzivně vlhčeny, povrchová vrstva zajistí rovnoměrné a intenzivní odpaření vody, čímž vznikne tzv. parní polštář, který vlivem nízkého tření umožní, aby se uplatnilo na povrchu povrchové napětí. Nejčastěji se jedná o lepení korkových pilin na povrch. Ty po kontaktu se sklovinou shoří, ale produkty spalování zůstanou na povrchu forem (tzv. "kůra"). Povrch může být také opatřen vrstvou grafitu. Je možné se také setkat se speciálními plasty, které odolávají vysokým teplotám. Výsledkem jsou výrobky bez stopy po dělicí rovině dvojdílných forem.

9.11.2 Konstrukce forem

Ve sklářské výrobě se lze setkat s mnoha typy forem různého konstrukčního provedení. V zásadě je lze rozdělit podle počtu současně tvarovaných výrobků na jednonásobné a vícenásobné. Vícenásobné formy jsou používány často v bižuterní výrobě (Obr. 9.66) a při výrobě obalového skla (formy jsou až čtyřnásobné).

Formy mohou být řešeny konstrukčně jako jeden kus nebo častěji dělené na dvě a více částí tak, aby bylo možné z formy vyjmout výrobek bez poškození a nedošlo k poškození samotné formy. Formy lze také dělit podle způsobu chlazení, kap. 9.11.4.



Obr. 9.66 Ukázky forem: A – jednonásobná forma, B – vícenásobná forma pro výrobu komponent skleněné bižuterie, C – ocelová forma na rotační mačkadlo, D – forma s kroužkem ze slinutého karbidu na rotační mačkadlo

9.11.3 Výroba forem

Výroba forem je dnes prováděna většinou na CNC automatech třískovým obráběním. Povrch forem může být obráběn broušením diamantovými nástroji a leštěním. Lze se setkat také s výrobou forem tvářením za studena, kdy se do vyleštěného povrchu připraveného kovového materiálu vtlačuje lisovací jádro z tvrdého kovu, odpovídající budoucímu tvaru

skleněného výrobku (bižuterní formy). Další technologií pro výrobu forem je elektroerozivní obrábění, které je založeno na vytváření opakovaných elektrických výbojů mezi nástrojem – elektrodou (často vyrobenou z mědi) a obrobkem, zapojeným jako druhá elektroda. Elektrické výboje vytavují z obrobku drobné částičky, odplavované dielektrikem. Tak se vytváří stopa, která je dána tvarem elektrody.

Ve výrobě bižuterních komponent ze skla se používá také plátování niklu výbuchem, což je nanášení vrstvy niklu na základ formy tvořené nízkouhlíkatou ocelí. Pracovní části formy (povrch forem, které přijdou do styku se sklovinou) jsou pak niklové a tělo formy je z původní levnější nízkouhlíkaté oceli. Ocelové formy bývají občas pokovovány niklem. Samotné kaplíky s pracovní částí mohou být vyrobeny ze slinutého karbidu, připájeného tvrdou mosaznou pájkou k tělu ocelové formy.

Další možností povrchové úpravy forem je galvanické chromování, difúzní chromování, boridování a další.

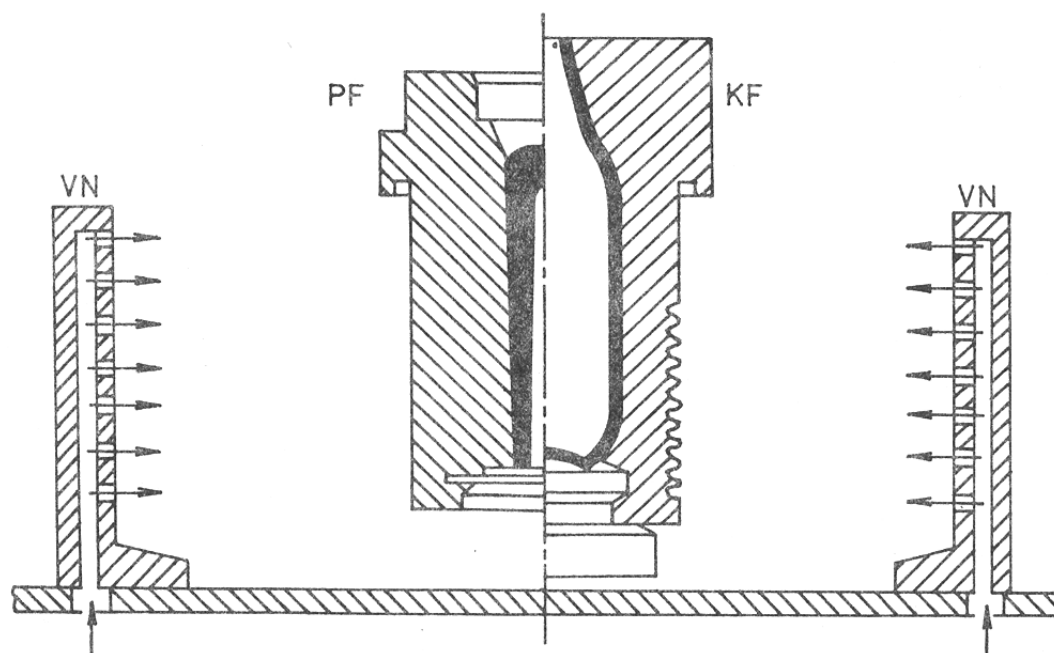
Pro dosažení co největšího počtu výrobků z formy a dostatečně dlouhé životnosti je prováděna pravidelná údržba. Čištění forem během provozního užívání se realizuje zpravidla ručně za pomoci nejjemnějšího brusiva jen v nejnútnejší míře, neboť formu celkově znehodnocuje (kvalitu povrchu a rozměry). Je možné používat pouze leštících přípravků s co nejnižším abrazivním působením a dbát na to, aby se tyto prostředky nezneškodnocovaly střípky skla a prachu z okolního prostředí. Na životnost formy mají vliv:

- výše pracovní teploty,
- četnost teplotních rázů,
- gradient teplot,
- stupeň přesnosti (rozměrové tolerance) výlisku,
- výše požadavku na kvalitu povrchu,
- seřízení formy,
- čištění a údržba forem,
- prostředí skladování,
- manipulace s formami atd.

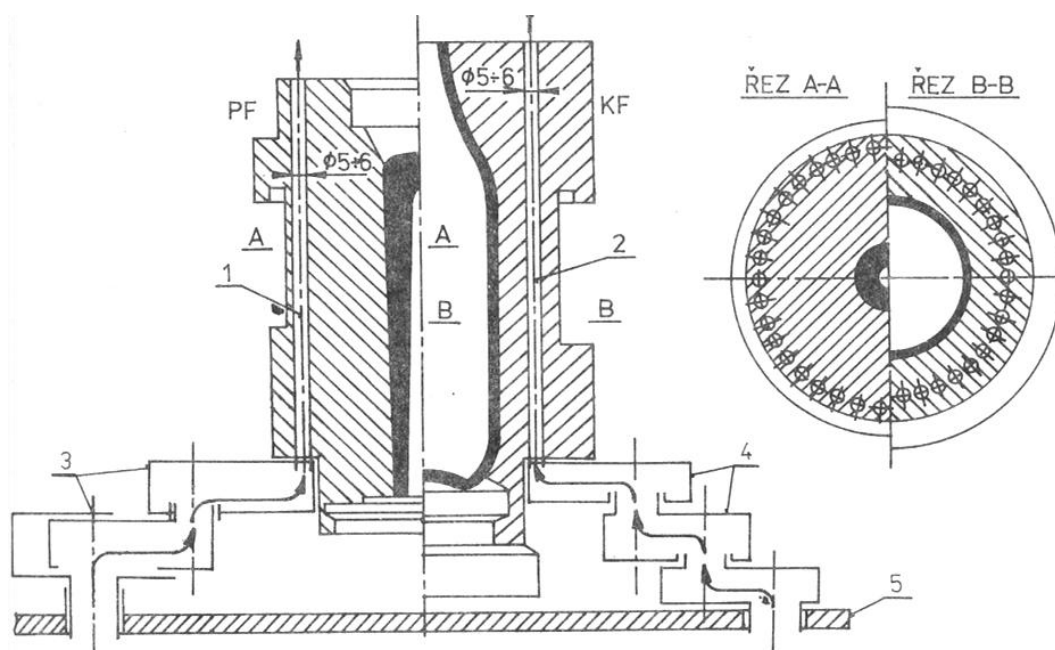
9.11.4 Způsoby chlazení sklářských forem

Chlazení sklářských forem se provádí při strojním tvarování skla proudícím vzduchem, vodou nebo vodním sprejem. Vodou jsou chlazeny například razníky, vzduchem jsou chlazeny především samotné formy.

Formy dále mohou být chlazeny radiálně nebo axiálně. Radiální chlazení je založeno na ofukování boků formy vzduchem (kolmo na osu formy), formy jsou opatřeny profilováním, příklad je uveden na Obr. 9.67. Axiální chlazení je založeno na systému axiálních otvorů (ve směru osy formy) ve sklářské formě, kterými prochází chladicí vzduch, Obr. 9.68.



Obr. 9.67 Schéma radiálního chlazení forem s „chladicími komínky“: PF – přední forma, KF – konečná forma, VN – vzduchové nástavce



Obr. 9.68 Schéma axiálního chlazení s přívody firmy Heye: PF – přední forma, KF – konečná forma, 1 a 2 – soustava chladicích otvorů (vývrtů) v PF a KF, 3 a 4 – pohyblivý přívod chladicího vzduchu v PF a KF, 5 – rám sekčního stroje

10 Chlazení skla

Jedním z činitelů významně ovlivňujících použitelnost skleněných výrobků je jejich mechanická pevnost. Tato pevnost je mimo jiné i funkcí vnitřního napětí (kap. 3.7), které může ve výrobku vzniknout nedokonalým vychlazením. Při tvarování dochází stykem vnějšího povrchu výrobku s okolním prostředím (vzduchem, formou) vlivem špatné tepelné vodivosti skla ke vzniku teplotního gradientu mezi povrchem výrobku a jeho vnitřními vrstvami. Tento teplotní gradient má za následek vytvoření napětí mezi různě teplými vrstvami skla. Pokud je viskozita nízká, vyrovnává se toto napětí viskózním tokem. Není-li v důsledku vysoké viskozity viskózní tok možný (při nižších teplotách), zůstává toto napětí ve výrobku i po jeho ochlazení, napětí je nazýváno trvalým. Aby velikost zbytkového napětí ve skle byla minimalizována, podrobují se skleněné výrobky řízenému ochlazování, které se provádí v chladicích pecích. Základem je chladicí postup, který je stanoven na základě nejméně příznivých vlastností výrobku, což bývá nejčastěji nejširší tloušťka.

10.1 Chladicí postup

Chladicí proces je technologie tepelného zpracování výrobků, jehož účelem je dosáhnout toho, aby trvalé napětí (kap. 3.7.2) ve výrobcích nepřesahovalo určitou předepsanou velikost, která již není nebezpečná z hlediska praskání výrobků. Princip chlazení výrobku je založen na vyhřátí výrobku na teplotu v chladicí oblasti (mezi dolní a horní chladicí teplotou) a výdrži na této teplotě, aby se teplota uvnitř výrobku vyrovnala (ve výrobku pak není teplotní gradient a viskózní tok vyrovná napětí vzniklé při tvarování). Po té nastává v chladicí peci řízené, relativně pomalé ochlazování na teplotu pod dolní chladicí teplotou, kdy už neprobíhá viskózní tok. Pak je možné výrobek ochlazovat již rychleji, avšak s ohledem na únosnou míru přechodného napětí (kap. 3.7.1).

Chladicí postup skleněného výrobku lze ve většině případů rozdělit do čtyř úseků, Obr. 10.1:

- A. Vyhřívání na chladicí teplotu.
- B. Výdrž na chladicí teplotě.
- C. Ochlazování v chladicí oblasti.
- D. Dochlazování na teplotu 20 až 50 °C.

Základem pro výpočet rychlosti ochlazování v jednotlivých úsecích chladicího procesu je rychlost ochlazování v chladicí oblasti značená h_1 [$\text{K} \cdot \text{min}^{-1}$] a je vypočtena ze vztahu

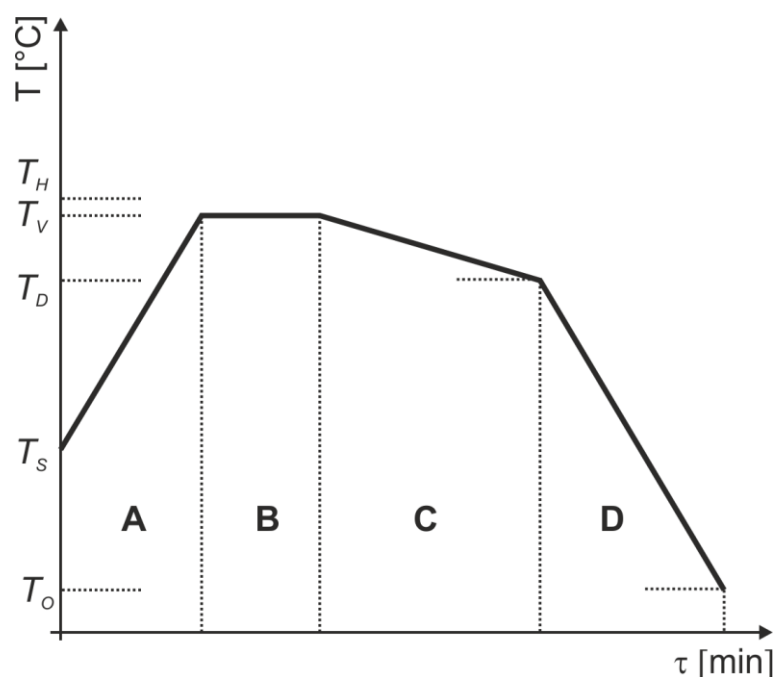
$$h_1 = \frac{X}{C \cdot a^2 \cdot \xi(x)}, \quad (10.1)$$

kde X je přípustný měrný dráhový rozdíl [$\text{nm} \cdot \text{cm}^{-1}$],

a - směrodatný rozměr výrobku [cm],

$\xi(x)$ - bezrozměrná funkce, vyjadřující vliv tvaru a velikosti výrobku a obsahující přepočty z výsledné rychlosti h_1 v $\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ na $\text{K} \cdot \text{min}^{-1}$,

C - chladicí modul skloviny [$\text{nm} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$].



Obr. 10.1 Obecné schéma chladicího postupu: T_H – horní chladicí teplota, T_V – teplota výdrže, T_D – dolní chladicí teplota, T_S – vstupní teplota výrobku, T_O – výstupní teplota výrobku, A – vyhřátí na chladicí teplotu, B – výdrž na chladicí teplotě, C – řízené ochlazování (chladicí oblast), D – rychlejší ochlazování na teplotu okolí

U většiny výrobků se volí maximálně přípustný měrný dráhový rozdíl $100 \text{ nm} \cdot \text{cm}^{-1}$. Výpočet se provádí obvykle s rezervou pro $X=50 \text{ nm} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Chladicí modul C se určuje experimentálně. Pokud není znám, používá se střední hodnota $C=3100 \text{ nm} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$.

Směrodatný rozměr charakterizuje tvar výrobku. Např. u oboustranně ochlazované desky tloušťky t_L je

$$a = \frac{1}{2} t_L, \quad (10.2)$$

u desky ochlazované z jedné strany

$$a = t_L. \quad (10.3)$$

Hodnoty tvarové funkce $\xi(x)$ jsou pro základní geometrické tvary tabelovány, Tab.10.1.

Protože při výpočtu rychlosti ochlazování h_1 uvažujeme vždy maximální napětí vznikající v ochlazovaných předmětech, dosazuje se z Tab. 2.1 vždy hodnoty $\xi(x)$ pro povrch předmětů. Hodnoty $\xi(x)$ pro jiné tvary a pro dutá tělesa jsou uvedeny v odborné literatuře. U výrobků se složitějším tvarem je nutné tento parametr zjistit experimentálně.

Tab.10.1 Hodnoty tvarové funkce $\xi(x)$ pro plná tělesa

Tělesa plná	Uvažované místo v tělese	Hodnota funkce $\xi(x)$
Oboustranně ochlazovaná deska	povrch	0,0056
	střed	0,0028
Jednostranně ochlazovaná deska	chladnější povrch	0,0056
	teplejší povrch	0,0028
Válec	povrch - axiální napětí	0,0021
	povrch – tangenciální napětí	0,0021
	povrch – radiální napětí	0
	střed – axiální napětí	0,0021
	střed – tangenciální napětí	0,0010
	střed – radiální napětí	0,0010
Koule	povrch – tangenciální napětí	0,0011
	povrch – radiální napětí	0
	střed – tangenciální napětí	0,0011
	střed – radiální napětí	0,0011

V následujícím textu jsou popsány jednotlivé úseky chladicího postupu.

A. Vyhřívání na chladicí teplotu

V průběhu tvarování a přesunu do chladicí pece výrobek zpravidla zchladne, a to v různých místech odlišně. Rozdílnou teplotu mohou mít i jednotlivé výrobky (např. láhve tvarované na vícesekčních řadových strojích). Proto je nutné výrobek vyhřát. Rychlost vyhřívání na chladicí teplotu se označuje h_2 [$\text{K} \cdot \text{min}^{-1}$]. Má být co nejvyšší, zpravidla se určuje z rychlosti ochlazování v chladicí oblasti h_1 pomocí vztahu:

$$h_2 = 3h_1 \text{ až } 5h_1, \quad (10.4)$$

Tedy rychlost h_2 může být zvolena mezi trojnásobkem až pětinasobkem rychlosti ochlazování h_1 .

B. Výdrž na chladicí teplotě

Tato prodleva je nutná k vyrovnání teplotních gradientů ve stěně výrobku a k odstranění vnitřního napětí viskózním tokem. Výše chladicí teploty se volí obvykle v rozmezí 0 až 10 °C pod horní chladicí teplotou (odpovídá viskozitě $\eta = 10^{12} \text{ Pa} \cdot \text{s}$). V případě, že není známa, zvolí se chladicí teplota v rozmezí 0 až 10 °C pod dilatometrickou transformační teplotou (viskozita $\eta = 10^{12,1} \text{ Pa} \cdot \text{s}$). U běžných typů skleněných výrobků se volí doba výdrže na chladicí teplotě v rozmezí 5 až 20 minut.

C. Ochlazování v chladicí oblasti

Při ochlazování v chladicí oblasti vzniká ve skle teplotní gradient, který po vyrovnání teplot v chladném výrobku vyvolá trvalé napětí. Během ochlazování v chladicí oblasti nesmí proto dojít k vytvoření většího teplotního gradientu, než odpovídá maximálně přípustné hodnotě trvalého (zbytkového) napětí. Je proto volena rychlost h_1 . Dolní hranice chladicí oblasti se volí podle typu pece 30 až 75 °C (moderní pece s vířivou atmosférou) nebo 100 až 150 °C (pece se stacionární atmosférou) pod teplotou výdrže.

D. Dochlazování na teplotu 20 až 50 °C

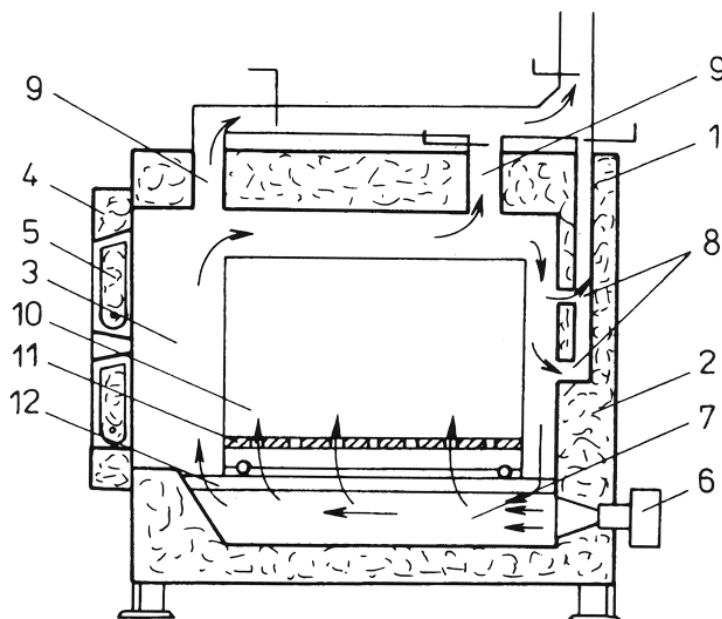
Rychlost dochlazování se volí stejná jako při vyhřívání na chladicí teplotu (t_2).

10.2 Chladicí pece

Chladicí proces probíhá v chladicích pecích, které jsou konstruovány buď jako komorové nebo tunelové. Další rozdělení může být podle otopu na plynové, elektrické a kombinované. Často je také zmiňováno rozdělení podle konstrukce na pece se stacionární a s oběžnou atmosférou.

10.2.1 Komorové chladicí pece

Komorové chladicí pece patří k nejstarším, přesto je jejich využívání, zejména při ruční výrobě, stále dosti časté. Pracují periodicky, jsou to tepelně izolované komory vytápěné plynem nebo elektrickými topnými tělesy. Pracovní cyklus, nejčastěji čtyřicetihodinový, představuje naplnění pece výrobky, proběhnutí celého chladicího postupu a vyprázdnění pece. Jejich provoz není z ekonomického pohledu hospodárný, nevýhody jsou eliminovány novými tepelně izolačními materiály (minerální vlákna). Schéma komorové chladicí pece vytápěné plynem je uvedeno na Obr. 10.2.



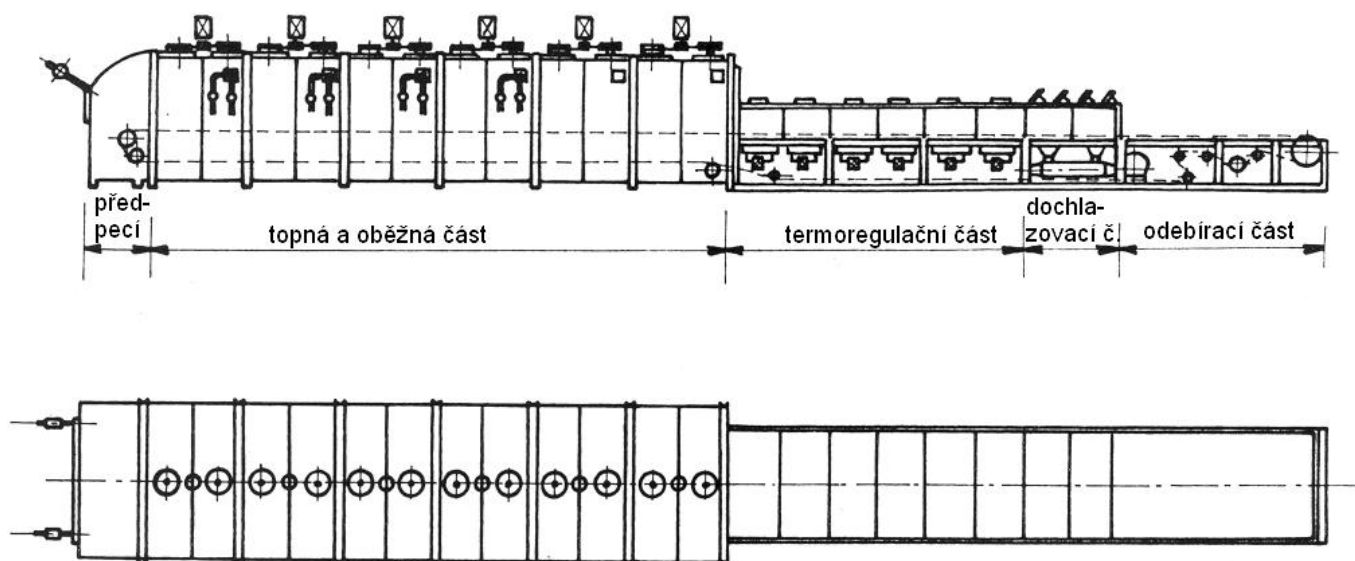
Obr. 10.2 Schéma komorové chladicí pece vytápěné plynem: 1 – kovový plášť, 2 – tepelná izolace z anorganických vláken, 3 – zakládací otvor, 4 – dveře zakládacího otvoru, 5 – výklopná zakládací dvířka, 6 – krátkoplamenný hořák, 7 – spalovací prostor; 8 – odtažové otvory spalín v zadní stěně, 9 – odtažové otvory spalín ve stropě, 10 – kovová paleta, 11 – děrované dno palet, 12 – ocelové nosníky

10.2.2 Tunelové chladicí pece

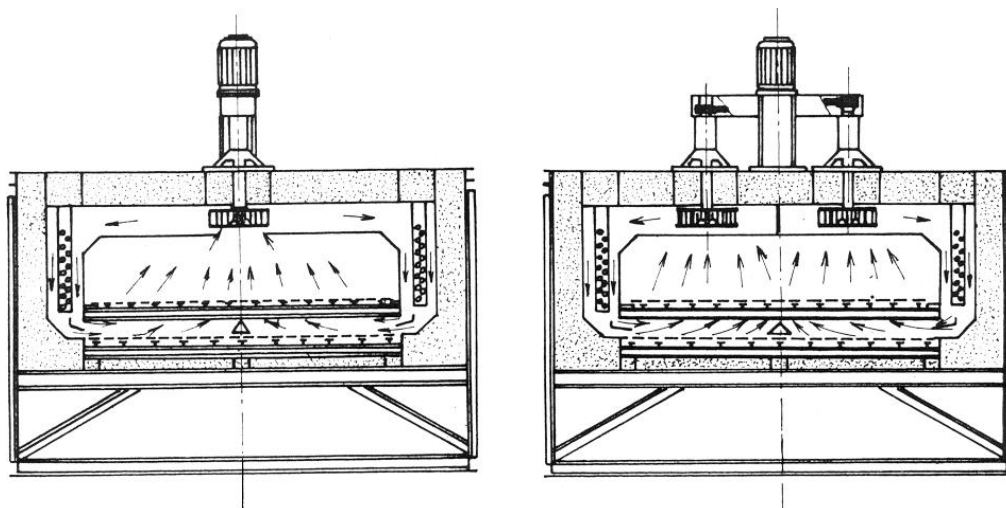
Tyto chladicí pece pracují nepřetržitě a jsou využívány především u velkokapacitních výrobních technologií. Jsou konstruovány buď jako pece válečkové (pro chlazení plochého

skla a trubic) nebo jako pece pásové pro chlazení kusového skla (užitkové a obalové sklo), u nichž je transportním elementem pás z drátěného pletiva. Pece jsou většinou sestaveny z topné zóny, chladicí zóny, dochlazovací zóny a pohonné jednotky. Tunelové chladicí pece jsou vytápěny buď plynem nebo elektricky. Pece plynové byly řešeny buď pro přímý styk výrobků se spaliny nebo častěji jako pece muflové, u kterých je přímo vytápěn prostor muflí a teplo je výrobkům předáváno nepřímo přes přepážky oddělující chladicí prostor od prostoru mufle.

V současné době jsou tyto pece postupně nahrazovány tunelovými chladicími pecemi s nuceným oběhem pecní atmosféry. Tyto pece s vířivou atmosférou, jejíž cirkulace je vyvolána ventilátory, sestávají z řady navzájem nezávislých sekcí, které jsou sestaveny podle specifických požadavků. Vlivem nucené cirkulace pecní atmosféry v nich dochází k intenzivnější výměně tepla, pracují hospodárněji a mají větší výkon. Pece mohou být otápěny elektrickými odporovými tělesy nebo spalováním zemního plynu. Příklad provedení takové pece je uveden na Obr. 10.3 a je z něho patrné uspořádání a funkce jednotlivých sekcí. Příčný řez topnou sekcí jedno- a dvouventilátorového systému ukazuje Obr. 10.4. Na obrázku je vyznačeno šipkami proudění vzduchu. Vzduch je z prostoru chlazených výrobků odsáván ventilátorem, hnán na boky pece, kde je vzduch ohříván elektrickými odporovými tělesy a vháněn pod pletivo pásu, na kterém jsou umístěny výrobky. Jednotlivé sekce mají samostatnou regulaci teploty za účelem zajištění chlazení skleněného zboží podle teoretické chladicí křivky. Regulována je i rychlost pletivového dopravního pásu.



Obr. 10.3 Schéma tunelové chladicí pece s vířivou atmosférou



Obr. 10.4 Pohled na topnou sekci jedno- a dvouventilátorového systému chladicí pece

Tunelové chladicí pece jsou často součástí výrobních technologií. Evidentní to je u výroby plochého skla technologií FLOAT. Zde se pás skla v první fázi nezahřívá na chladicí teplotu, ale ochlazuje na chladicí teplotu, neboť po tvarování je jeho teplota příliš vysoká.

10.3 Další postupy chlazení

Platí, že skleněné výrobky malých rozměrů (tloušťky stěny) se většinou nechladí na minimalizaci trvalého vnitřního napětí. Výrobky s malou tloušťkou stěny se chladí na vzduchu. Příkladem jsou skleněná vlákna, trubičky na výrobu rokoky, malé bižuterní výrobky. U posledně jmenovaného typu výrobky padají většinou do dvoustěnných izolačních boxů (tzv. "termobeden"), ve kterých výrobky samovolně chladnou, většinou do druhého dne.

10.4 Určování napětí ve skle

Sklo je izotropní látka. Je-li však ve skle vnitřní napětí, stává se opticky anizotropním a objevuje se v něm dvojlom (kap. 3.9.7). Paprsek lineárně polarizovaného světla se štěpí na řádný a mimořádný, které procházejí sklem různými rychlostmi. Dráhový rozdíl obou paprsků Δ je přímo úměrný dvojlomu skla a délce dráhy paprsku sklem d . Dvojlom skla je přitom přímo úměrný napětí σ , které jej vyvolalo. Spojením těchto závislostí vznikl základní vztah pro výpočet napětí ve skle.

$$\Delta = B \cdot \sigma \cdot d, \quad (10.5)$$

kde Δ je dráhový rozdíl řádného a mimořádného paprsku [nm],

B - fotoelastická konstanta skla, u běžných sodnovápenatokrémicitých skel má hodnotu asi 25 až 28 [nm·cm⁻¹·MPa⁻¹];

σ - napětí ve skle [MPa];

d - délka dráhy světla ve skle [cm].

Maximální přípustné hodnoty napětí ve skle jsou pro jednotlivé výrobky uvedeny v normách. Protože kontrola vychlazení skla se provádí na polarizačních přístrojích, jsou tyto maximálně přípustné hodnoty udávány přímo jako maximálně přípustný měrný dráhový rozdíl v nm.cm^{-1} .

Rychlá kvalitativní metoda využívá polariskopu, kvantitativní stanovení se provádí v polarimetru se Sénarmontovým kompenzátořem.

11 Zpracování a zušlechťování skla

Na konci 17. století a během 18. století se vedle sklářských hutí rozšířilo také zušlechťování uměleckého skla včetně českého křišťálu malbou, broušením, rytím, ... Kromě přípravků nebyla používána k této výrobě prakticky žádná mechanizace.

Technologie zpracování a zušlechtění se v minulosti většinou obtížně mechanizovaly a následně automatizovaly. K jejich mechanizaci začalo docházet až od druhé poloviny 19. století, což dokládají snahy v případě výroby komponent skleněné bižuterie. Historicky se každý jednotlivý kus skleněné bižuterie brousil zvlášť s použitím kvadrantu, případně po několika kusech s využitím přípravku (tzv. mašinky nebo aparátu). Od devadesátých let 19. století jsou zaváděny první stroje na strojní broušení. Skutečný nástup automatizace v zušlechtění a zpracování lze u většiny operací zaznamenat až v druhé polovině 20. století.

Hranice mezi zpracováním a zušlechtěním je v mnoha technologiích velice tenká a nelze ji v některých případech jednoznačně určit. **Zpracování** lze definovat jako získávání konečného tvaru, kdy výrobek významně mění svůj tvar a získává užitnou hodnotu. Technologie zpracování je v některých publikacích označována jako základní zušlechťování. **Zušlechťování** je proces, při kterém se celkový tvar již mění méně, ale mění se zejména vlastnosti povrchu, tedy vzhled výrobku a (nebo) funkční vlastnosti.

Technologii zpracování a zušlechťovací techniky lze rozdělit na:

- mechanické,
- tepelné,
- chemické,
- kombinované způsoby.

U technologie mechanického zpracování a zušlechtění je využíváno materiálů s tvrdostí stejnou, ale častěji vyšší, než má sklo a aplikace jejich vlastností prostřednictvím vhodných nástrojů a technologií.

V případě tepelných postupů se někdy provádí lokální zvýšení teploty na takovou hodnotu, aby k dosažení požadovaného efektu došlo účinkem sil povrchového napětí. Jedná se především o vytvoření hladkého povrchu výrobků, zaoblení ostrých hran apod. Dalším častým zušlechtěním je tzv. tvrzení a zpevňování skla, kdy je v povrchové vrstvě vyvoláno tlakové napětí za účelem zvýšení mechanických a bezpečnostních vlastností. Sklo, především ploché, může být tvarováno účinkem gravitace a vlastní tíhy. Příkladem jsou automobilová skla. Může se také jednat o proces nabíhání a dokalování, kdy se mění zabarvení a průhlednost polotovaru v celém objemu.

U chemických postupů dochází v důsledku působení dalších látek ke změně povrchových vlastností, především pak vzhledových a funkčních, dále pak vlastností mechanických a chemické odolnosti.

Kombinované postupy nelze jednoznačně přiřadit k předchozím technologiím. Příkladem může být bezpečnostní vrstvené ploché sklo (bezpečnostní lepené sklo).

U většiny výrobků se vyskytuje více operací zpracování a zušlechťení na jednom výrobku, které na sebe navazují v určitém technologickém sledu, mohou se i opakovat a vzájemně kombinovat.

Hlavní a významné technologie jsou uvedeny v následujícím textu podle výše uvedeného rozdělení.

11.1 Mechanické postupy

Mechanické technologie zpracování a zušlechťení lze rozdělit na následující postupy:

- dělení skla (zpracování),
- vrtání (zpracování),
- frézování (zpracování),
- broušení a leštění (zušlechťování),
- pískování (zušlechťování).

11.1.1 Dělení skla

Dělení skla je možné provádět několika technologiemi. Mezi ty nejčastější patří:

- dělení lámáním,
- dělení řezáním a rozbrušováním,
- dělení vodním paprskem,
- dělení sekáním.

Technologie, stroje a zařízení budou následně popsány v dalších kapitolách.

11.1.1.1 Dělení lámáním

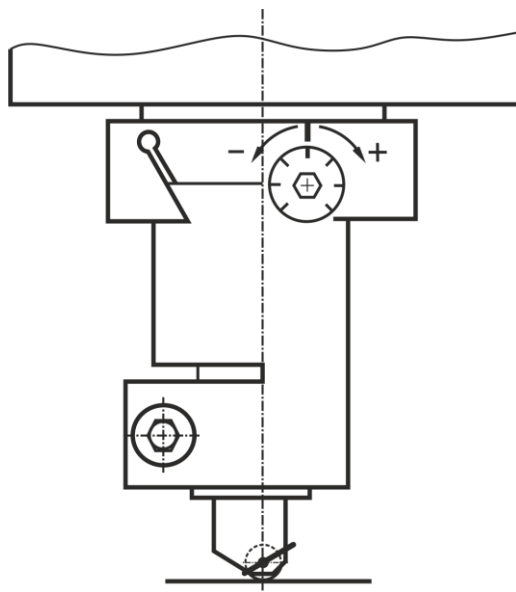
Technologie lámání skla po naškrábnutí je nejčastěji používáno u plochého skla. K naškrábnutí se používá diamantových řezáků nebo dnes častěji tvrdokovových koleček. Kolečka z tvrdokovu jsou broušena v různých vrcholových úhlech pro různé tloušťky skla od 120° pro skla do 2 mm až po úhel 165° pro skla tloušťky 25 mm. Obvyklý je univerzální řezák s úhlem 135° pro skla 2 až 6 mm. Při řezání je používáno petroleje, aby řez byl čistý. V místě naškrábnutí dochází k vytvoření trhlinek a ke koncentraci napětí a po ohnutí skla, například přes hranu stolu, dochází v tomto místě k řízenému lomu.

S ruční prací je možné se setkat u sklenáře, který používá jednoduché ruční řezáky a stoly. Strojům na lámání skla se říká řezací stroje.

Řezací stroje pro technologii dělení plochého skla jsou buď samostatné nebo přímo integrované na výrobních linkách. Rozličná může být míra automatizace, ale v současné době je využíváno CNC strojů, které umožňují import řezacího plánu (ve standardních formátech kreslicích programů) přes řídicí počítač. Automatické linky obsahují dále automatickou dopravu a automatické lámání a následnou manipulaci. Stroje jsou často přímo integrovány do linek na výrobu samotného polotovaru plochého skla, kde slouží k rozřezání skla na potřebné formáty, vyříznutí vadného skla, řezání technologického odpadu ve formě tzv. bortů (kap. 9.6.3). Řezací stroje jsou také na začátku linek na výrobu autoskel, kde vyřezávají ze základních formátů často komplikované tvary pro následné zpracování (kap.

11.4.4). Hlavní předností uvedených linek je přesnost řezaných tvarů, rychlost a operativnost při řezání, optimalizace řezacího plánu a tím minimalizace odpadu.

Řezací hlava (Obr. 11.1) může být na stroji jen jedna nebo jich může být i několik. Nejčastěji jsou hlavy umístěny na pohyblivém mostu. Rychlost řezací hlavy je 1,4 až 3,4 m/s. Řezací kapacitu je možno zvýšit více řezacími hlavami. Tloušťka řezaného skla je běžně uváděna od 3 do 12 mm. Špičkové stroje mají rozsah od méně než 2 mm do 25 mm.



Obr. 11.1 Detail řezací hlavy

Doprava je v rámci linky zajištěna buď pomocí válečků, nebo pásků a často je k manipulaci používáno tlakového vzduchu přiváděného pod sklo, čímž se vytváří vzduchový polštář (sklo je nadnášeno). Lámání tabule se děje buď manuálně nebo častěji automaticky většinou nadzvednutím skla v místě řezu. Lze se také setkat s nahřátím v místě řezu. Tím vznikne ve skle přechodné napětí a sklo v řezu pukne (praská). Na tomto principu je založena technologie opukávání, kap. 11.2.1.

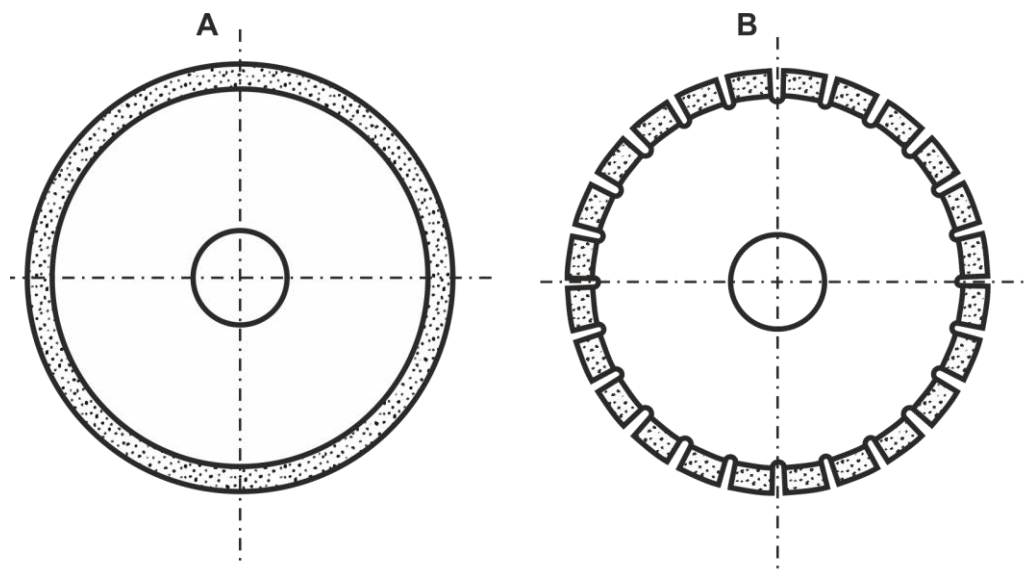
Dělení vrstveného skla je komplikovanější úlohou. Dělené sklo musí být naříznuto z obou stran, následně nalomeno a na závěr zahřáto odporovou spirálou tak, aby se přetavila fólie mezi skly.

11.1.1.2 Dělení řezáním a rozbrušováním

Dělení skla řezáním je založeno na principu rozbrušení úzké oblasti skleněného výrobku většinou pomocí úzkých brusných kotoučů. V současné době se používají především diamantové nástroje (DIA nástroje). Jejich rozšíření nastalo po zvládnutí technologie výroby syntetických diamantů. Tento způsob dělení se používá tehdy pokud není možné dělení lámáním nebo pukáním, tam, kde je požadována velká přesnost a paralelnost řezných ploch, nebo pokud má být řez například šikmý. Jednoznačnou výhodou je vyšší kvalita řezaných ploch oproti lámání.

Jako nástroje se používají diamantové kotouče, které mohou mít dvojí provedení, buď se souvislým obvodem nebo segmentové, Obr. 11.2. Velikost diamantových zrn bývá od

0,15 do 0,25 mm. Ke chlazení kotoučů se používá voda, petrolej nebo emulze (diamantové nástroje musí být vždy chlazeny). Řezná obvodová rychlost kotouče bývá až 80 m/s, rychlost posuvu do řezu 10 až 200 mm·min⁻¹. Kotouče mívají průměr od 60 do 700 mm.



Obr. 11.2 Diamantový řezací kotouč, A – se souvislým obvodem, B – segmentový

U konstrukce strojů na rozbrušování je nutné dbát na vyloučení vibrací, které mají za následek rychlé opotřebení nástroje a snížení přesnosti rozměrů řezaného skla. Proto jsou rám stroje, suport, přípravek na uchycení řezaného skla a vřeteno konstruovány tak, aby bylo minimalizováno chvění diamantového kotouče.

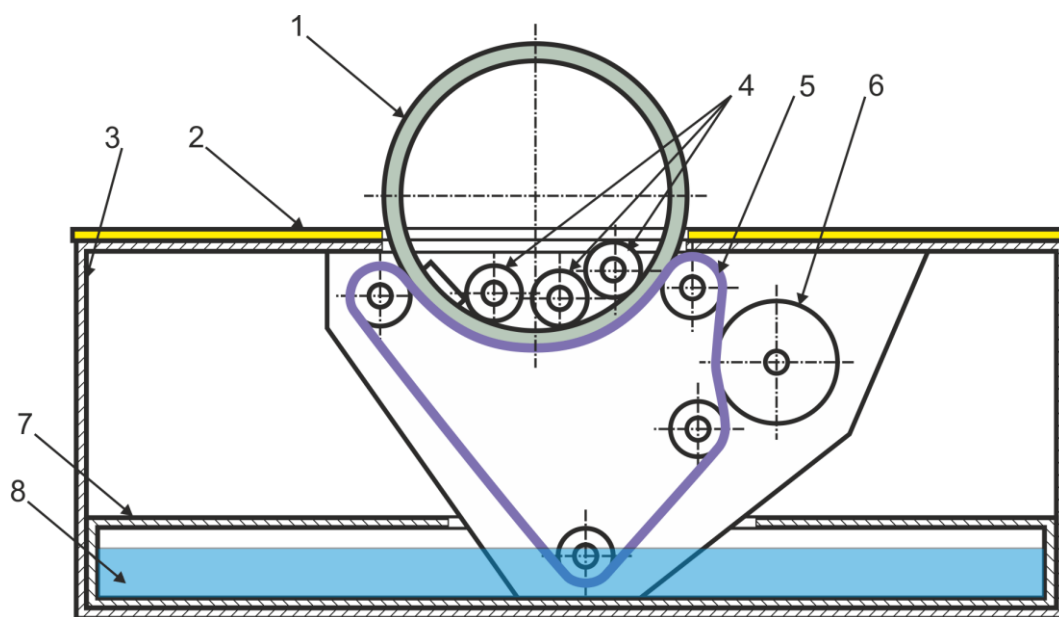
Zajímavým řešením v současné době, především pro mechanizované zpracování skla a pro hobby sektor, jsou tzv. diamantové prstencové pily (také označované jako pily s diamantovou strunou). Ty používají diamantový nástroj ve formě tenkého prstence, Obr. 11.3. Prstenec je fixován v nylonových pouzdrech ve formě rolen. Pohon je obstarán přes řemen, který je ponořen do vodní lázně a obstarává také přívod vody pro chlazení kotouče. Na stole je umístěno sklo, ze kterého je pak vyřezáván tvar prakticky bez omezení. Tato koncepce je pravděpodobně zatím nevhodná pro průmyslové nasazení při sériové výrobě.

11.1.1.3 Dělení vodním paprskem

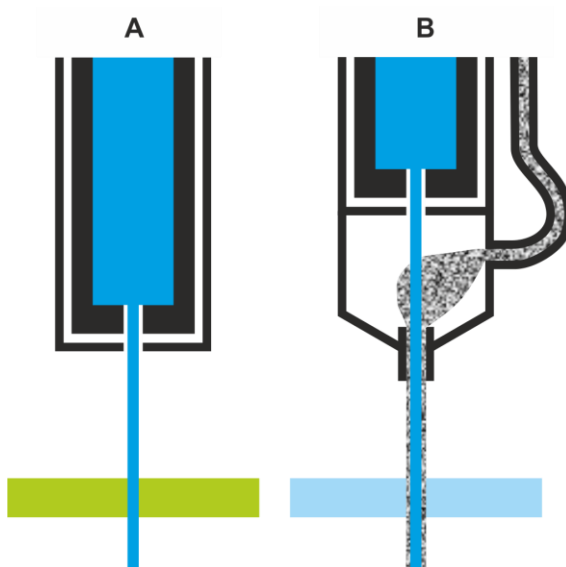
Tato technologie prodělala v posledních letech velký vývoj. Řezání vodním paprskem umožňuje dělit celou škálu různých materiálů, jako jsou plasty, papír, kovy, keramika, žula i sklo. Sklo může být, stejně jako u diamantové pily, jednoduché nebo vrstvené. Řez je čistý, bez tepelného ovlivnění a vzniku napětí, proces je bezprašný a bez vývinu škodlivých plynů. Výhodou je možnost výroby prakticky jakéhokoli tvaru.

Princip řezání je dvojitý (Obr. 11.4):

- řezání prostým paprskem, používané pro měkké materiály,
- řezání abrazivním vodním paprskem, používané pro tvrdé materiály.



Obr. 11.3 Schéma diamantové prstencové pily: 1 – DIA prstenec (struna), 2 – pracovní stůl, 3 – rám stroje, 4 – systém kladiček pro upevnění prstence, 5 – hnací řemen prstence, 6 – pohon řemene, 7 – vanička s chladicí kapalinou, 8 – chladicí kapalina



Obr. 11.4 Princip řezání vodním paprskem: A – neabrazivní, B – abrazivní

V případě čistého vodního paprsku proud o nadzvukové rychlosti mechanicky rozrušuje materiál. Řezání čistým vodním paprskem se nejvíce používá k řezání gumy, těsnicích hmot, filtračních rohoží, ale také například jednorázových plen, hedvábného papíru a vybavení interiéru automobilů.

V případě abrazivního vodního paprsku proud vody urychluje pohyb abrazivních částic (např. granátový písek nebo olivín). Tyto částice, nikoliv voda, rozrušují materiál. Vlastnosti abrazivního vodního paprsku:

- žádné tepelně ovlivněné zóny,
- žádné mechanické namáhání,
- tenký proud (průměr 0,508 až 1,27 mm),
- mimořádně detailní geometrie,
- řezání tenkého materiálu,
- řezání materiálu do tloušťky 254 mm,
- malý odpad materiálu při řezání,
- nízké řezné síly během řezání, max. 4,5 N,
- jedno nastavení paprsku téměř pro všechny varianty abrazivního řezání,
- omezení počtu následných operací,
- snadno naprogramovatelný proces.

Základem každého zařízení je výkonné čerpadlo. Se zvyšujícím se tlakem vody se zvyšuje také produktivita. V případě abrazivního vodního paprsku se snižuje jeho průměr a zvyšuje se rychlost proudu, takže dodává vyšší hustotu výkonu řezného paprsku, zvyšuje se pohybová energie jednotlivých částí abraziva. V současné době se dosahuje trvalých provozních tlaků 600 MPa (6 000 barů). Rychlost proudu se pak podle údajů výrobců blíží k rychlostem 1 300 m/s. Systémy mohou řezat také omezeně v tzv. 3D, vodní paprsek může být vůči řezanému materiálu přiváděn pod úhlem až 60°. To umožňuje například srážet hrany. Řešení nabízí například společnost Flow v řadě Mach, která reže s přesností 0,127 mm při rychlosti až 10,2 m·min⁻¹.

Zařízení pro dělení vodním paprskem se používají pro dělení především plochého skla. K tomuto účelu jsou používány portálové CNC stroje. Pro dosažení vysoké přesnosti jsou používány také velmi přesné pohony a lineární vedení řezacích hlav (kuličkové šrouby nebo např. Nexen Roller Pinion Systém).

Existují také řešení, která umožňují nasazení řezacích hlav na ramena průmyslových robotů. Výhodou je velmi flexibilní řezání. Toto řešení se neuplatňuje (zatím) ve sklářských aplikacích.

11.1.2 Vrtání skla

Technologií vrtání skla je několik, především se liší průměrem vrtaných otvorů a možnostmi výroby i nekruhových profilů.

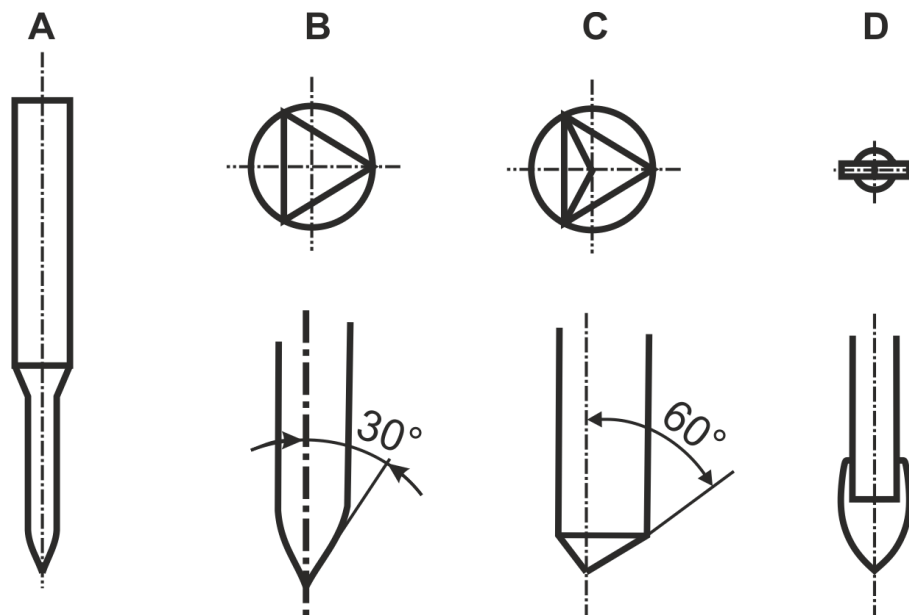
Stroje na vrtání skla lze rozdělit podle nástroje (média) na vrtání:

- kopinatými vrtáky,
- diamantovými vrtáky,
- ultrazvukem,
- laserem,
- abrazivním vodním paprskem.

Jednotlivé stroje spolu s technologií jsou popsány v dalších kapitolách.

11.1.2.1 Vrtání kopinatými vrtáky

Pro vrtání malých otvorů se používají tříboké kopinaté vrtáky ze slinutých karbidů WC a TiC zpravidla jakosti H1, Obr. 11.5. Jak je z obrázku zřejmé, pro vrtání tenčích skel se používají vrtáky se špičatějším hrotem (menší vrcholový úhel) a pro větší tloušťky pak s hrotem o větším vrcholovém úhlu.

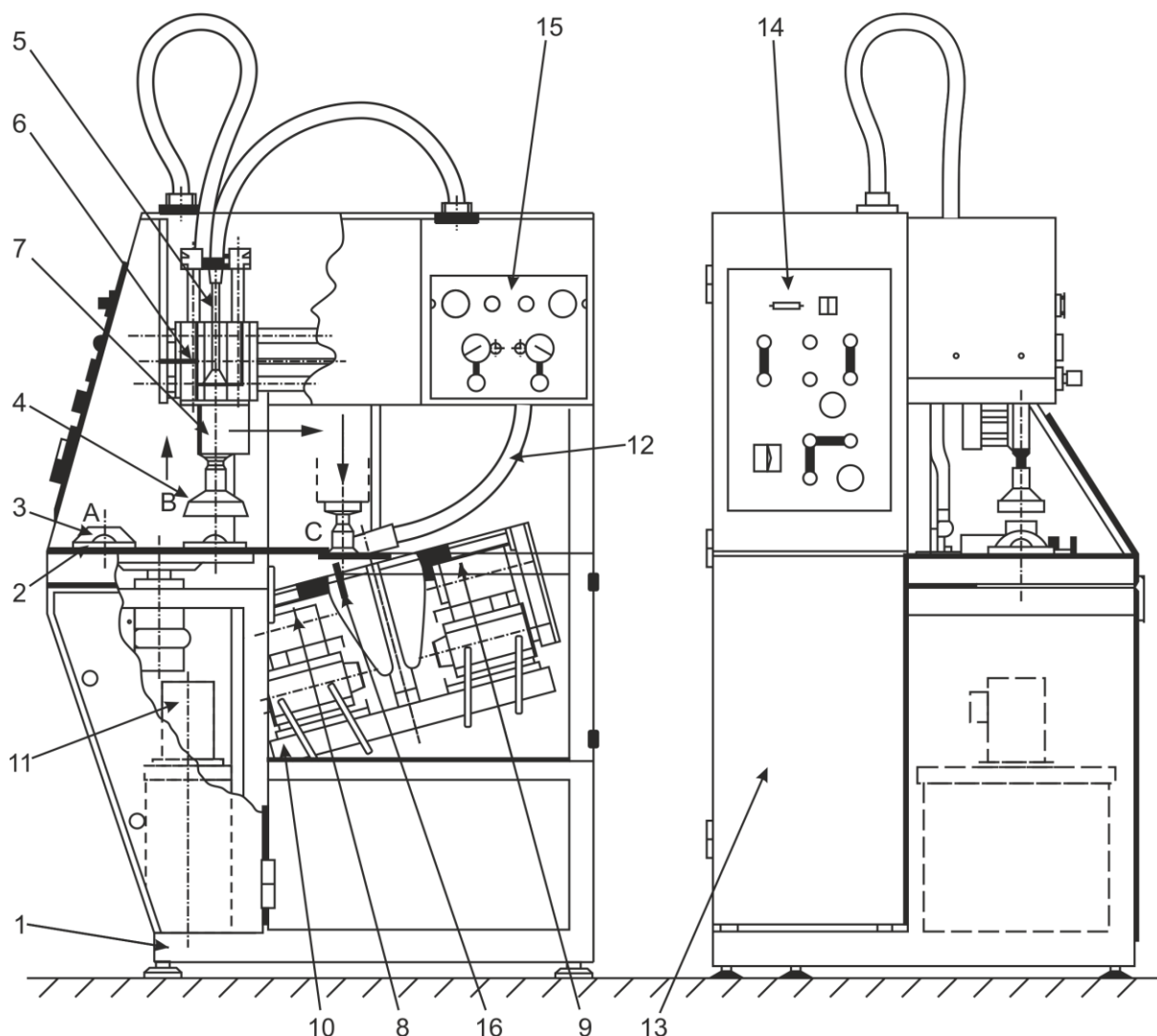


Obr. 11.5 Tvar kopinatých vrtáků: A – celkový pohled, B – vrták pro vrtání slabých tlouštěk, C – pro vrtání silných tlouštěk, D – vrták s destičkou

Opět je nutné při obrábění skla použít chladicí kapaliny, což může být voda, petrolej, glycerin nebo terpentýn. Z hlediska životnosti nástroje je nejlepší chladicí kapalinou terpentýn, který se ale z hygienických a ekologických důvodů přestává používat i přesto, že zvyšuje životnost nástrojů 2x až 3x. Nejčastěji je používáno vody.

Pro vrtání kopinatým vrtákem s destičkou je třeba dodržet podmínku nízkých otáček a zmíněného intenzivního chlazení. Tento typ vrtáku se vyrábí v průměrech od 3 do 12 mm.

Stroje pro vrtání kopinatými vrtáky mohou být univerzální nebo jednoúčelové. Příkladem jednoúčelového zařízení je stroj na vrtání děr do lustrových misek typu VM-1. Stroj vrtá otvory průměru 3 mm, životnost vrtáku je pod 200 vyvrtaných děr, otáčky vrtáku jsou $3\,000\text{ min}^{-1}$, jeden otvor s hloubkou 5 mm je vrtán 4 až 8 s.



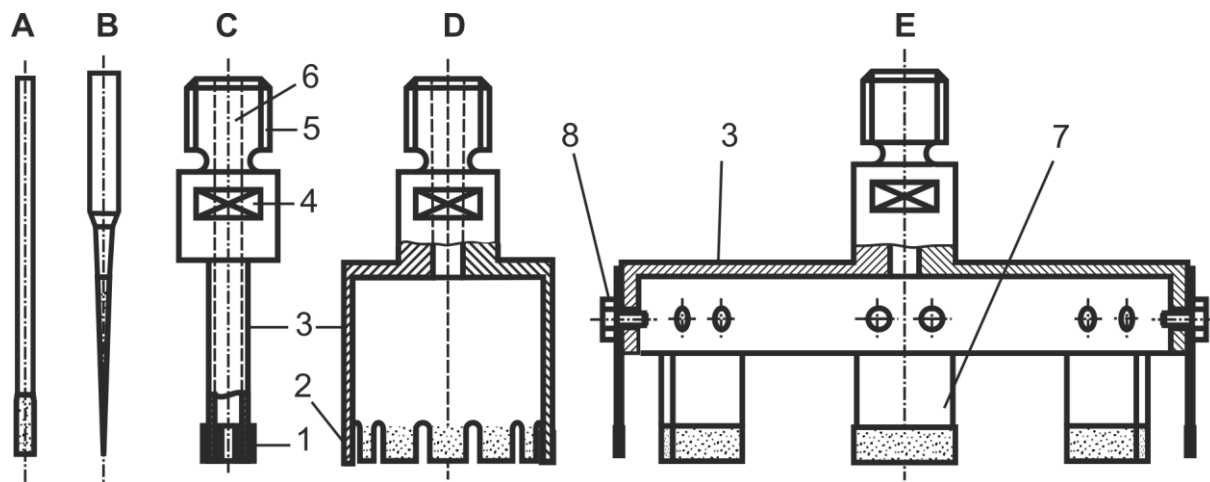
Obr. 11.6 Vrtací stroj na lustrové misky typu VM-1: 1 - rám, 2 - polohovadlo, 3 - lustrová miska, 4 - úchopná hlavice, 5 - pneumatický pohon, 6 - pojezd mezi polohou B a C, 7 - pootáčení hlavice o rozteč děr, 8 - levá vrtací jednotka (vřeteno, posuv, elektromotor), 9 - pravá vrtací jednotka, 10 - naklápění vrtacích jednotek, 11 - chladicí agregát, 12 - přívod chladicí vody do místa vrtání otvoru, 13 - rozvaděč, 14, 15 - hlavní a boční ovládací panel, 16 - lustrová miska ve vrtací poloze, A - vkládací poloha, B - předávací poloha, C - vrtací poloha

11.1.2.2 Vrtání DIA nástroji

Diamantové nástroje (DIA nástroje) jsou používány také pro vytváření otvorů ve skle. V zásadě se jedná o několik typů vrtáků. Principem je vždy rozbrušování skla. Ve většině případů se jedná o vrtání plochého skla.

Pro vrtání otvorů malých průměrů do skla lze použít také minifréz. Ty mohou mít tvar kuličky, válečku anebo jehlice s diamantovým prachem na povrchu upevněné na upínací stopce. Pro malé průměry od 0,5 do 3 mm se používají vrtáky tyčinkové. Jedná se o protáhlý jehlan (jehlici) od průměru 0,5 do 1,5 mm, (nebo od 0,6 do 3 mm), který je potahován diamantovým prachem, otáčky pro vrtání tímto nástrojem jsou uváděny od 400 do 700 min⁻¹. Vrtáky jsou určeny pro vrtání bižuterie a kamenů. Dalším typem je váleček, který má průměr

od 1 do 2 mm a je potahován diamantovým prachem. Otáčky vřetene se mají pohybovat okolo $1\,000\text{ min}^{-1}$.



Obr. 11.7 DIA vrtáky: A - tyčový vrták potahovaný diamantovým prachem, B – tyčinkový vrták, C – trubkový vrták s celistvou korunkou, D – segmentový, E – s přišroubovanými segmenty, 1 – diamantová korunka, 2 – diamantový segment, 3 – trubková část vrtáku, 4 – oboustranné plošky pro montáž klíčem, 5 – závitové zakončení, 6 - otvor pro přívod chladicí kapaliny, 7 – diamantový segment, 8 – šroub

Pro vrtání je také možné použít kopinatých vrtáků s diamantovým hrotem, Obr. 11.5, D. Hrot je v tomto případě ve formě špičaté destičky s nanesenými diamantovými zrny.

V současné době nejčastěji používaným diamantovým vrtákem je trubkový. Jedná se tak v podstatě o rozbrušování tenkého mezikruží ve skle. Aktivní část čela vrtáku je tvořena obvykle bronzovou korunkou obsahující diamantová zrna o průměrné velikosti $100 - 200\text{ }\mu\text{m}$. Vrtáky mají běžně průměr od 3 do 120 mm, mohou mít průměr i nad 250 mm. Od průměru 6 mm mohou mít korunku segmentovanou (nařezanou), což zlepšuje odvod chladicí kapaliny s odbroušenými částěčkami skla a tím snižuje odpor při vrtání. U průmyslových aplikací jsou vrtáky nařezány od průměru 14 mm. Chladicí kapalina je u vrtáků pro strojní výrobu prakticky vždy vedena středem vrtáku (pokud to dovoluje jeho průměr). Doporučené vrtací parametry jsou uvedeny v Tab. 11.1. Pro vrtání je běžně používána dvojice vrtáků (v případě vrtání plochého skla), které vrtají sklo z obou stran tak, aby se dosáhlo vyšší kvality vrtaných děr bez záprasků a mušliček na výstupní straně. Vrtáky nesmí v tomto případě přijít do kontaktu a musí být správně vycentrovány.

Tab. 11.1 Doporučené technologické vrtací parametry

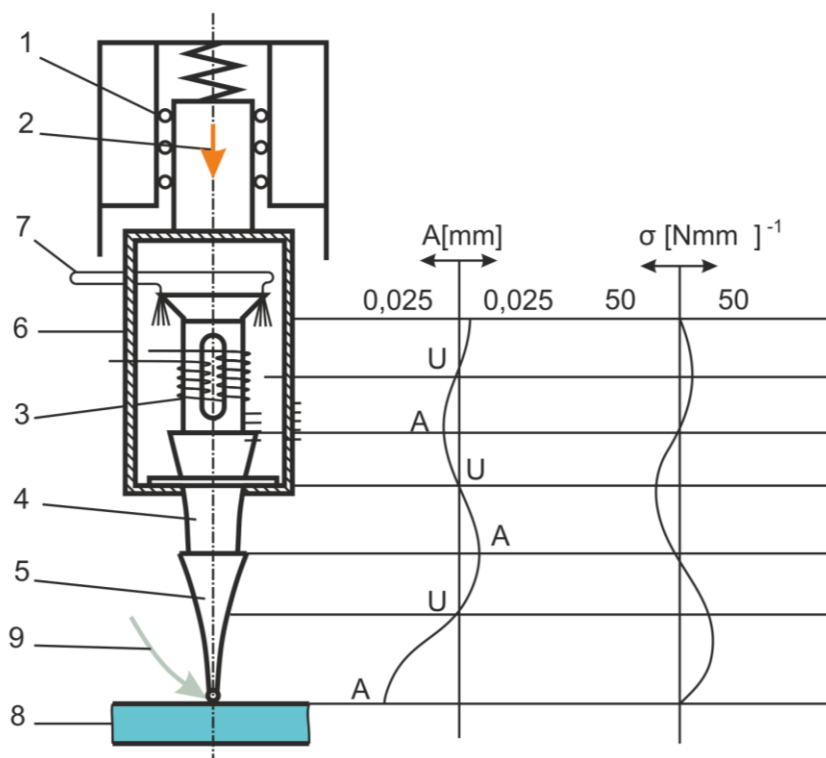
Průměr vrtáku [mm]	Otáčky [min^{-1}]	Tlak vody [kPa]	Posuv [mm. min^{-1}]
5 – 3	10 000	500 – 200	100
6 – 10	5 500	500 – 200	70
11 – 20	3 500	200 – 100	50
21 – 35	1 500	100 – 50	45
36 – 40	750	100 – 50	40
Nad 40	< 600	50 - 20	< 30

Stroje pro vrtání skla mohou být mechanizované a automatické. Mechanizované stroje jsou používány pro ruční a malosériovou výrobu. Jedná se většinou o dvouvřetenové stojanové vrtačky se stolem pro položení plochého skla. Jsou flexibilní, všestranné, umožňují vrtat velkou škálu různých otvorů, ale také vyžadují větší zručnost a zkušenost. Moderní mechanizované stroje se vyznačují plynule nastavitelnými otáčkami, samočinným spouštěním motorů, samočinným spouštěním vody do vrtáku, uzavřeným oběhem vody atd.

11.1.2.3 Vrtání ultrazvukem

Ultrazvuk je akustickým vlněním, které patří do elastického vlnění s frekvencí 20 000 až 10^9 Hz. Pro ultrazvukové obrábění se používají frekvence 18 000 až 25 000 Hz. Základem je výkonový člen sonotroda – koncentrátor – nástroj.

Ultrazvukový generátor napájí piezokeramický měnič, ze kterého se přenáší kmity přes koncentrátor na nástroj, Obr. 11.8. Princip je založen na rozkmitání nástroje a přidání dostatečného množství abrazivní suspenze (suspenze vody a abrazivních zrn) do místa obrábění. Samotný proces je založen na narušování skla abrazivem, vylamování drobných částíček, které jsou pak spolu s abrazivní suspenzí vyplavovány, přičemž na jejich místo je přiváděna čerstvá abrazivní suspenze. Obráběcí proces probíhá pouze pod čelem nástroje, na stěnách hloubeného otvoru je obráběcí účinek minimální. Vytváří se zde pouze mezera o velikosti, která závisí na velikosti zrna použitého brusiva. Skutečný rozměr otvoru je větší než rozměr nástroje, a to o 1,6 – 1,8x než střední velikost použitého zrna.



Obr. 11.8 Princip ultrazvukové vrtačky, elektromechanická soustava, 1 – vedení celé hlavy v kuličkovém vedení, 2 – posuv hlavy hydraulicky, servomotorem, perem nebo závažím, 3 – měnič, 4 – průchozí kužel, 5 – nástavec, 6 – pouzdro, 7 – vodní sprcha, 8 – vrtané sklo, 9 – přívod brusné suspenze, A – rozložení kmiten, U – rozložení uzlů, σ – rozložení mechanického napětí

Ultrazvuk lze využít pro obrábění skla, a to vrtání, řezání a přenos reliéfů. Předností ultrazvukových vrtaček je možnost vrtání otvorů libovolných profilů a možnost využití sdružených nástrojů při minimálním tepelném, chemickém a mechanickém namáhání vrtaného materiálu, který si zachovává po vrtání původní vlastnosti. Pro sklo jsou uváděny vrtací výkony na úrovni kolem $250 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ bez odsávání znečištěné suspenze a kolem $1\,200 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ při odsávání suspenze.

Sklářský průmysl využívá ultrazvukové obrábění ke zpracování dekoračního, užitkového a technického skla, dále například na vrtání otvorů do stupnic měřících přístrojů a upichování malých kotoučů pro optické čočky. Velký potenciál lze spatřovat u produkce skleněných výrobků v mikrorozměrech.

Existuje také využití ultrazvuku v kombinovaném způsobu vrtání skla, které používá již zmíněných diamantových nástrojů. V tomto případě se diamantový vrták otáčí a zároveň axiálně kmitá. Brousící nástroje mají rotační tvar s plným nebo trubkovým průřezem a tedy i výsledný otvor je kruhový. Stejně jako ostatní diamantové nástroje musí být i v tomto případě chlazeny a musí být zajištěno vyplavování odbroušeného materiálu (používá se nejčastěji voda). Proti klasickému rotačnímu vrtání má tato metoda výhodu ve zvýšení rychlosti vrtání (je uváděno zvýšení na 2 – 6 násobek), zlepšuje se přesnost vrtání otvoru, prodlužuje se životnost vrtáku a snižují se náklady na vykonanou operaci.

11.1.3 Broušení a leštění skla

Broušení je mechanický způsob opracování skla volným nebo vázaným brusivem na čelní ploše kotouče otáčejícího se kolem svislé osy nebo na obvodu kotouče otáčejícího se kolem osy vodorovné. Při broušení dochází k vzájemnému tření skla a brusiva, nejčastěji za přítomnosti vody. Pohybující se ostrá zrna brusiva poškozují povrch skla a vytvářejí v něm síť rysek a trhlinek, snižující soudržnost povrchové vrstvy. V dalším průběhu procesu se vylamují z narušené vrstvy drobné úlomky skla. Mechanicky vybroušené plochy se ještě leští, jen výjimečně se nechávají výrobky po broušení matné.

11.1.3.1 Broušení

Při broušení se sledují dva základní parametry:

- a) Obrus skla je parametrem produktivity procesu, který uvádí množství skla ubíraného z obrušovaného skla. Tento parametr určuje délku procesu broušení.
- b) Kvalita broušeného povrchu, která zahrnuje zejména stupeň drsnosti a rovnoměrnost rozdělení povrchových nerovností. Je úměrná době broušení a velikosti zrn brusiva.

Oba parametry spolu úzce souvisí a lze je ovlivnit výběrem brusiva a volbou technologických podmínek broušení.

Broušení na rovné čelní ploše kotouče se svislou osou se nazývá rovinné broušení, jinak též hladinářské – stroj se nazývá hladinářský brus. Broušení na obvodu kotouče s vodorovnou osou se nazývá vybrušování, řezání. Vžitý, avšak nesprávný název, přejatý z němčiny je „kulení“. Stroj se nazývá správně – brousicí (nesprávně – „kuličský stroj“). Lze se setkat s válcovým brusem, který má také vodorovnou osu, ale proti „kuličskému stroji“ je

podstatně širší. Používá se především pro hromadné broušení bižuterních kamenů (šatonů), kap. 11.1.3.5.

Vlastní broušení se provádí často ve dvou fázích:

- hrubé broušení,
- jemné broušení.

Účelem hrubého broušení je co nejrychlejší odebrání skla z určených míst nebo hrubé zarovnání povrchu. Pak následuje jemné broušení, jímž se mají vyrovnat rýhy způsobené hrubým broušením. Poté se provádí leštění.

Brusiva

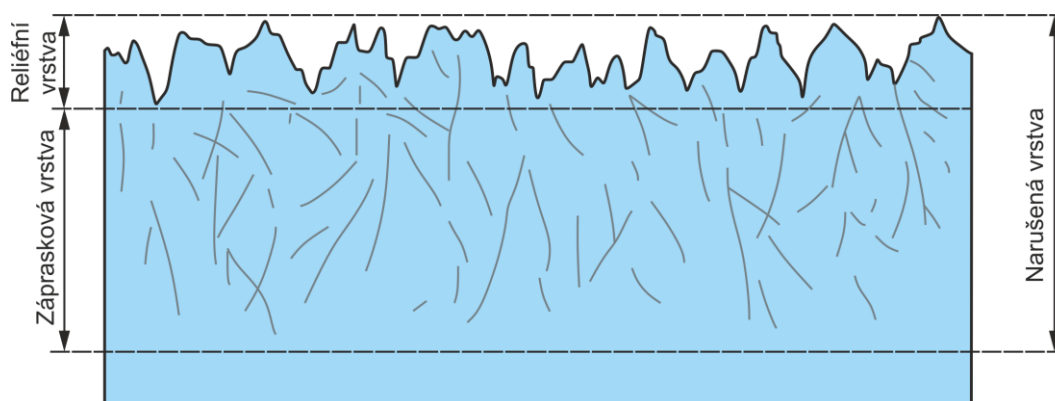
Původně se používala výhradně přírodní brusiva: křemenný písek, pískovec, smírek, přírodní korund, diamant a další. Dnes se lze setkat s celou řadou syntetických brusiv, např.: karbid křemíku (SiC, karborundum), tavený korund ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, elektrokorund, prodává se pod názvem Elektrit), syntetický diamant a další.

Brousí se buď:

- volným brusivem na litinovém kotouči (v průmyslové praxi méně častý způsob) nebo
- vázaným brusivem (brusnými kotouči, zrna jsou spojena vhodným pojivem).

Broušení volným brusivem

Při broušení volným brusivem se mezi litinový kotouč a broušené sklo přivádí brousicí zrno (brusivo) s vodou. Brusivem bývá nejčastěji křemenný písek, karbid křemíku nebo tavený korund o velikosti zrna 5 až 500 μm . Zrna, nacházející se mezi sklem a litinovou plochou, způsobují při pohybu brusy trhlinky a odštěpování drobných úlomků skla. Úlomky jsou odštěpovány z povrchové vrstvy skla tloušťky 5 - 30 μm (tzv. reliéfní vrstva, Obr. 11.9), ale trhlinky zasahují do hloubky více než dvojnásobné (tzv. záprasková vrstva). Obě vrstvy se označují jako narušená vrstva, která musí být následným leštěním odstraněna.



Obr. 11.9 Povrchový reliéf a podpovrchové narušení broušeného skla

Tlak působící při broušení skla nemůže překročit pevnost zrn. Tomu brání drcení zrn brusiva, jímž je celý proces doprovázen. Proto je průběh broušení silně ovlivňován

mechanickými vlastnostmi brusiva, zejména jeho pevností, křehkostí a tvrdostí. Umělý korund je pro své mechanické vlastnosti účinnějším brusivem než křemenný písek a méně účinným nežli karbid křemíku. Průběh broušení je ovlivňován i velikostí částic. Hrubší zrna mají větší účinnost, způsobují však větší rýhy a trhliny, jež se pak v další fázi (při jemném broušení) musí odstranit. Účinnost broušení při určitém druhu brusiva a zrnitosti závisí dále na množství přiváděného zrna, tlaku i rychlosti otáčení brusného kotouče. Rovněž chemické složení broušeného skla má významný vliv.

Broušení vázaným brusivem – brusné kotouče

Při broušení na brusných kotoučích je technologie obdobná s tím rozdílem, že jsou brusné kotouče vyrobeny již z vlastního brusiva vázaného buď minerálními pojivy (např. pískovec) nebo umělými pojivy. Jsou to kotouče pískovcové, polyuretanové a elektritové. Do této kategorie spadají velice často v poslední době užívané diamantové brusné kotouče a nástroje již zmíněné v kap. 11.1.1.2 a 11.1.2.2.

Pracovní povrch brusného kotouče je seskupení obrovského množství ostrých brusných zrn. Při procesu broušení se:

- zrna lámou a hrany se zaoblují, pokud tento proces převládá, pak drsný povrch nástroje se zahlazuje a celý kotouč se otupí,
- vylamují se celá zrna, pokud tento proces převládá, pak vzniká nový drsný pracovní povrch a nástroj se ostří.

Brousící povrch je třeba obnovovat ostřením, k čemuž se používá diamantový hrot nebo karborundový nástroj. Obnova geometrického tvaru se provádí orovnááním pomocí litinové, karbidové nebo diamantové orovnávačky. Ovšem oproti ostření je úběr mnohem větší a orovnáváním vznikají velké ztráty brusiva, což vede k tomu, že pracovní kapacita kotoučů je využita jen zčásti.

11.1.3.2 Leštění

Mechanicky vybroušené plochy se ještě leští, čímž se matný a pouze průsvitný povrch přemění v lesklý a průhledný. Čím dokonaleji je provedeno leštění, tím kvalitnější a lesklejší je povrch výrobku. Při leštění se sledují parametry: jakost vyleštěného povrchu a účinnost leštění.

Leštění může být:

- mechanické,
- chemické (kap. 11.3.1),
- tepelné (kap. 11.2.6).

V této části skript je věnována pozornost pouze mechanickému leštění. K mechanickému leštění se používá kotoučů z měkčího materiálu (dřevo, korek, plst', polyuretan), na něž se nanáší směs vody a jemného leštícího prášku. Existují také leštící kotouče s vázaným leštivem. Nejvýznamnějším leštivem jsou leštící červeň ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), leštící čern (směs částečně hydratovaných oxidů železa) a oxid ceričitý CeO_2 , což jsou syntetická leštiva. Přírodním leštivem je tripolit (rozsivková zemina obsahující především SiO_2) a pemza (skelná pěna sopečného původu).

Při broušení se jedná především o mechanický pochod, ale při leštění se uplatňují tyto vlivy:

- a) Mechanické – stejný princip jako u broušení.
- b) Chemické – při styku broušeného povrchu s vodní suspenzí leštiva probíhá neustále koroze skla za tvorby křemičitého gelu, který je strháván a odnášen zrnky leštiva. To vysvětluje závislost účinnosti leštění na druhu použité suspenze a její kyselosti. Podle odborné literatury by se pH leštící suspenze mělo pohybovat v rozmezí 4 až 10, vyšší a nižší hodnoty snižují úběr skla a tím i účinnost leštění.
- c) Tepelné – povrch skla se při pohybu leštiva ohřívá a měkne. Tlakem zrněk je pak vyvoláno tečení skla v tenké vrstvě (Beiblyho vrstvě) a povrchové napětí následně povrch vyhladí. Tento děj tak přispívá k vyrovnaní povrchu, zejména v konečném stadiu.

Dále je průběh ovlivňován druhem leštícího prášku, množstvím leštící suspenze, její koncentrací a teplotou, tlakem i rychlostí kotouče aj. činiteli. Rovněž zde má složení skla na průběh leštění významný vliv. Snadněji se leští skla s nižší brusnou tvrdostí, jako je olovnatý křišťál.

Broušení a leštění se provádí většinou za přítomnosti vody, která má několik důležitých funkcí: chladí výrobky během broušícího nebo leštícího procesu, odplavuje uvolněné částice skla, čistí brus a u volného brusiva nebo leštiva je nosným médiem. Malé množství vody způsobuje tzv. pálení, velké množství zase příliš rychle odplavuje brusné částice. V případě použití diamantu voda ochlazuje nástroj (brusivo).

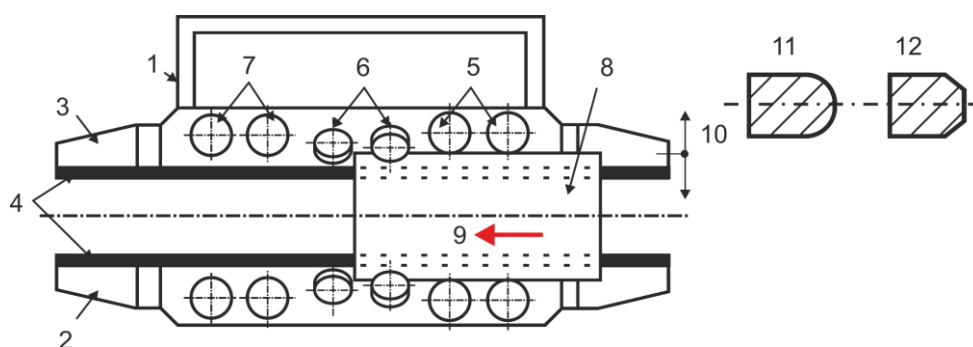
Existuje mnoho strojů a celých zařízení, které využívají výše uvedené technologie broušení a leštění. V následujícím textu jsou uvedeny jen příklady pro některé z nejčastějších typů výrobků ze skla.

11.1.3.3 Broušení a leštění plochého skla

Pro výrobu zrcadel bylo v minulosti nutné provést broušení a leštění celých ploch tabulového skla. Používaly se speciální stroje, které umožňovaly brousit a následně leštit velké formáty. Jednalo se o stroje karuselové, stroje s přímočarým posuvem nebo automatizované linky na oboustranné broušení a leštění, tzv. konvejery. Tyto linky nejsou již používány, neboť kvalita plochého skla vyrobeného technologií FLOAT je natolik vysoká, že lze toto sklo bez mechanického broušení a leštění použít na výrobu zrcadel.

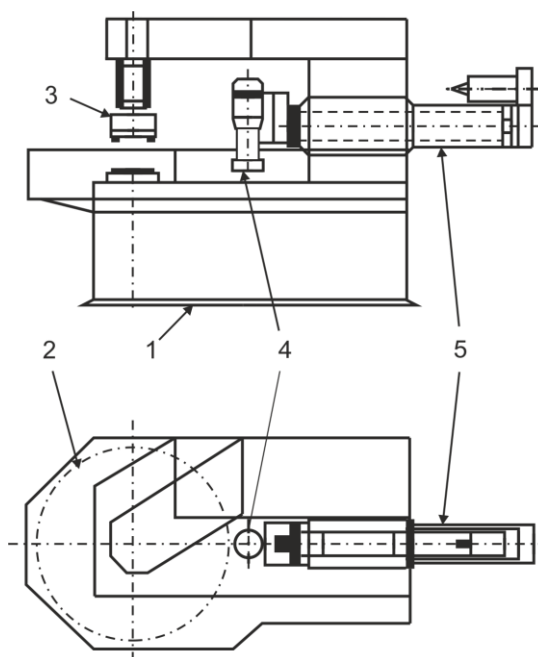
Při výrobě produktů z plochého skla jsou často používány stroje na broušení a leštění řezných ploch a hran. Takto se opracovávají nejčastěji plochy po dělení lámáním, ale i po jiných způsobech dělení skla. Existují technologie zvláště na broušení přímočarých, kruhových nebo křivočarých tvarů z plochého skla.

Pro broušení přímočarých ploch slouží stroje (Obr. 11.10) s diamantovými nástroji ve formě brusných kotoučů. Stroje jsou konstruovány jako stavebnicové s jedním až šesti páry broušících jednotek. Za broušením může následovat stroj na leštění a naopak předcházet může stroj na dělení skla (kap. 11.1.1). Přímocharé broušení a leštění hran se provádí u skla pro nábytkářský průmysl, výrobu zrcadel a dalších výrobků.



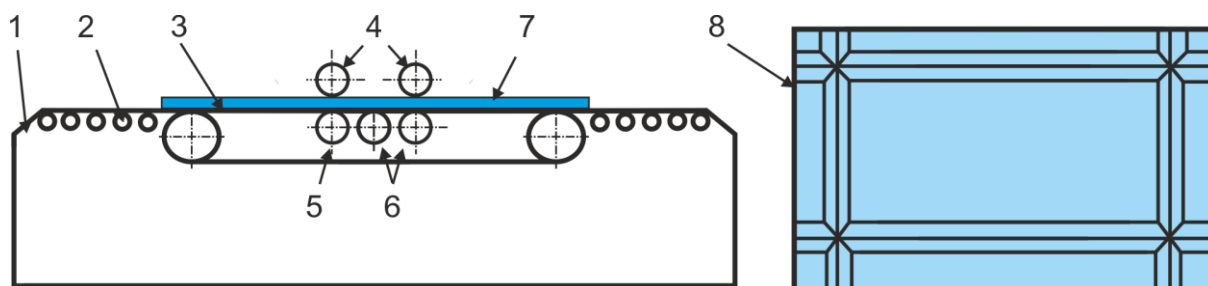
Obr. 11.10 Schéma stroje na přímočaré broušení řezných ploch a hran tabulí plochého skla, 1 – rám stroje, 2 – pevná bočnice s brousicími stanicemi, 3 – nastavitelná bočnice s brousicími stanicemi, 4 – pásový dopravník, 5 – brusy na zaoblené nebo kolmé zabroušení řezné plochy (dle pozn. 11 a 12), 6 – hrncové brusy ke sražení hran, 7 – leštící kotouče 8 – tabule skla, 9 – směr posuvu tabule, 10 – seřizování stroje na danou šířku skla, 11 a 12 – možnosti volby tvaru zabroušených řezných ploch tabule skla

Především při výrobě autoskel se provádí broušení (sámování) a případně i leštění na strojích pro opracování nerovných kontur. Příklad je uveden na Obr. 11.11. Sráží se na nich i hrany, a to úkosem nebo zaoblením. Pro broušení křivočarých řezných ploch jsou stroje řízeny počítačem nebo řídicí jednotkou s procesorem, čímž se zajišťuje přesnost, reprodukovatelnost a operativnost výroby.



Obr. 11.11 Schéma automatu na zabrušování hran autoskel: 1 – rám stroje, 2 – otočný stůl, 3 – otočná přísuvná upínací hlava, 4 – broušící hlava, 5 – posuvné rameno

Ploché sklo lze také brousit a leštit na strojích pro dekorování plochého skla. Stroje mohou brousit pouze drážky (Obr. 11.12) nebo vybrušovat volně tvary. Cílem může být zušlechťení určené pro technické účely (např. upevnění pryžových pásek) nebo může mít estetický význam.



Obr. 11.12 Schéma stroje na broušení drážek: 1 – rám, 2 – válečkový stůl, 3 – pásový dopravník, 4 - přitlačná kladka, 5 – brusný diamantový kotouč, 6 – leštící kotouč, 7 – tabule skla, 8 – tabule skla s vybroušenými ozdobnými drážkami

U strojů brousících a leštících pouze drážku se lze setkat s dvojí konstrukcí. Buď je tabule skla umístěna na stole stroje a nad stolem je most, podél něhož pojíždí brousící hlavy nebo je tabule skla umístěna na dvou paralelních pásových dopravnících, které ji vedou k brusným kotoučům umístěným stacionárně v rámu stroje pod tabulí skla.

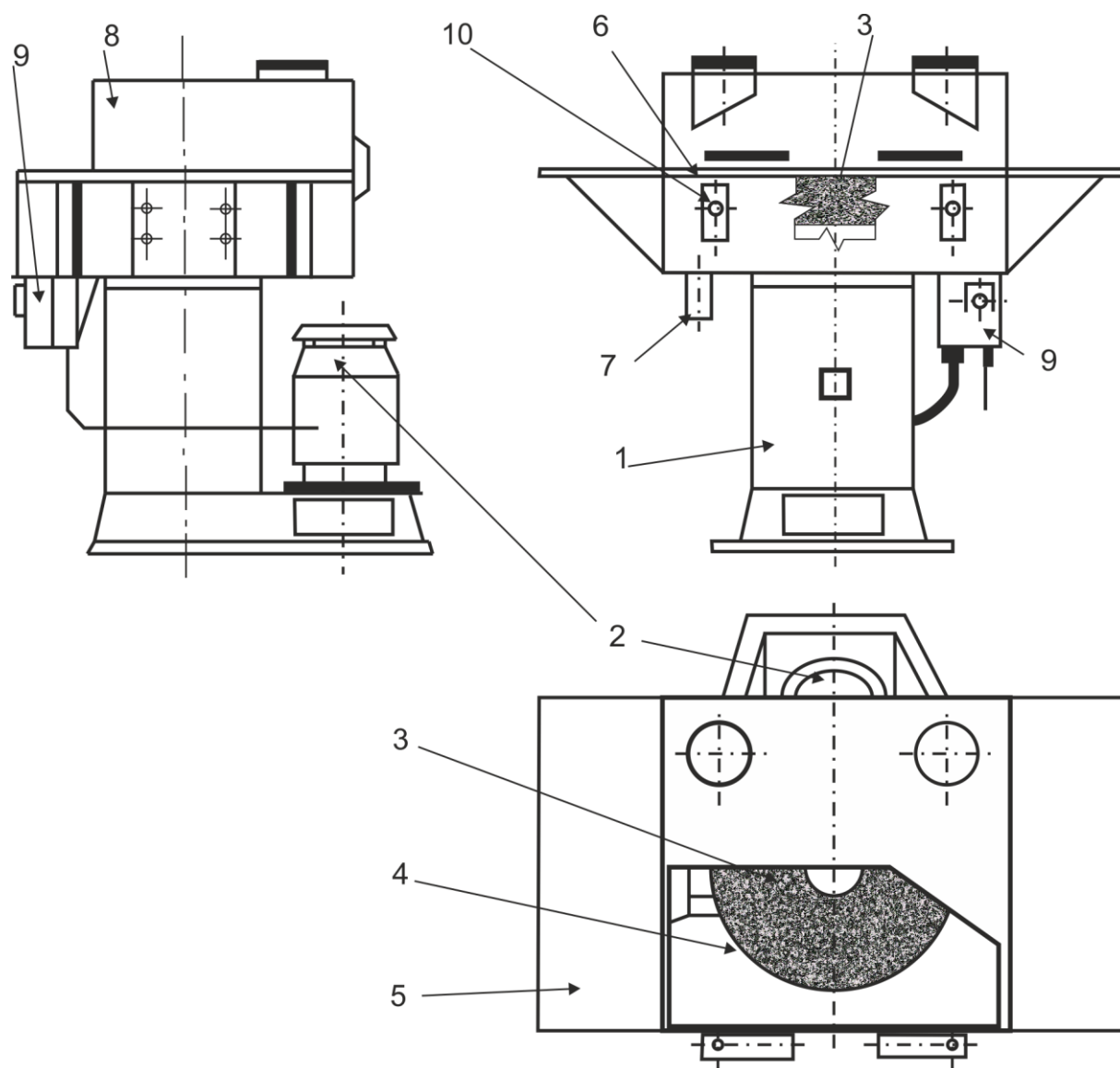
Moderní brousící a leštící stroje jsou založeny na principu CNC obráběcích center. Používají diamantové brusné kotouče, které mají uloženy v zásobníku a podle požadovaných tvarů a velikosti drážek jsou brousící hlavou vybrány. Export dat probíhá z běžných CAD formátů a umožňuje broušení prakticky jakýchkoliv vzorů.

11.1.3.4 Broušení a leštění užitého skla

Na opracování užitého skla jsou používány stroje pro ruční, mechanizované nebo automatické broušení a leštění ploch, řezů, hran, dekorů, kuželových zábrusů aj. Podle operací, které se na nich provádějí, se rozlišují na stroje hladinařské, kuličkové, rytecké, dekorační a zabrušovací.

Na Obr. 11.13 je zobrazen hladinařský stroj pro ruční rovinné broušení a leštění rovinných ploch skla volným nebo vázaným brusivem/leštivem. Brusný kotouč je u stroje HS 600 uchycen na svislém vřetenu, které je poháněno přírubovým motorem. Jednotlivé stupně otáček jsou dány řadou výměnných řemenic. Uvedený stroj se vyrábí v provedení s otáčkami 280, 335, 450 a 560 min^{-1} nebo se zvýšenými otáčkami 710 a 1120 min^{-1} .

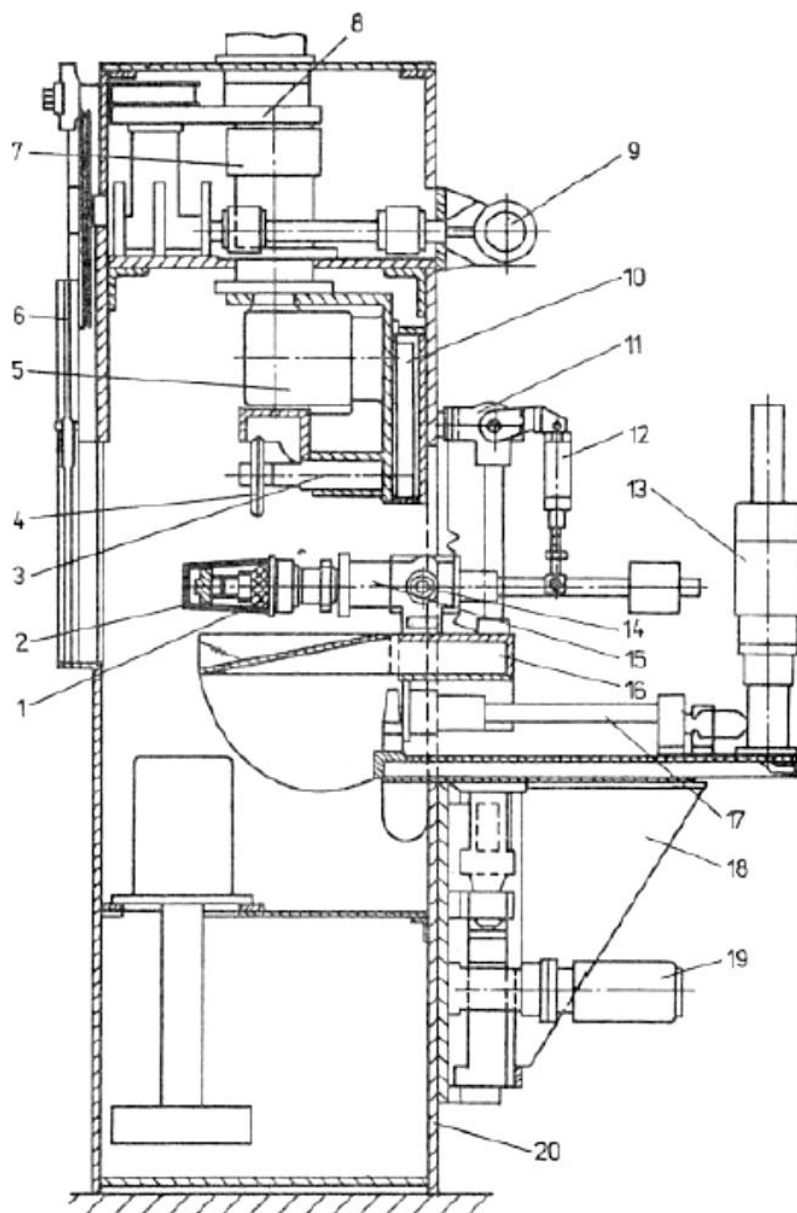
Pro ruční výrobu užitého, dekorativního a uměleckého skla je často používán tzv. kuličkový stroj. Současné stroje jsou často stavebnicové konstrukce, jejímž základem je osazený ocelový svařenec, který je možno zakomponovat do libovolného celku. Stroj je často dodáván v sestavě, která obsahuje stroj umístěný na betonovém podstavci a laminátová vana se stojanem je oddělená. Převod je prováděn pomocí řemene, například „POLY-V“ řemenem, řemenice jsou několikastupňové, například pětistupňové. Sestava je často doplněna osvětlením, pracovním stolem a odstříkovacím krytem.



Obr. 11.13 Hladinářský stroj HS 600: 1 – rám, 2 – elektromotor, 3 – brusný kotouč, 4 – bezpečnostní kryt, 5 – odkládací plošina, 6 – vana, 7 – odpad, 8 – kryt odsávání, 9 – vypínač s jističem, 10 – uchycení

U automaticky vyráběného tenkostěnného užitkového skla je po opuknutí (kap. 11.2.1) opuknutá hrana broušena. Používá se často pásové brusky a rychlost brusného pásu je zhruba 6 m.s^{-1} . U některých strojů se používá brusky s plochými diamantovými kotouči. V některých případech jsou také opuknuté hrany oboustranně sámovány.

Dekorační stroje pro automatickou výrobu jsou nejčastěji koncipovány jako stroje řadové, které mají 4 až 8 samostatných stanic. Brousí se jimi především dekory jednodušší, které však mohou být velmi rozmanité. Starší provedení stroje je uvedeno na Obr. 11.14. Řízení moderních strojů je přes počítač nebo řídicí jednotku s procesorem. Jedná se často o automaty na principu CNC strojů s vlastním zásobníkem několika nástrojů.

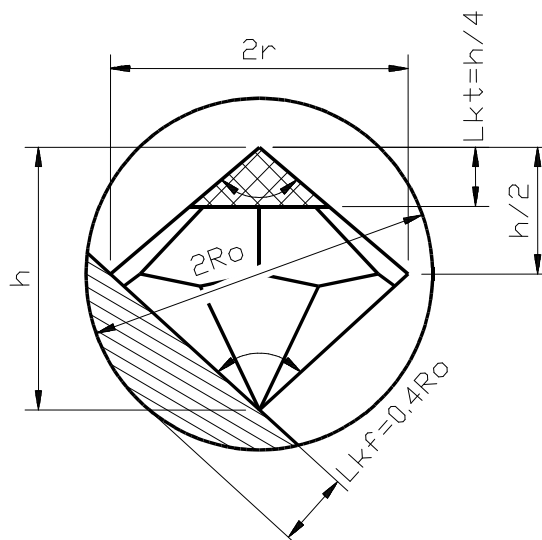


Obr. 11.14 Řez řadovým 8 stanicovým strojem: 1 – gumová úchytka sklenice přísáté vakuem, 2 – sklenice, 3 – hřídel brusného kotouče, 4 – diamantový brusný kotouč, 5 – elektromotor, 6 – posuvný průhledný kryt, 7 – ložiskové těleso umožňující natáčení brusného kotouče, 8 – ozubený řemen, 9 – pohon k natáčení brusného kotouče, 10 – řemen pohánějící hřídel brusného kotouče, 11 – naklápěcí mechanismus, 12 – vzduchový válec, 13 – elektromotor pro pohon stolu, 14 – otočný bod naklápění, 15 – otočný držák podél své osy, 16 – posuvný stůl, 17 – hřídel pohánějící posuv stolu, 18 – pevný stůl, 19 – elektromotor k výškovému nastavení posuvného stolu, 20 – rám stroje

11.1.3.5 Broušení a leštění skleněné bižuterie

Broušení skleněné bižuterie se dnes provádí na rovinných nebo válcových brusech hromadným broušením, při kterém jsou jednotlivé polotovary natmeleny na tmelkách umístěných na aparátech, které se vkládají přes klopu do brousícího stroje. Brousí se na brousících strojích – brusech. Leští se na leštících strojích – leštičkách.

Nejvýznamnějším představitelem bižuterních kamenů jsou tzv. šatony (Obr. 11.15) a proto princip výroby zde bude následně popsán.

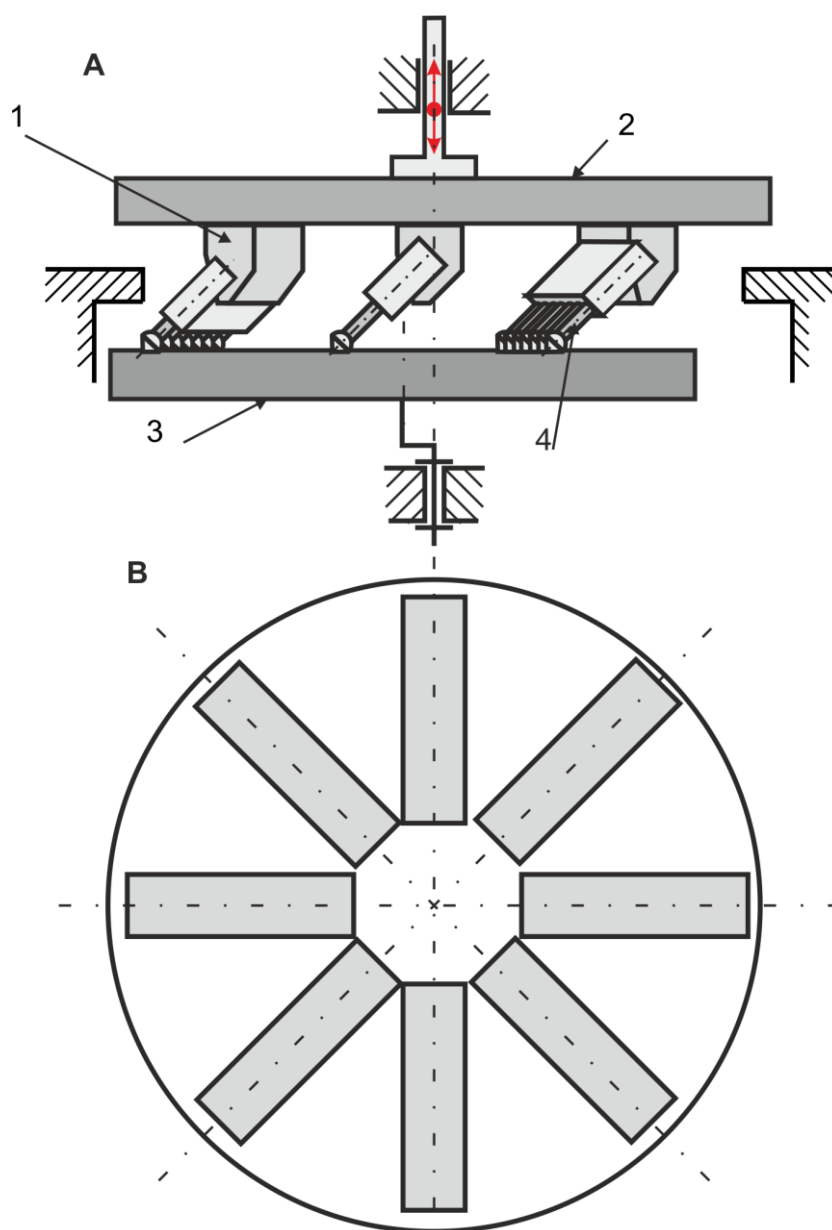


Obr. 11.15 Základní parametry šatonu

Schéma principu broušení na rovinném brusku je znázorněno na Obr. 11.16 a na Obr. 11.17 je znázorněno schéma broušení na válcovém brusku. Brusné kotouče se při broušení pohybují nejenom kolem své osy, ale v případě rovinného broušení výstředníkově a v případě válcového broušení ve směru osy tam a zpět. Zabrání se tak probroušování drah na brusných kotoučích, tím se prodlouží doba, po které je nutné provést orovnění kotoučů a prodlouží se tak jejich životnost. Broušené plochy při broušení na válcových brusech nejsou rovinné, ale u výrobků malých rozměrů je tato vada zanedbatelná. U větších výrobků, jako jsou větší šatony nebo lustrové ověsy, se provádí broušení výhradně na rovinných brusech. Hromadné broušení založené na obou popsaných principech je umožněno používáním broušicích aparátů, na nichž jsou upevněny tzv. tmelky a polotovary jsou na nich po dobu broušení a leštění natmeleny. Tmelky jsou uspořádány tak, že je jimi možno otáčet o úhel potřebný k výbrusu jednotlivých plošek, tzv. facet. Tmel se připravuje podle speciálních receptur a jeho hlavní součástí bývá kalafuna a šelak. K natmelování suroviny slouží tmelící zařízení (natmelovací a odtmelovací) a přetmelovací část. Při broušení na rovinném brusku je u současných zařízení výměna aparátů, tmelení a přetmelování automatizováno. V případě válcového brusku jsou aparáty odebírány ručně, stejně tak i tmelení a přetmelování je ruční.

U broušení na rovinném brusku jsou klopky aparátů upevněny na klak, což je „talíř“ na kterém je umístěno osm klopek s aparáty, Obr. 11.16. Proces tmelení, broušení, předělování a odtmelování je uveden na Obr. 11.18.

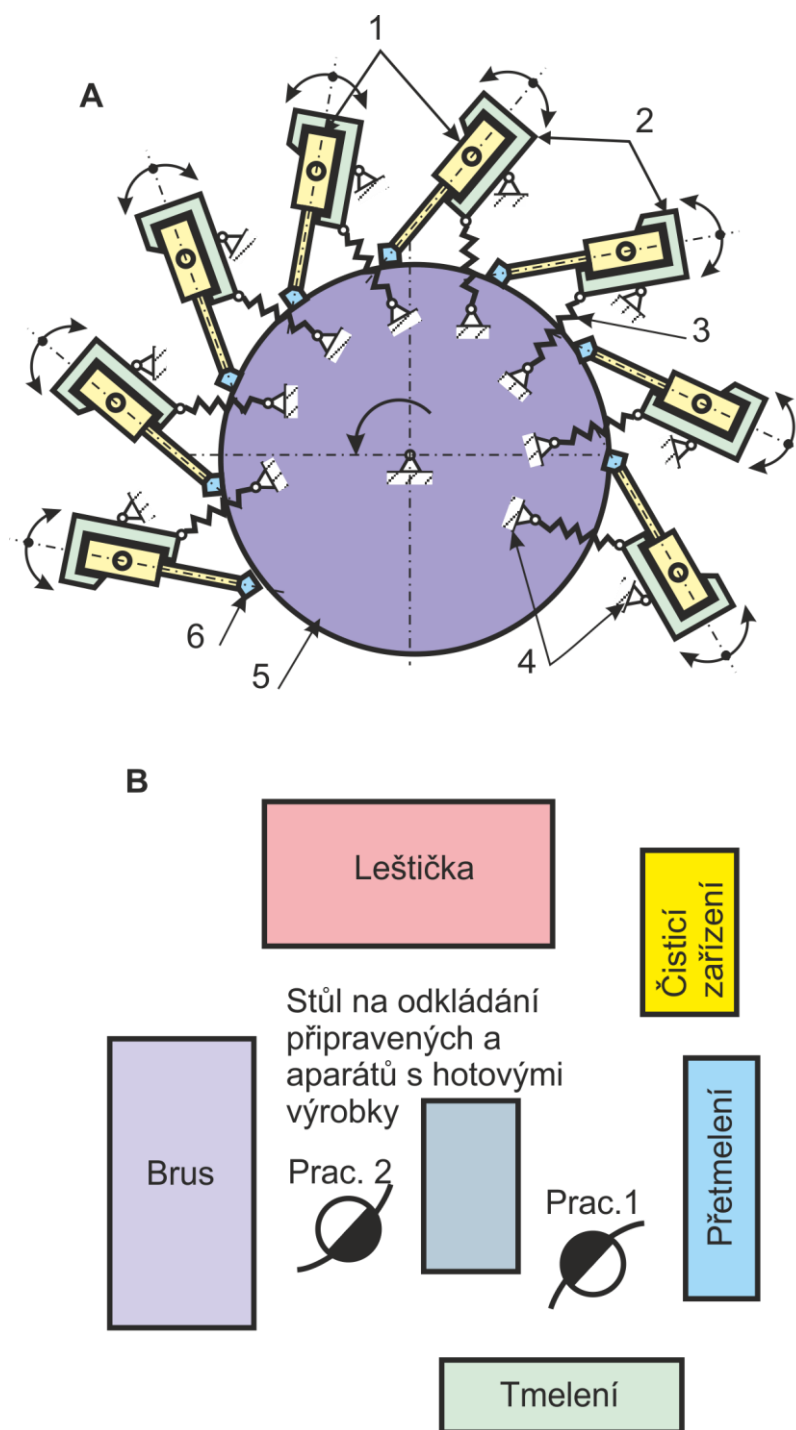
Při broušení a leštění na válcových brusech a leštičkách se používají tzv. „broušicí sestavy“ (též „složení“), Obr. 11.17 dole, složené z brusku, leštičky, tmelícího a přetmelovacího stroje a čistícího zařízení na zbavení zbytku tmelu z tmelek. Sestavy se ve svém uspořádání liší podle počtu a druhu operací. Stroje jsou obsluhovány dvěma až třemi pracovníky, proces tmelení, broušení, přetmelování a odtmelování je uveden na Obr. 11.18.



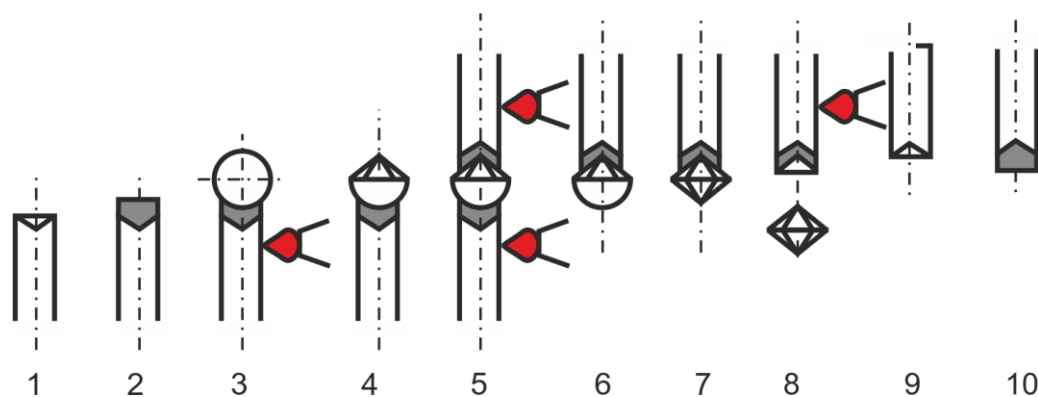
Obr. 11.16 Schéma broušení šatonů na rovinném brusku: A – princip technologie, B – rozmístění klopek na klaku, 1 – klopka s aparátem a tmelkami, 2 – klak, 3 – rovinný brus, 4 – tmelky s natmelenými polotovary pro výrobu šatonů

V další fázi výroby jsou polotovary zbaveny tmelu za vyšších teplot, propírány ve zředěné kyselině chlorovodíkové a čištěny ultrazvukem. V případě šatonů jsou v následujícím technologickém kroku broušeny plošky, tzv. „ploškování“.

Broušení a leštění šatonů, dublet a lustrových ověsů se provádí prakticky shodnými technologickými postupy z brusírenské suroviny na sestavách několika jednoúčelových strojů a nyní často na automatických výrobních strojích a linkách až po finální leštění.



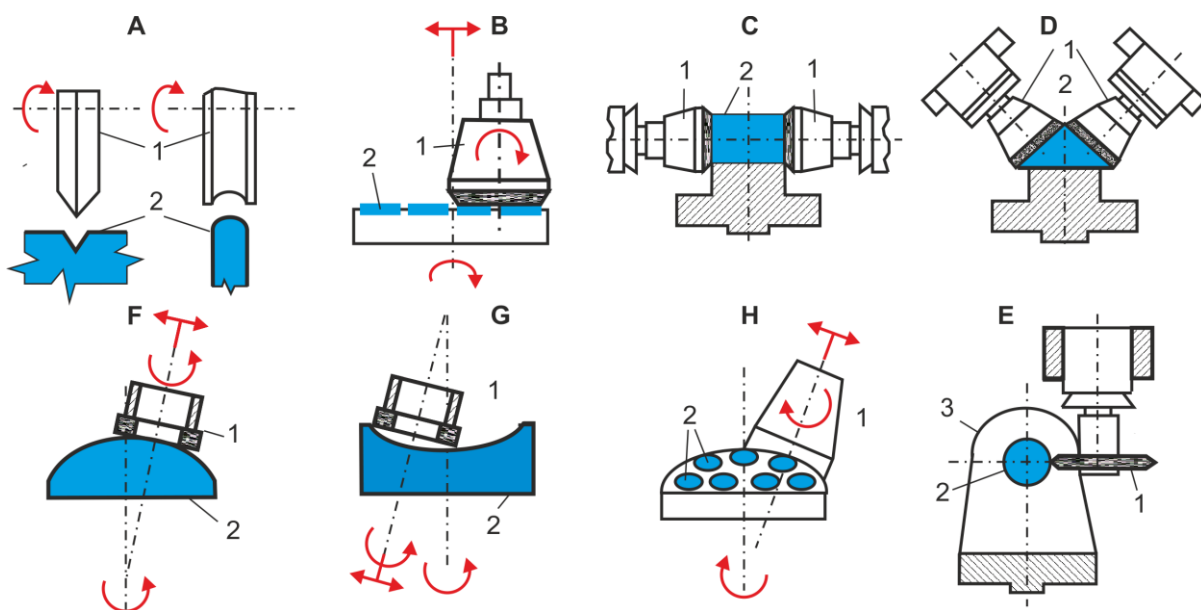
Obr. 11.17 Schéma broušení na válcovém brus: A – princip technologie, B – brousicí sestava („složení“), 1 – aparáty, 2 – klopky s naklápěním aparátů, 3 – pružina, 4 – rám stroje, 5 – válcový brus, 6 – broušený šaton



Obr. 11.18 Tmelení a přetmelování broušených a leštěných šatonů. 1 – očištěná tmelka, 2 – nanesení tmelu na tmelku, 3 – nalepení (uchycení) skleněného polotovaru v podobě kuličky nebo v podobě vytvarovaného šatonu na rotačním mačkadle, 4 – broušení a leštění vrchní strany šatonu, 5 – přetmelování, 6 – přetmelovaný polotovar na jiném aparátu, 7 – broušení a leštění spodní strany šatonu, 8 – odtmelení šatonu, 9 – očištění tmelky, 10 – nanesení tmelu, čímž je tmelka připravena pro další tmelící nebo přetmelovací operaci jako v pozici 3 nebo 5

11.1.3.6 Broušení a leštění optického skla

Stroje na broušení a leštění optického skla musí zajišťovat finální rozměrovou a tvarovou přesnost optického skleněného výrobku. Lze je rozdělit na stroje na broušení a leštění rovinného (Obr. 11.19, A, B, C, D), kruhového (Obr. 11.19, E) a sférického optického skla (Obr. 11.19, F, G, H).



Obr. 11.19 Hlavní principy broušení optického skla: A, B, C, D – rovinné broušení, E – kruhové broušení, F, G, H – sférické broušení, 1 – brusný nástroj, 2 – broušený skleněný výrobek, 3 – úchytné těleso

Univerzální broušící stroje na sférické broušení se podle Obr. 11.19 používají na broušení jednotlivých čoček nebo i rovinných ploch prstencovými nebo tabletovými nástroji. Při broušení se používají zejména nástroje s vázanými diamantovými zrny nebo karborundové a elektritové kotouče. Jako chladicí kapaliny se používá petrolej nebo vodní emulze s přísadou sulfonových olejů.

Univerzální stroje pro rovinné broušení mají podle Obr. 11.19 buď jednu nebo více broušících hlav. Slouží k broušení skleněných hranolů, kvádrů apod.

Lešticí stroje jsou obdobné konstrukce jako stroje broušící, lešticí nástroje bývají plstěné nebo z prskyřice. Jejich pracovní otáčky jsou nižší než při broušení a lešticí tlak je také nižší (asi 10 kPa). K leštění se používá lešticích suspenzí.

11.1.4 Pískování a mechanické matování

Pískování je vlastně mechanickým matováním a uplatňuje se pro účely dekorativní např. u interiérových doplňků, a také pro označení výrobků. Technologie spočívá v tryskání abraziva vysokou rychlostí proti opracovávanému povrchu, který nemusí být pouze ze skla. Výsledkem je vytvoření drsného povrchu, který snižuje propustnost skla a rozptyluje světlo. Charakteristiky povrchu jsou dány typem abraziva, dobou tryskání, rychlostí abrazivních částí a typem opracovávaného skla. Jako abraziva se pro sklo používá často korund (hnědý a bílý – na olovnaté sklo, protože nezabarvuje), karbid křemíku, granát, křemičitý písek, balotina (kuličky ze sodnovápenatokřemičitého skla). Systémy pro pískování je možné rozdělit na:

- tlakovzdušné (pneumatické) – tryskání abraziva pod tlakem vzduchu na povrch skla, uplatňuje se buď injektorový nebo tlakový systém,
- mechanické (metací) – abrazivo je vrháno lopatkami metacích kol.

Hloubka narušené vrstvy se pohybuje od 10 do 30 μm . Pravděpodobně nejrozšířenější je pískování u plochého skla, které je buď pískováno v uzavřených nebo průjezdných kabinkách, stolových nebo komorových tryskačích, v případě nutnosti lze pískovat i na volné ploše. Pískovací zařízení je převážně uzavřené s odsáváním prachu a abraziva z tryskaného povrchu. Odsávané abrazivo je odsáváno zpět do jednotky a prach oddělován do zásobníku.

Pískování je v případě plochého skla často nahrazováno sítotiskem, a to s ohledem na cenu a následné udržování takto zušlechťeného skla (na pískovaném povrchu se tvoří otisky při dotyku).

Mechanické opracování povrchu plochého skla novou technologií Eco Sphere je založeno na kartáčování povrchu štětinami z plastu, obsahujícího zrnka diamantu. Jedná se o sofistikované řešení šetrné k životnímu prostředí. Technologie umožňuje matování a vzorování skla mechanickou cestou bez použití chemických látek, přičemž jediným odpadním produktem jsou ekologicky neškodné brusírenské kaly.

11.1.5 Rytí

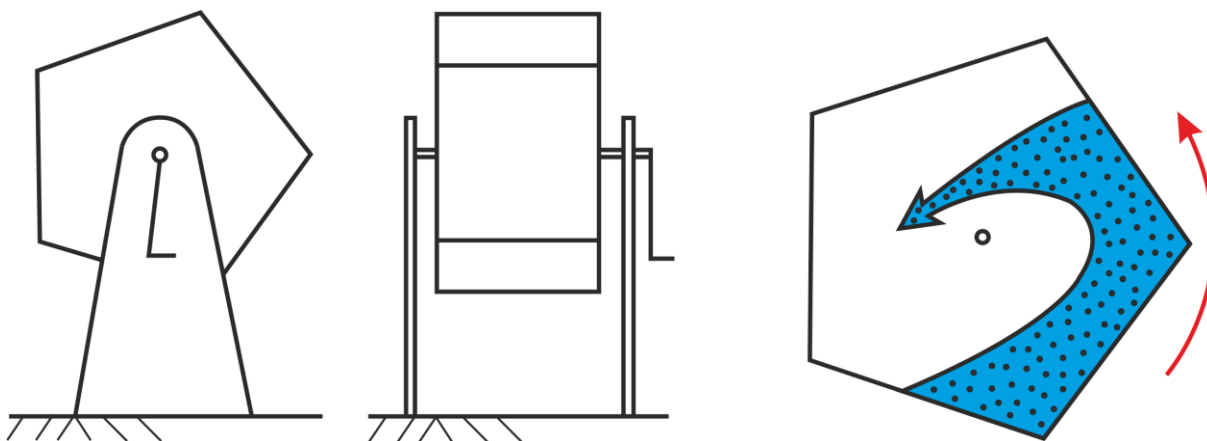
Technologie rytí skla je převážně technologií ruční a je jednou z nejpracnějších zušlechťovacích technik. Svoji podstatou se blíží broušení a leštění skla. Oproti broušení, jsou pro rytí vhodnější skla tvrdší, která kladou nástroji a brusivu větší odpor, nejsou tedy vhodné vysoce olovnaté křišťály. K vlastnímu rytí se používají jemnozrnná brusiva (nejčastěji elektrokorund nebo karbid křemíku), která se nanášejí na nástroj jako suspenze v oleji, petroleji nebo jejich směsi. Jako nástroje se používají nejčastěji měděné kotoučky o průměru 2 až 200 mm a tloušťce 0,5 až 6 mm. Nástroje samy neryjí, slouží jako nosný element pro suspenzi brusiva.

11.1.6 Šitlování, rumplování a sekání

Ve výrobě komponent skleněné bižuterie existuje mnoho mechanických postupů zpracování, typických pouze pro tuto komoditu. Jako příklady nejčastějších dalších postupů lze uvést šitlování, rumplování a sekání.

Při ručním nebo strojním mačkání a lisování skleněných výlisků odchází často při tvarování přebytečná sklovina v místě sevření formy do přelisku, tzv. broku. U větších výlisků (ověsy) se odstranění broku provádí jednotlivě stříháním (ostřihováním). Přebytečné sklo je odděleno nůžkami – především u polotovarů s přímými hranami nebo pomocí ostřihovacího strojeku, který tvoří dvě ostrá ocelová kolečka otáčející se proti sobě.

U menších a drobných polotovarů, např. po mačkání na rotačním mačkadle, Maturově mačkadle a Kopalově mačkadle (kap. 9.3.3), se provádí odstranění broku hromadně vzájemným omíláním výlisků v rotujících uzavřených bubnech s horizontální osou otáčení (hromadné odbrokování, podle zde uvedené definice se jedná o zpracování). Bubny mohou mít různý tvar, nejčastěji jsou pěti- až desetiboké o rozměrech přibližně 1 000 mm (průměr) a 300 – 500 mm (šířka). Jsou vyrobeny ze dřeva nebo plechu, mohou mít vnitřní povrch pogumovaný. Vžitý název této operace je **šitlování** (omílání za sucha), Obr. 11.20. Pohon je realizován pomocí elektromotoru.



Obr. 11.20 Pětiboký buben pro šitlování a pohyb výlisků při jeho rotaci

Při otáčení těchto bubnů je důležitá správná obvodová rychlost. Výlisky musí být vynášeny do takové výšky, aby padaly a tím se přelisky otloukaly. Bubny se plní přibližně do 1/5 objemu, kdy je dráha volně padajících výlisků nejdelší.

Po ukončení odbrokování se výrobky oddělují (brokují) na vibračních sítích od střepů, což je jedna z pomocných operací, která je dále řazena i za některé technologie zušlechťování.

V současné době se začínají objevovat linky na šitlování, které provedou celou operaci samostatně. K odstranění přelisků se v tomto případě nepoužívá bubnu, ale polotovary prochází šitlovací komorou vyloženou keramikou s rotačními kartáči se štětinami z plastu. Vlivem jejich otáčení dochází k odstranění broku. Následně je na lince provedeno brokování pomocí série sít.

Mezi zušlechťování lze řadit i omílání, pro které je vžitý název **rumplování**. Jedná se o úpravu povrchu skleněného zboží v otáčejících se sudech za přítomnosti vody a křemičitého písku nebo leštiva. Při omílání s leštivem se také používá názvu mechanické matování, které je ekologickou variantou k chemickému matování, při kterém však nedojde k vyleštění dírký. Pro omílání pouze ve vodě bez dalších látek je vžitý a používaný název „vodování“.

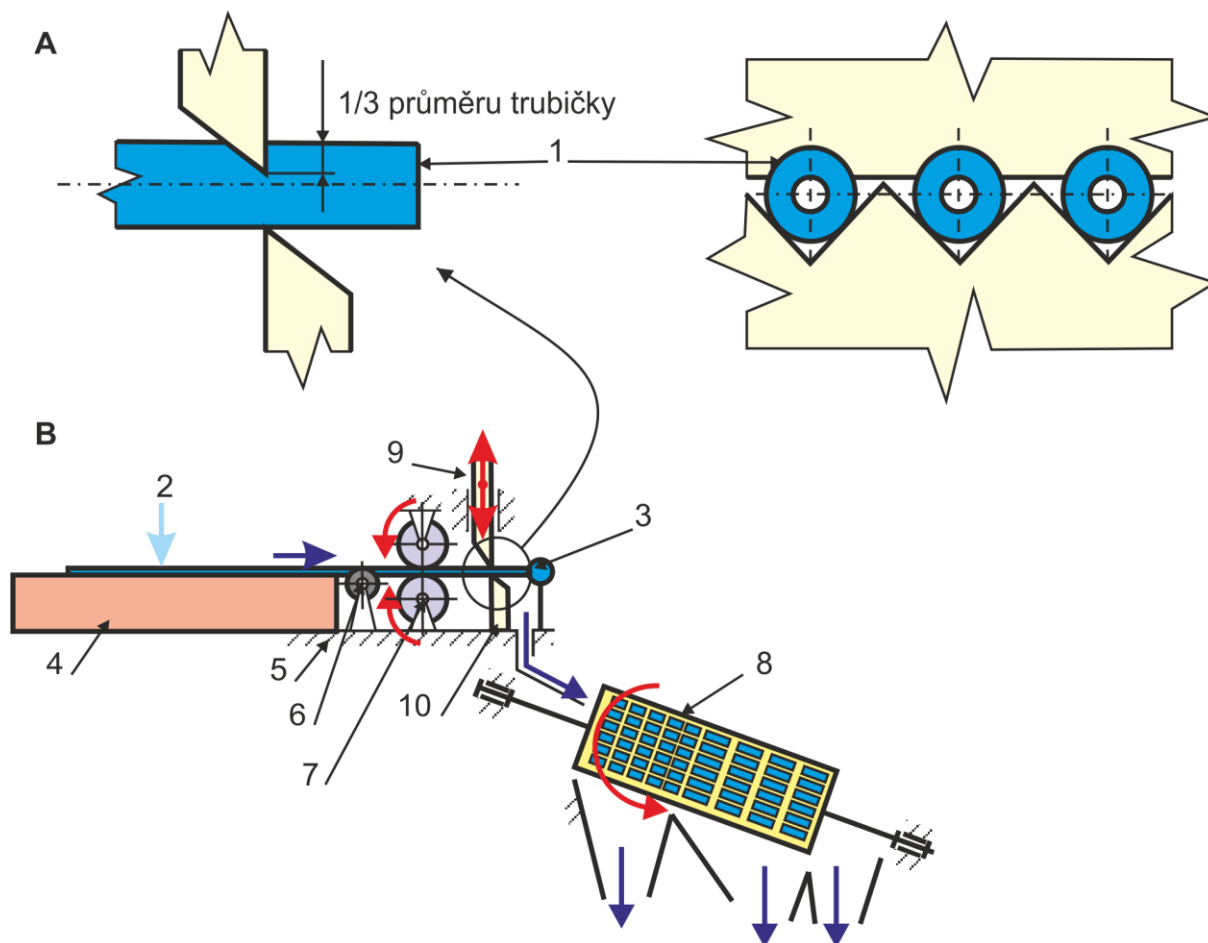
Pro omílání se používá křemičitý písek o zrnitosti v rozmezí 120 – 200 μm , který se připravuje proplavováním přes síto proudem vody. Ten se pak plní do omílacích sudů spolu se zbožím. Hmotnost zboží je 5 – 10x větší než písku a plní se na jeden sud asi 50 – 60 kg zboží, 5 až 15 kg písku a okolo 30 l vody. Sudy mohou mít (stejně jako u šitlování) různé tvary. Většinou jsou to několikahrany obvykle o průměru 700 nebo 800 mm, šířky 500 mm, jsou zhotoveny z měkkého nebo tvrdého dřeva (buk a borovice) a používají se pro všechny druhy omílání, tj. od hrubování po leštění. Pro hrubování jsou výhradně určeny sudy kovové s vnitřním vyložením taveným čedičem nebo vrstvou betonu, které jsou užívány pro hrubování menšího zboží. Používají se i sudy vyložené pryží. Rychlost otáčení závisí na rozměru výrobků a prováděné technologii. Otáčky se pohybují v rozmezí 15 – 80 otáček za minutu, menší výrobky se otáčejí rychleji a větší pomaleji. Při leštění se veškeré výrobky točí pomalu, pohon sudu je zajišťován pomocí elektromotoru.

Omíláním se dosahuje požadovaného rozměru skleněných výrobků, požadované kvality povrchu nebo obojího. Pro omílání jsou nejvhodnější výrobky o velikosti okolo 6 – 8 mm. Menší jsou příliš lehké, proto přitlačné síly, působící při omílání jsou malé a účinek omílání není výrazný. Větší výrobky jsou naopak příliš těžké a mohly by se otloukat. Z těchto důvodů se připravují často směsi, to znamená, že se společně mísí malé a velké výrobky. Směsi se připravují rovněž u takového druhu výrobků, kde hrozí nebezpečí, že se rozlámou (zejména tenké nebo dlouhé úzké tvary) nebo tam, kde je třeba zjemnit dezén. Důležité je také složení skla, protože syté barvy se omílají rychleji než transparentní.

Operace vyžaduje znalosti obsluhy co do složení rumplovací směsi, jemnosti písku, skladby perlí v sudu a celkové doby rumplování, atd. Podle požadovaného charakteru povrchu může po rumplování následovat leštění a vodování.

Mechanické **dělení sekáním** se používá pro sekané perle a rokajlové perličky. Seká se na sekacích strojích, které mají často různé konstrukční uspořádání, ale v podstatě pracují na stejném principu (Obr. 11.21). Sekací stroj se skládá ze sekací stolice a k ní připevněného strojku, který je opatřen dvěma proti sobě umístěnými břitzy z tvrdokovu nebo slinutých karbidů, Obr. 11.21 A. Z důvodu eliminace podélného praskání je horní pohyblivý břit rovný, pevný spodní břit je opatřen zuby. Tím se docílí kontakt ve 3 bodech a horní břit sjíždí jen do 1/3 průměru trubičky, zbytek trubičky příčně praskne. Horní břit se pohybuje

vertikálně s frekvencí až 1000 seků za minutu, je poháněn přes vačku elektromotorem a rychlost se dá regulovat podle požadované délky perliček. Břity se musí často brousit, aby trubičky byly odsekávány kvalitně.



Obr. 11.21 Schéma a princip sekacího stroje: A – uložení trubičky, B – schéma stroje, 1 – trubička, 2 – přitlak trubiček rukou, 3 – doraz ve formě válečku, 4 – stůl, 5 – rám stroje, 6 – válec s drážkami, 7 – válce z tvrdé pryže, 8 – síto na oddělení sekanice od střepů a dlouhých trubiček, 9 – pohyblivý nůž, 10 – pevný zubatý nůž

Trubičky jsou nejdříve rovnoměrně ručně rozděleny na stole tak, aby zapadly do drážek v drážkovaném válci (nebo drážkované dráze), drážky odpovídají drážkám pevného spodního břitu (Obr. 11.21 B). Trubičky jsou pak přitlačovány ke stolu rukou a zavedeny mezi pryžové válce, které trubičky posunují mezi břity až na doraz. Horní břit pak sjíždí do seku. Počet najednou sekaných trubiček je dán jejich průřezem a délkou nožů, která je podle konstrukce stroje 200 až 240 mm. Mezery mezi jednotlivými trubičkami představují asi 10 % jejich průměru.

Sekanice (produkt sekání rokajlových trubiček) padá do otáčejícího se válcového síta, kde se třídí polotovary od odpadu (krátké, dlouhé a střípky). Síto je často opatřeno odsáváním, protože při sekání vzniká drobný skleněný prach. Pohyb nožů a podávacích válečků je ovládán vačkou a délka sekaného zboží se reguluje rychlostí posuvu trubiček.

V minulosti proběhlo několik pokusů sekání automatizovat, ale zařízení nedosahovala výtěžnosti, kvality a spolehlivosti jako mechanizované sekání.

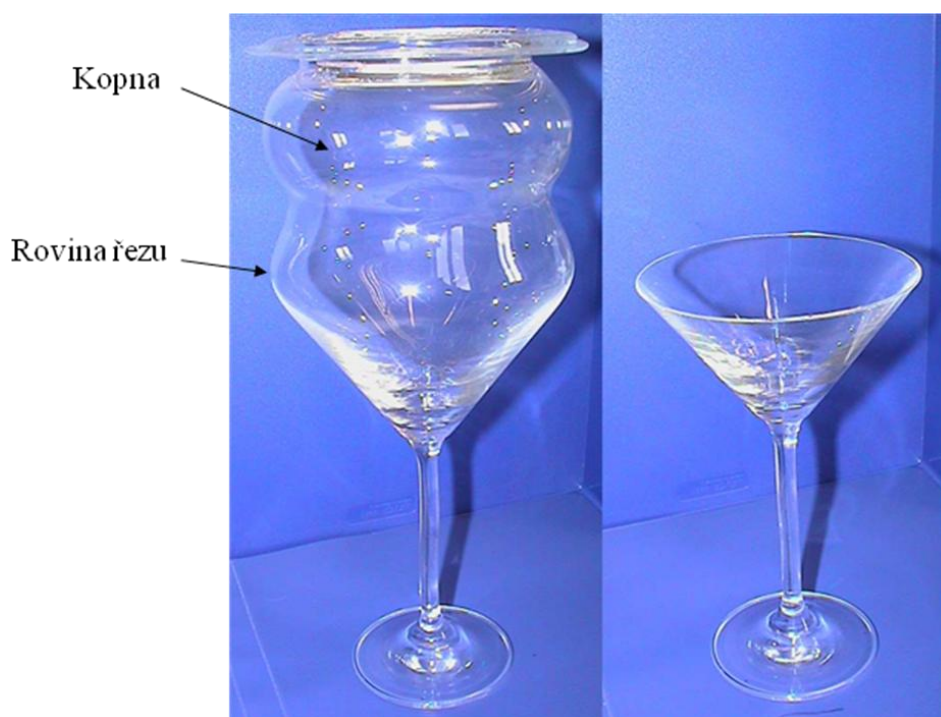
Na sekání navazuje další technologická operace. Pokud se jedná o výrobu rokajlu, sekanice je míchána se zásypem a kulacena (kap. 11.2.7), jiné výrobky mohou být rumplovány nebo broušeny.

11.2 Tepelné postupy

Tepelné postupy lze rozdělit podle účelu, kterého má být dosaženo. Může se jednat o dělení skla, kde se využívá řízeného lomu nebo lokálního snížení viskozity natolik, že dva díly skla mohou být odděleny. Do tepelných postupů lze zařadit i dělení, vrtání a dekorování laserem. Patří sem také ohýbání plochého skla a jeho tvrzení. Dále se může jednat o zlepšení povrchových vlastností skla jako leštění, povrchového napětí je také využíváno při kulacení. K tepelnému zušlechťování je řazeno rovněž nabíhání barev a dokalování.

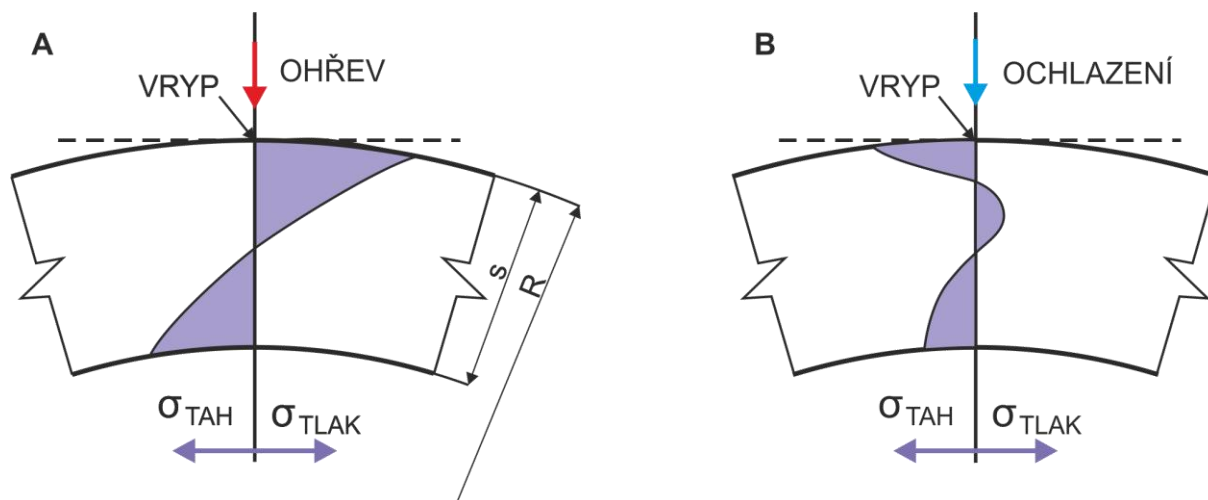
11.2.1 Pukání

Technologie pukání se využívají na oddělení hlavic (tzv. kopen, Obr. 11.22) foukaných skleněných kalíšků, pohárů, váz, dělení skleněných trubíc aj. Při pukání se využívá jevu, kdy při prudkém lokálním zahřátí předem narušeného povrchu (naškrábnutého diamantem nebo tvrdokovem) se vytvoří tahové napětí, které rysku vzniklou naškrábnutím zvětší, až dojde k úplnému oddělení obou částí. Ohřev se provádí zpravidla víceplamenným hořákem s ostrým plamenem.

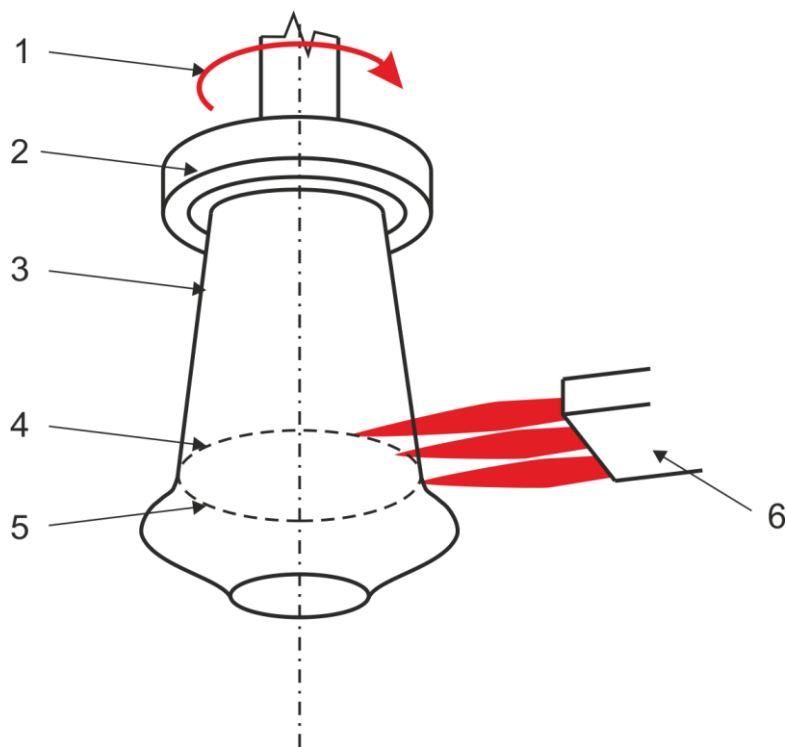


Obr. 11.22 Princip oddělení kopny

Vytváření tlakového a tahového napětí na povrchu rotační nádoby po jeho ohřevu a ochlazení je znázorněno na Obr. 11.23. Princip pukání víceplamenným hořákem je uveden na Obr. 11.24.



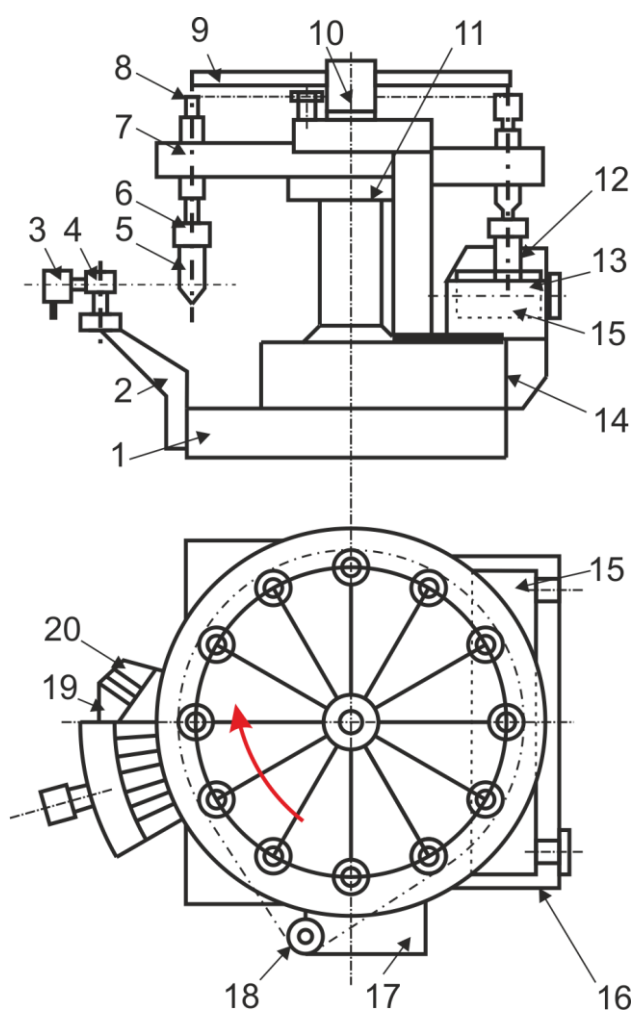
Obr. 11.23 Vytváření napětí na povrchu rotační nádoby: A – po místním ohřevu, B – po místním ochlazení



Obr. 11.24 Princip opuknutí víceplamenným hořákem: 1 - směr pohybu skleněných polotovarů, 2 - vakuový upínací prvek, 3 - výrobek, 4 - místo vrypu, 5 – kopna, 6 - hořák

Příklad karuselového pukacího stroje je uveden na Obr. 11.25. Skleněný polotovár s kopnou je v něm upnut zpravidla vakuovou nebo mechanicko-pneumatickou upínací hlavou, která se otáčí kolem své osy. Výhodou tohoto provedení je, že opuknuté kopny mohou volným pádem padat do zásobníku nebo na dopravní pás a že opuknuté hrany jsou ve stroji zabroušeny vestavěnou pásovou bruskou. Uvedený pukací stroj je dvanáctipozicový, ale běžně se v automatizované výrobě používají stroje 36pozicové. Jejich průměrný výkon je 1 200 ks.h⁻¹.

V případech obtížného pukání skla, které je vlastní sklu s nízkým součinitelem teplotní roztažnosti (varné sklo SIMAX), je třeba v místě pukání vytvořit drastičtější podmínky ohřevu a ochlazení. Používá se ostrý vodíko-kyslíkový plamen a rychlé účinné zchlazení se provádí úzkým kapalinovým paprskem soustředěným na linii lomu.



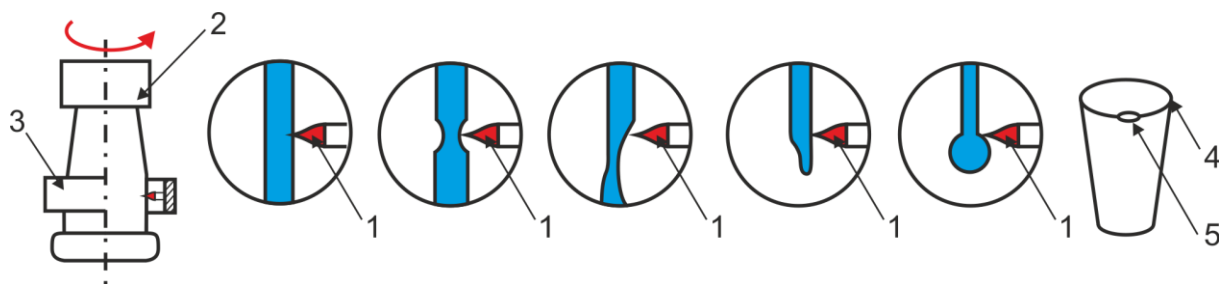
Obr. 11.25 Pukací stroj s pásovou bruskou na zabrušování opuknutých ploch: 1 - rám, 2 - rameno, 3 - směšovač, 4 - hořákový segment víceplamenného hořáku, 5 - skleněný polotovár s kopnou, 6 - upínací hlava, 7 - karusel, 8, 18 - řetězové kolo, 9 - válečkový řetěz, 10 - rozdělovač médií, 11 - sloup, 12 - opuknutý zabroušený skleněný výrobek, 13 - brusný pás, 14 - skříň pohonu stroje, 15 - válec pásové brusky, 16 - ochranná vodní clona, 17 - pohon řetězového pohonu, 18 - řetězové kolečko, 19 - zařízení na provádění vrypů, 20 - tvrdokovové kolečko

11.2.2 Zapalování

Zabroušené opuknuté okraje skleněných výrobků jsou ostré a matné (po zabroušení), a proto se musí zaoblit a vyleštit. U tenkostěnného skla se provádí tzv. zapalování. Zabroušené okraje skleněných výrobků, které se otáčejí kolem své osy, se ohřívají výkonnými hořáky až na teplotu měknutí a vlivem povrchového napětí se matný zabroušený povrch vyleští a ostré hrany se zaoblí. Zapalovací stroje bývají buď karuselové s pohybem po kruhové dráze nebo s řetězovým dopravníkem s pohybem přímočarým. Stroje s řetězovým dopravníkem jsou novější konstrukce a jejich výkon se pohybuje podle velikosti a tloušťky stěn zapalovaných výrobků od 1 100 do 3 000 ks.h⁻¹.

11.2.3 Odtavování

V případě menší náročnosti na vzhled okrajů skleněných výrobků v místě oddělení kopny je možno nahradit výrobní operace opuknutí, zabroušení a zapálení operací jedinou – odtavováním. Princip odtavování je uveden na Obr. 11.26.



Obr. 11.26 Princip odtavovací operace kopen: 1 - plamen, 2 - upínací hlava, 3 - kruhový hořák, 4 - zesílený okraj, 5 - slza

Upínací hlava bývá buď mechanicko-pneumatická nebo vakuová. Kruhový hořák bývá buď mnohoramenný nebo se štěrbinovou tryskou. Karuselové odtavovací stroje mívají 6 až 32 stanic. Jejich výkon bývá až 1 500 ks.h⁻¹.

11.2.4 Dělení, vrtání a dekorování laserem

Podobně jako dělení vodním paprskem, tak i dělení laserem umožňuje výrobu libovolných tvarů. Technologie je v tomto případě tzv. bezodpadová, tedy nevzniká při ní žádný odpad (např. střepinky při dělení vodním paprskem nebo rozbrušování skla). Oproti dělení lámáním má řez vyšší kvalitu a nemusí se většinou již dále opracovávat.

Stroje na řezání laserem mohou v podstatě pracovat na třech základních principech:

1. Laserový paprsek vytvoří na povrchu skla vryp, v jehož kořenu je tahové napětí. Sklo se pak dělí mechanicky lámáním, podobně jako při dělení po naškrábnutí.
2. Laserový paprsek vyvolá ve skle tahové napětí přesahující mez pevnosti skla a v důsledku toho se šíří ve skle trhlinka. Jedná se o dělení kontrolovaným lomem bez vedlejších trhlín.

3. Laserový paprsek natavuje a odpařuje sklo v důsledku vysoké hustoty energie, která je koncentrovaná do linie řezu.

Jednotlivé principy se liší především energií nutnou k dělení, nejnižší energie je potřeba pro první způsob a nejvyšší pro třetí. Nejčastěji používaným principem je v současné době druhý uvedený. Používají se CO₂ nebo diodové lasery, které ale vyžadují následné chlazení. Další technikou je MLBA (Multiple Laser Beam Absorption). Na rozdíl od CO₂ laserů je záření pevnolátkových laserů absorbováno celou tloušťkou skla. Postupem metody, kdy laserový paprsek je vhodným uspořádáním reflektorů absorbován sklem několikrát, se u prvotních laserem tvarovaných kontur akumuluje dostatečná energie k vyvolání indukovaného tepelného napětí v celém průřezu skla. Pro jeho dělení není tak nutné žádné přídavné chladicí médium. Tento jednostupňový proces je nejproduktivnější, oproti mechanickému přibližně o 50 %.

O technologii řezání laserem lze mluvit jako o velmi slibné a produktivní technologii dělení skla. Velmi často se lze setkat s dělením polotovarů skla pro novodobá zařízení, jako jsou mobilní telefony, tablety, krycí sklička kamer a další. Příkladem může být dělení tenkých skel. Používány jsou lasery s ultrakrátkými pulsy (v řádech pikosekund). Výsledkem je řez s nízkou drsností, což vede k vyšším ohybovým pevnostem a lze řezat i sklo tvrzené. Celkově lze dosáhnout vysokých rychlostí řezu a s tím spojenou vysokou produktivitou.

Vrtání laserem je založeno na odpařování materiálu z místa řezu. Pro tento účel se používá pulzních laserů s délkou pulzu menší než 1 ms. Samotné zkrácení doby pulzu však nestačí, musí se vybrat i vhodná metoda vrtání laserem. Vrtání laserem je možné jednotlivými pulsy, opakovanými pulsy, vyřezáváním otvorů, atd. Předností laseru je vytváření malých otvorů i v místech, kde je to pomocí jiných metod obtížné nebo nemožné. Vrtat lze kovy, plasty, dřevo, keramiku, sklo a jiné přírodní materiály. V průmyslu se pro vrtání děr používají především Nd:YAG¹⁶ lasery o výkonu 100 až 500 W.

Pro vrtání laserem platí, že čím je otvor delší, tím více se odchyluje jeho tvar od přesné geometrie, což je způsobeno rozdělením energie paprsku. Předností laserového vrtání je vytváření malých otvorů o průměru 10 μm až 100 μm. Otvory mohou být kruhové i tvarové, délka vrtaného otvoru může být až 50 mm.

Laser je dnes také používán ke svařování drobných skleněných částí a zušlechťování skleněných výrobků zdobení.

Rostoucí oblibu vykazuje v poslední době i laserové popisování skla nebo i vnitřní dekorační gravírování. Na povrchu skla laser může vypálit určitý, třeba i barevný motiv, připravený jinou technologií (např. síťotiskem), ale častějším využitím laseru při popisu skla je metoda se změnou povrchové topografie. V místě dopadu fokusovaného laserového záření na povrch skla dojde k částečnému odpaření skloviny a jejímu povrchovému popraskání. Na vzniklých trhlinkách dochází k rozptylu světla a tím se docílí zářivého vzhledu vzoru.

¹⁶ Nejpoužívanější pevnolátkový laser. Aktivním prostředím je neodymem dopovaný yttritohlinitý granát Y₃Al₅O₁₂. Pracuje o vlnové délce 1,06 μm v pulzním i kontinuálním režimu.

Pro popisy a dekoraci skla jsou vhodné pulzní lasery s krátkou dobou pulzu a výkonovou hustotou. Mohou to být TEA-CO₂ lasery, excimerové lasery nebo diodou čerpané pevnolátkové Nd:YAG lasery. Nákladnější excimerové lasery pro svou kratší vlnovou délku v UV oblasti spektra a vyšší jakost paprsku se hodí spíše pro popisování jemných, křehkých dílů, jako je třeba optické sklo. Při popisování Nd:YAG laserem se dosahuje vysoké rychlosti popisu rozkmitáním zaostřeného paprsku pomocí scanneru.

Při vnitřním (většinou dekoračním) gravírování leží bod ohniska paprsku uvnitř skleněného předmětu, kde koncentrovaný vklad energie vytváří místně omezené trhlinky, přičemž povrch zůstává nepoškozen. Vlivem rozptylu světla se mikrotrhlinky jeví jako světlé body. Vzájemným pohybem paprsku laseru a skleněného předmětu ve 2D nebo 3D souřadnicích je možné pak z jednotlivých bodů vytvářet i celé obrazce.

Laserem lze spojovat skleněné trubky, sklo s kovem, uzavírat skleněné ampulky a jedna z posledních novinek z ústavu Laser Zentrum Hannover je leštění skla, zvláště pak skla optického.

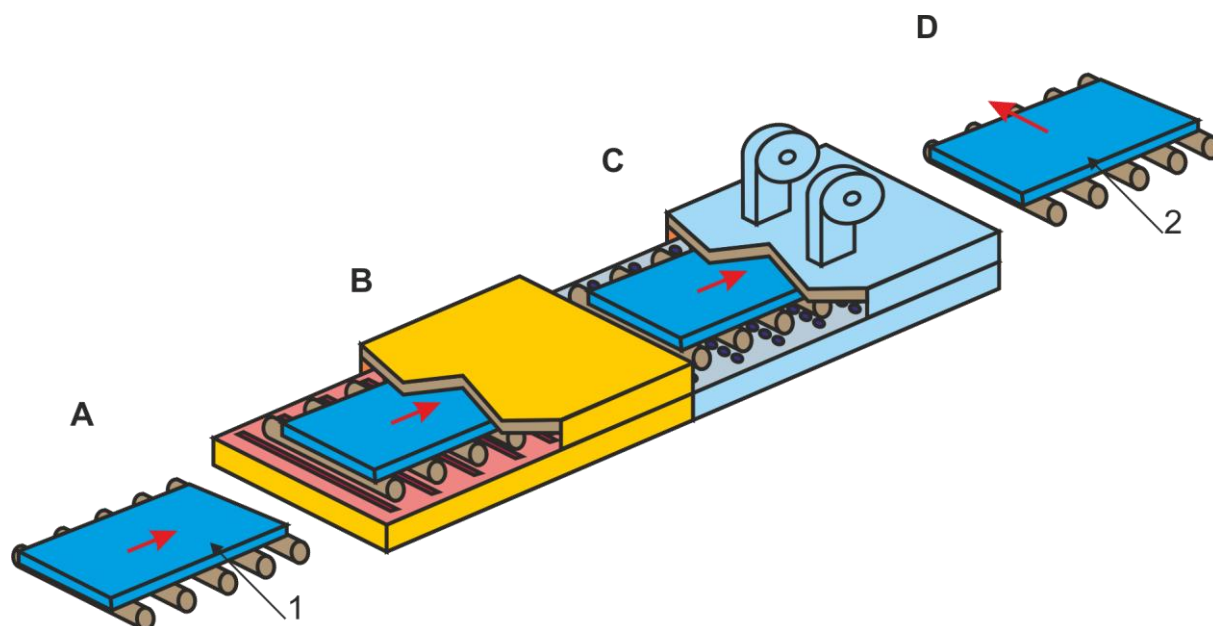
11.2.5 Tvrzení a ohýbání plochého skla

Bezpečnostní tvrzené sklo (nesprávně nazýváno kalené) se vyrábí vyhřátím skla na teplotu blízkou bodu měknutí a následným prudkým a stejnoměrným ochlazením. V povrchové vrstvě skla se tak vytvoří rovnoměrné trvalé tlakové napětí, které zvyšuje mechanickou pevnost a tepelnou odolnost. Při rozbití se tvrzené sklo rozpadne na velký počet tupohranných úlomků (krachlí), které nemají ostré řezné hrany a tak se snižuje možnost poranění. Tvrzené sklo lze následně obtížně mechanicky opracovat, a proto veškeré mechanické zpracování musí být provedeno před jeho tvrzením.

Tato technologie zušlechťování je používána především pro ploché sklo a užitkové sklo ve formě skleniček (např. tzv. Duritky). Následující text je zaměřen na výrobu plochého bezpečnostního tvrzeného skla, které může být rovné nebo ohýbané. Technologie se uplatňuje u autoskel a u stavebního exteriérového a interiérového skla.

Základem technologie je ohřívací pec, ochlazovací zařízení a mechanismy umožňující manipulaci s tvrzenými přířezy. Možné uspořádání zařízení je uvedeno na schématu na Obr. 11.27. Zušlechťované ploché sklo je transportováno zařízením ve vodorovné poloze na válečkovém dopravníku. Plynule prochází ohřívacím prostorem, kde je použito radiačního nebo radiačně-konvekčního ohřevu. Po dosažení potřebné teploty je sklo ochlazen vzduchovými sprchami, které provedou potřebné prudké ochlazení. V tomto případě se jedná o ochlazení silným proudem vzduchu hnaným výkonnými ventilátory. Jsou konstruována i zařízení pro tvrzení tabulového skla ve svislé poloze.

Ploché sklo je možné i ohýbat a následně tvrdit. Ohýbání je prováděno na gravitačních (propadových) formách nebo lisováním.

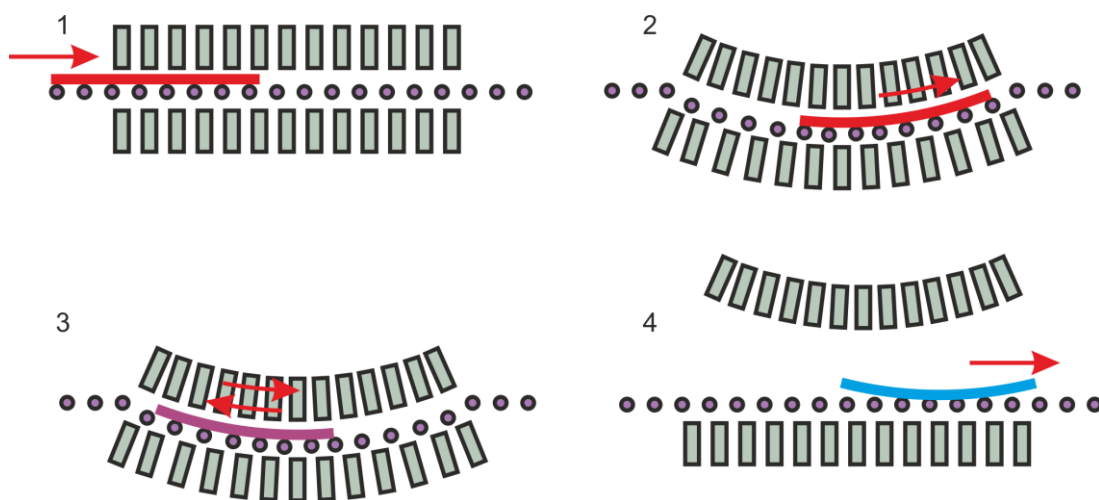


Obr. 11.27 Schéma linky na tepelné tvrzení a zpevňování plochého skla: A – nakládací pozice, B – nahřívací stanice, C – stanice tvrzení, D – odnímání skla, 1 – přířez skla, 2 – vytvrzené sklo

Jak bylo zmíněno, ohýbané sklo může být netvrzené a tvrzené. V případě netvrzeného skla je technologie založena na následném chlazení podle chladicí křivky tak, aby ve skle nevznikalo nadlimitní trvalé napětí. V případě tvrzeného skla je místo pozvolného chlazení použito rovnoměrného prudkého ochlazení. Technologie ohýbání může být čistě samovolná (tzv. gravitační tvarování) nebo s mechanickým působením (pomocí forem).

Při gravitačním tvarování je sklo umístěno na formu ve vodorovné poloze, ohříváno a po dosažení potřebné teploty (u běžného plochého skla kolem 600 °C) je sklo vlastní tíhou tvarováno. Forma může tvořit celek, pak povrch skla může být ovlivněn kontaktem s povrchem této formy. Forma ovšem může být také ve formě rámu, na který se sklo usadí a pomocí přesného řízení teplotního režimu v peci dojde k tvarování skla bez kontaktu s formou (kromě obvodového rámu). Tento princip se uplatňuje u autoskel, na jedné straně tunelové pece je zakládáno sklo na kovové rámy, které jsou unášeny na vozíku a prochází postupně jednotlivými sekcemi pece, ve kterých je přesně řízena teplota. Hotové výrobky vyjíždějí z pece a jsou ještě chlazeny na vzduchu.

Moderní ohýbací zařízení mohou být například řešena se softwarově ovládaným flexibilním dopravníkem, který při oscilačním pohybu přímo tvaruje ploché sklo, Obr. 11.28. Uvedený systém nevyžaduje žádné formy, což vede k významnému zvýšení kapacity i flexibility zařízení. Tvar ohybu se mění na základě softwarového zásahu.



Obr. 11.28 Schéma tvarování skla s jedním poloměrem křivosti v peci bez forem (osa tvarování napříč pohyb dopravníku): 1 - přisun rovného přířezu, 2 - tvarování přestavením flexibilního dopravníku, 3 - chlazení při vratném oscilačním pohybu skla, 4 - ustavení válečkového dopravníku do roviny a posun tvarovaného skla do chladicí sekce

V případě skla tvrzeného je za tvarovací zařízení zařazena sekce pro tvrzení skla. Pro tento způsob se používají speciální formy umožňující vzduchové chlazení obou povrchů skla.

11.2.6 Leštění teplem

Vytvoření hladkého povrchu výrobků, zaoblení ostrých hran apod. se někdy provádí lokálním zvýšením teploty na takovou hodnotu, aby k dosažení požadovaného efektu došlo účinkem sil povrchového napětí. Toho lze dosáhnout pomocí plamenů hořáků umístěných na zapalovacích zařízeních, či přímo na hořáku u stolu z volné ruky. Častěji (u hromadné výroby bižuterie) se pro tento účel používají speciální elektrické pece. Postup se nazývá leštění teplem (také používán název leštění ohněm).

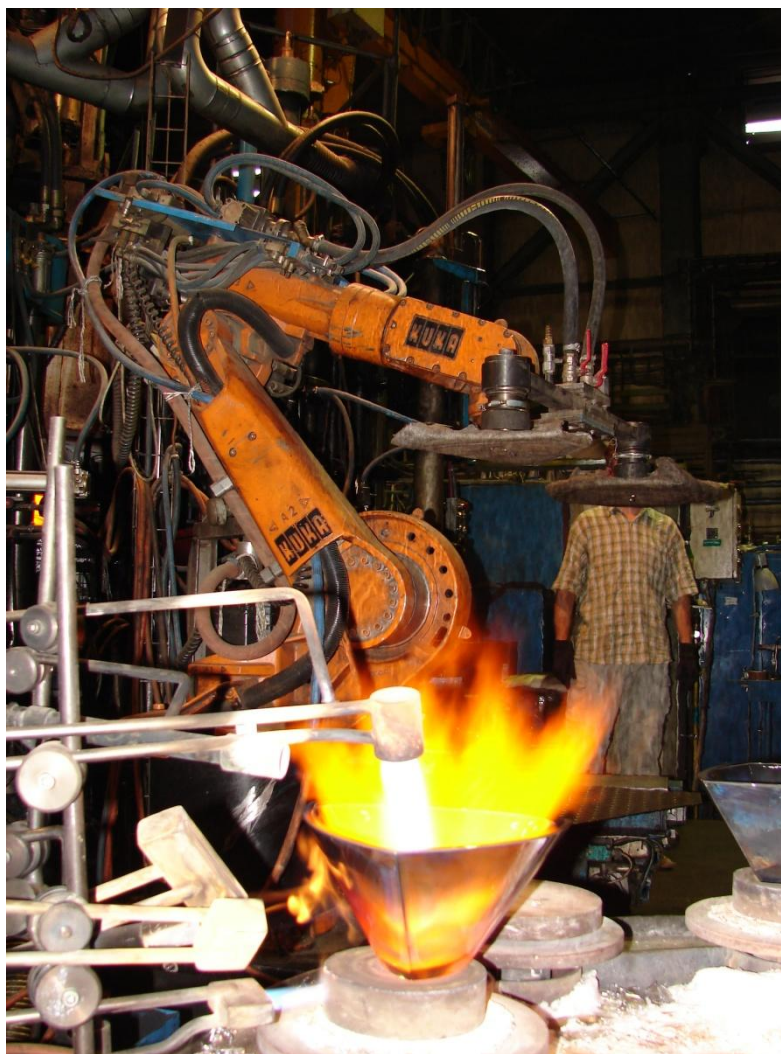
Leštění (působení sil povrchového napětí) probíhá v tenké povrchové vrstvě a teplota musí být vyšší než teplota měknutí. Ohřátí musí být tak rychlé, aby se sklo stalo „tekutým“ pouze na povrchu leštěné části nebo povrchu celého výrobku, ale vnitřek musí mít teplotu nižší, aby se výrobek nedeformoval. V tomto případě se s výhodou využívá nízké tepelné vodivosti skla. Ve skutečnosti se dá o leštění teplem mluvit jako o přežíhání skla, které slouží k vyrovnání veškerých nerovností v povrchové vrstvě, které vznikly v předchozích operacích nebo jako důsledek nešetrného zacházení (poškrábání, malá zaštípnutí atd.), případně technologického procesu (broušení). Některé vady lze takto odstranit ihned po zhotovení výrobku ještě „za tepla“. Výrobek však může projít chladicím procesem, pak se zpracuje za studena, např. broušením a vady se odstraní opětovným vyhřátím a leštěním teplem. Takto se zušlechťují některé druhy perlí, levnějších ověsů, knoflíky, dublety. Teplem se mohou leštit také velké výrobky, jako jsou vázy, apod.

Lešticí pece pro bižuterii jsou pásové tunelové nebo komorové (paleta s plechy). Dříve se k leštění používalo pecí vytápěných dřevem, pak plynem a dnes se výhradně užívají pece elektrické, které umožňují přesné nastavení teplotního režimu a tak i dosažení stabilní kvality leštěných výrobků. V komorových pecích je teplotní režim nastaven výší teploty a jejím

časovým průběhem. U tunelových pecí je režim nastaven teplotou jednotlivých sekcí a rychlostí pohybu pásu.

Příkladem je tunelová pec se třemi sekcemi: 1. náběh 500 až 650 °C, 2. leštění 650 až 800 °C, 3. chlazení 500 až 650 °C, kdy přesné teploty jsou stanoveny s ohledem na typ skla a jeho viskozitní křivku. Polotovary pro leštění (velikosti 3 až 8 mm) jsou dávkovány buď ručně nebo pomocí vibračních dávkovačů na obdélníkové sibalové talíře, které dobře udržují teplotu. Tyto talíře procházejí tunelovou pecí a na konci pece jsou výrobky vysypávány do nádob a tříděny na vibračních sítích. Pro správné leštění se na peci nastavuje vedle teplot jednotlivých sekcí i rychlost dopravníku, který unáší talíře.

V případě leštění teplem dekorativního a užitkového skla se lze setkat také s automatizací a s nasazením robotů. Příkladem může být linka s průmyslovým angulárním robotem Kuka, Obr. 11.29. K tomu, aby robot mohl fungovat je nutné mimo jiné vyřešit uchopování horkých polotovarů (okolo 500 °C), které jsou tvarově členité a rozmanité.



Obr. 11.29 Angulární robot Kuka pro manipulaci při leštění vázy

11.2.7 Kulacení

Kulacení se provádí u bižuterního sortimentu, který se nazývá rokajl. Jedná se o hromadné tepelné zpracování povrchu useknuté rokajlové trubičky daných rozměrů (technologíí sekání, kap. 11.1.6), které vede k zaoblení vnějšího povrchu při současném zachování dírký v příslušných tolerančních rozměrech. Povrch perliček bude lesklý.

Mechanicky nasekaná a vytříděná sekanice se smísí se zásypem a kulatí se za zvýšené teploty na rokajl. Zásyp je tvořen mletým dolomitem a kaolinem, kdy je pro zdárný průběh kulacení důležitý poměr těchto složek. Sekanice se zásypem tvoří kulaticí směs a brání „slepení“ perliček a zalepení dírký. Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ uhličitan hořečnatovápenatý) se při teplotě 650 až 750 °C rozkládá a uvolňuje oxid uhličitý, který kulaticí směs kypří a vytváří tzv. fluidní stav. Tento stav snižuje možnost přímého kontaktu perliček a tím i jejich slepení. Protože reakce spotřebovává teplo, působí dolomit také jako stabilizátor teplotních podmínek během kulacení. Kulatí se v peci při teplotách 600 až 800 °C. Při těchto teplotách je u daného složení skloviny viskozita natolik nízká, že se uplatňuje povrchové napětí a jeho vlivem se perličky zaoblí. Určité výrobky se kulatí i opakovaně (tzv. doleštění), popř. s mezioperačním krokem moření povrchu v kyselině.

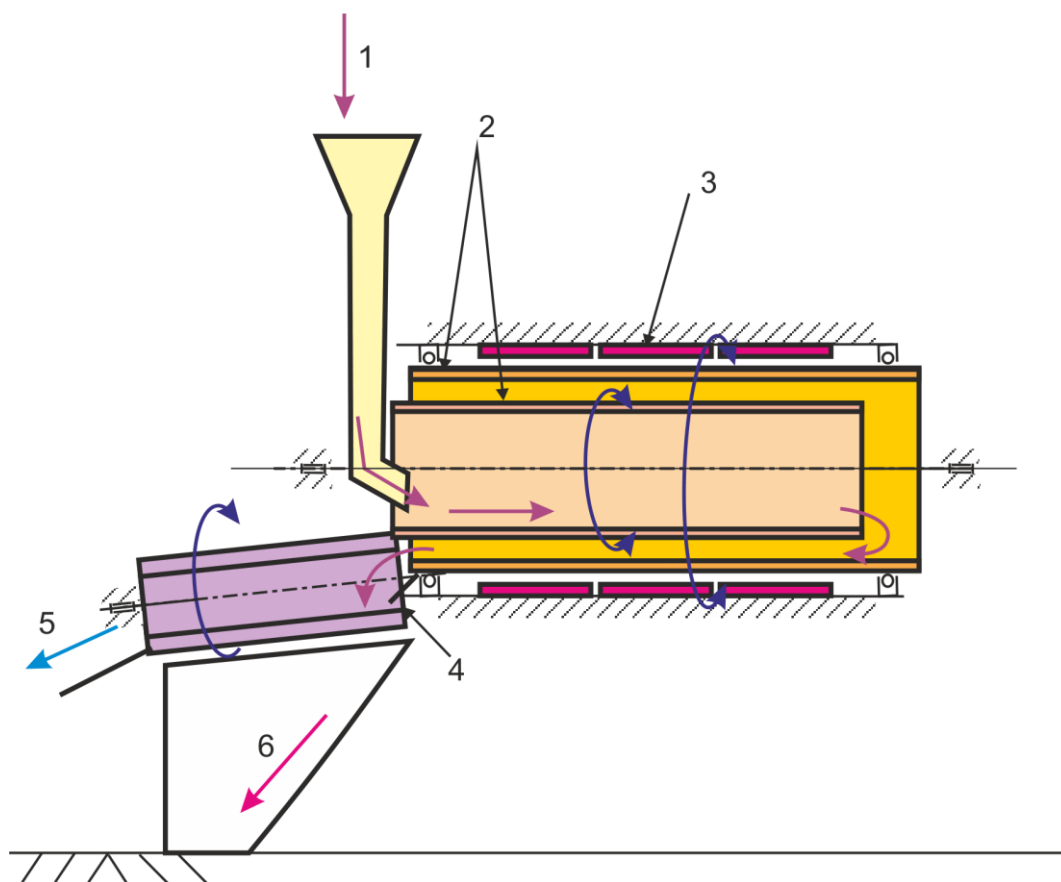
Ke kulacení rokajlu se používají především:

- mechanizované plynové pece,
- elektrické kontinuální pece.

Typ pece je volen s ohledem na množství, velikost sortimentu a barvu.

Kontinuální elektrické kulaticí pece (tzv. „ekupy“) jsou dva do sebe vsazené válce délky asi 3 m vyrobené ze žárovzdorné oceli opatřené vnitřní spirálovou dráhou. Jsou uloženy v prostoru vytápěném elektrickými odporovými elementy (Obr. 11.30). Kulaticí směs se zakládá do vnitřní trubky a jejím otáčením (pohyb je reverzační) je posouvána na druhý konec, kde přepadá do vnější trubky, kterou je posouvána opačným směrem a ústím vnější trubky vypadává do otáčejícího se šestibokého síta, oddělujícího zásyp od perliček.

Zbytky zásypu se v další fázi po kulacení odstraní praním ve zředěné kyselině chlorovodíkové za míchání, dále praním ve vodě. Zboží se suší ve vyhřívaných odstředivkách a dále v elektrické kontinuální peci (pásová pec). Následuje třídění, dírkování a třídění na kulatost.



Obr. 11.30 Automatické kulacení v elektrické peci, tzv. EKUP: 1 – násypka pro kulací směs, 2 – vnitřní a vnější buben se šnekovým drážkováním s reverzačním otáčením, 3 – elektrický odporový ohřev, 4 – oddělení sekanice od zásypu v šestibokém otáčejícím se sítu, 5 – kulacené polotovary se zbytky zásypu, 6 – oddělený zásyp padající na dopravní pás směřující k regeneraci kulací směsi

11.2.8 Nabíhání barev a dokalování

Některá tepelně nestabilní skla je nutno po utavení ještě jednou tepelně zpracovat, aby došlo k žádoucímu vybarvení nebo zakalení. Častým případem je výroba polotovarů pro skleněnou bižuterii. Tato operace je nazývána nabíhání, pro získání žádoucího zabarvení a dokalování, pro získání požadovaného zákalu. Pokud se tato operace neprovede u suroviny, je nutno ji provést dodatečně při výrobě zboží jako jednu z technologických operací, ke které jsou používány tzv. nabíhací a dokalovací pece. Požadovaného zabarvení (zakalení) výrobku je dosahováno řízeným teplotním režimem po určitou dobu expozice. Proto musí tyto pece umožňovat nastavení přesného režimu zahřívání výrobků na teploty, při nichž dochází ke stabilizaci zabarvení nebo k docílení potřebného zákalu předepsaným průběhem teplotní křivky, tzv. teplotního spádu. Proto jsou tyto pece také někdy nazývány „spádové“. Tato technologická operace se provádí i dvakrát. Konstrukčně jsou dvojího typu – tunelové nebo rotační. V uvedených pecích je možné také tzv. dokalovat, tedy zpracovávat tepelně nestabilní skla z hlediska vzniku zákalu.

Tunelové pece jsou vytápěné tunely ze žárovzdušného izolovaného zdiva, rozdělené na několik sekcí se samostatnou teplotní regulací. Tunelem je zboží unášeno většinou

pomocí ocelového žárovzdorného dopravního pásu, podle velikosti výrobků buď volně nebo na vhodné žárovzdorné podložce. Rychlost pohybu pásu je plynule regulovatelná, takže spolu s regulací teplot jednotlivých sekcí lze teplotně i časově zajistit předepsanou teplotní expozici.

Rotační nabíhací pece jsou vhodné pouze pro zpracování skleněných kuliček, kdy teploty nabíhacího procesu jsou vyšší než teplota deformace skla a kdy by při stacionárním uložení zboží na podložce docházelo k jeho deformaci.

11.3 Chemické postupy

V případě chemických postupů se jedná převážně o finální úpravy povrchu výrobků, které se mohou navzájem kombinovat. Chemicky lze zušlechťovat prakticky všechny skupiny výrobků. Nejčastěji je to ploché sklo, užitkové sklo a polotovary pro skleněnou bižuterii.

Při chemickém zušlechťování je jakost výsledného povrchu často dána jakostí a čistotou všech vstupních surovin. Jednou ze základních je voda, která je upravována z pitné vody z vodovodní sítě pomocí demineralizační kolony, jež zbavuje vodu chlóru, fluoru, vápníku atd. Voda se pak označuje jako demineralizovaná nebo demi voda.

Chemické postupy zahrnují vcelku široké spektrum procesů s různým zaměřením. Obecně lze chemické postupy rozdělit na:

- chemické leštění, leptání a matování,
- zpevňování skla iontovou výměnou,
- vakuové napařování,
- magnetronové naprašování,
- pyrolitické pokovování,
- lakování, malování a lazurování,
- sítotisk,
- vrstvy na skle.

11.3.1 Chemické leštění, leptání a matování

Chemickým **leštěním skla** se rozumí odstraňování nerovností povrchu skla až do vyhlazení. K leštění se používá směs kyseliny fluorovodíkové spolu s kyselinou sírovou. Strukturu skla narušuje kyselina fluorovodíková a při reakcích s povrchem skla dochází na povrchu k tvorbě fluoridů, které jako produkty chemické reakce pevně ulpívají na povrchu skla. Další působení kyseliny fluorovodíkové umožňuje přítomnost kyseliny sírové, která vzniklé reakční produkty rozpouští. Procesu napomáhá rovněž odstraňování reakčních produktů z povrchu skla v průběhu reakce vzájemným pohybem skla a lázně.

Chemické leštění se používá po hrubém broušení, zejména u dekorů, kde by bylo obtížné mechanické leštění. Dochází k lesklému leptání – směs odleptává vystupující mikroskopické nerovnosti. Výhodou je mimořádně vysoký lesk skla po dokončení, nedochází k zaoblení vnitřních hran výbrusu a lze leštit více výrobků najednou. Leští se střídavým ponorem výrobku do leštící lázně (na dobu 15 až 20 s) a do oplachové vody. Počet ponorů závisí na složení skloviny a na vyčerpání lázně, protože některé z probíhajících reakcí jsou nevratné. Dříve se při leštění výrobky ukládaly do košů, které se pomocí kladky ponořily do

roztoku, dnes se užívají automatické bubnové leštičky. V těchto leštičkách dochází k leštění skla v uzavřené vaně při rotačním pohybu bubnu, střídavým působením lázně leštící a lázně oplachové. Po vyleštění se sklo omývá čistou vodou v jedné nebo dvou otevřených vanách. Součástí zařízení jsou také zásobníky pracovních lázní, zařízení pro dávkování kyselin a nádrže pro sedimentaci kalů. Zařízení jsou dodávána v různých modifikacích dle požadované technologie leštění a potřeb provozovatele.

Celkovou nevýhodou této technologie je obtížná manipulace s kyselinou fluorovodíkovou, která je vysoce zdraví škodlivá, nutnost účinného odsávání a zachycování plyných produktů, nákladná neutralizace, nutnost speciálního zacházení se vzniklými kaly a celkově vysoká cena technologie z důvodu přísných ekologických a hygienických předpisů.

Leptání a chemické matování skla (matové leptání) jsou dekorační techniky, které využívají působení kyseliny fluorovodíkové a jejích solí na povrch skla, kdy dochází k rozpouštění některých složek skla a konečný povrch je pokryt jemnými krystaly nerozpustných fluoridů.

Pokud se pokryje povrch skla nějakou kyselinovzdornou vrstvou (např. voskem), na některých místech se částečně obnaží a takto je vystaven účinkům leptací lázně, dojde na těchto místech k vyleptání povrchu, tzv. hlubokému leptu, který se využívá hlavně u dekoračního skla a provádí se za účelem vytvoření matného povrchu. Používá se nejčastěji lázni nebo pasty hydrogenfluoridů např. hydrogenfluorid amonný $(\text{NH}_4)\text{HF}_2$. Chemické matování je dnes nahrazováno mechanickým.

S částečnou automatizovanou **technologií leptání** se lze setkat u užitkového skla. Jedná se o zařízení jako je voskoryt a samotné linky na leptání. Stroje pro hromadné rytí do vosku vycházejí z relativně starých principů (tzv. gilošovací stroje). Mají několik pozic, na kterých se otáčí voskem potažené zboží, většinou kalíškovina nebo také odlivky. Mechanicky ovládané hroty ryjí do vosku reliéf, který je následně vystaven působení leptací lázně. Hroty se pohybují vertikálně nahoru a dolů a jejich pohyb je mechanicky spřažen s otáčením polotovarů. Pohon všech pohyblivých částí stroje je realizován pomocí jednoho elektromotoru s převodovkou. Pohyby hrotů a otočných pozic jsou vyvozovány přes vačku.

Matovací lázně obsahují pro hrubý mat soli amonné, pro jemný mat soli draselné. Důležitá je koncentrace volné kyseliny fluorovodíkové v lázni. Příliš vysoká koncentrace kyseliny fluorovodíkové způsobuje mat hrubý až nestejněoměrný, malá koncentrace mat hedvábný.

Charakter matu závisí na složení matovací lázně, složení skla, teplotě lázně a době působení. V matovacích lázních se výrobky většinou matují po celé ploše.

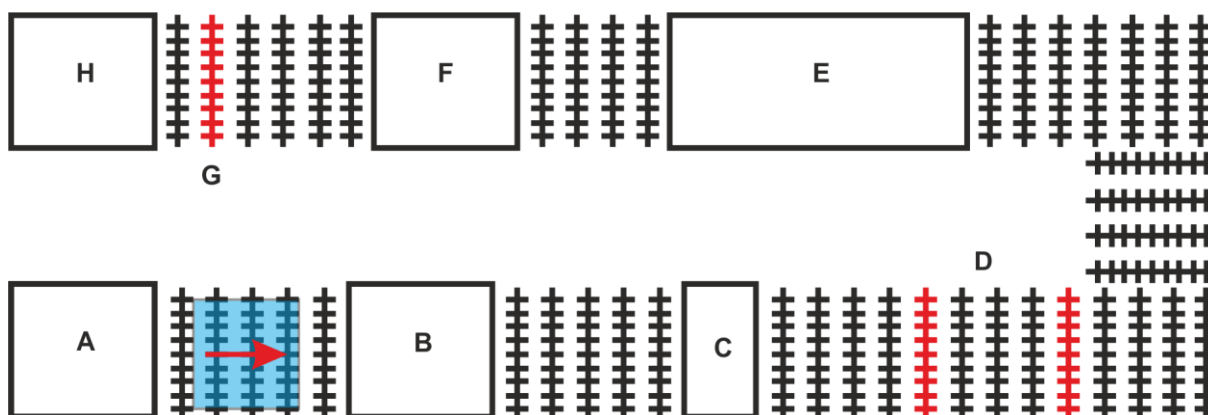
Matování pastami je používanější než matování v lázni, matují se celé plochy skla tabulového nebo osvětlovacího a některé druhy skla lisovaného nebo foukaného. Matování pastami se bohatě využívá u skla dekorativního, často jako doplněk malířských technik.

Matovací dekory se přenášejí na povrch skla různými reprodukčními technikami (razítkováním a psaním, pantografováním a gilošováním) nebo dekorováním povrchu skla při použití ochranných krytů.

Doba nutná k vytvoření matu je většinou 5 – 10 minut. Pasta se smývá teplou vodou nebo se stírá zpět na paletu a poté se matový povrch omývá vodou. Takto stíraná pasta však postupně ztrácí účinnost.

Jako představitele technologie automatického matování skla je možné uvést zušlechťení plochého skla. Linka je často stavěna do tvaru písmene L nebo U. Sklo je na linku dodáváno v potřebných rozměrech, maximálně v rozměrech jumbo formátu (3210 x 6000 mm) a tloušťka je většinou v rozmezí 3 – 12 mm. Při jednostranném matování se matuje ta strana tabule, která nebyla při výrobě základního polotovaru (ploché sklo FLOAT) v kontaktu s cínovou lázní. Důvodem je zbytkový cín po výrobě plochého skla plavením, kdy by při reakci s matovacím roztokem vznikl nežádoucí produkt (fluorid cínčitý - SnF_4) znehodnocující povrch (vznikala by šedá mapa). Nematovaná strana je chráněna pomocí nalepovací polyetylenové (PE) fólie o různých tloušťkách v závislosti na tloušťce matovaného skla, která je odolná vůči účinkům chemického roztoku a současně nezanechává stopy na povrchu skla po jejím aplikování a pozdějším odstranění.

Matovací linka (Obr. 11.31) je tvořena jednotlivými pozicemi a přesun tabule skla mezi nimi je prováděn pomocí poháněného rolnového dopravníku. Linka začíná nakládacím robotem, následuje mytí tabule. Čištění probíhá kartáči a demineralizovanou vodou, následně probíhá sušení vzduchem. V dalším kroku je aplikována fólie, je ořezána a je aplikována ochranná páska na hrany skla. Následuje matování v uzavřeném a vzduchotechnikou odděleném tunelu, doba matování je uváděna kolem 10 minut. Druhá myčka zařazená v lince slouží k očištění tabule skla od matovacího roztoku. V dalším kroku je snímána fólie a celý proces končí kontrolním stanovištěm (výstupní kontrola kvality matování).



Obr. 11.31 Schéma matovací linky: A – nakládací robot, B – myčka, C – aplikace fólie, D – ruční ořezávání a aplikace ochranné pásky, E – matovací lázeň, F – myčka, G – snímání fólie, H – kontrola a expedice

11.3.2 Zpevňování skla iontovou výměnou

Bezpečnostní tvrzené sklo je možné vedle tepelného postupu (uvedeného v kap. 11.2.5) zpevňovat i chemicky pomocí vytvořeného tlakového napětí v povrchové vrstvě. Nejčastěji je zmiňován postup iontové výměny pod dolní chladicí teplotou.

Výměna iontů na povrchu skla je difúzní pochod řídicí se Fickovými zákony. Počet iontů vyměněných za konstantní teploty je přímo úměrný druhé odmocnině doby zpracování, stejným způsobem vzrůstá i tloušťka zpracované vrstvy. Zkoušky byly prováděny se vzorky plochého skla Float, které byly po určitou dobu v kontaktu s taveninou dusičnanu draselného KNO_3 při teplotách v rozmezí 300 až 500 °C. Za uvedených podmínek probíhá výměna iontů Na^+ z povrchu skla za ionty K^+ z taveniny dusičnanu draselného. Vzhledem k většímu iontovému poloměru draselného iontu vzniká v tenké povrchové vrstvě tlakové napětí, jehož uvolnění brání vnitřní chladná vrstva skla neumožňující vyrovnání napětí viskózním tokem. Popsanou iontovou výměnou vznikne v povrchové vrstvě skla tlakové napětí až 700 MPa, malé tahové napětí ve vnitřní vrstvě skla je prakticky konstantní. Tloušťka zpevněné povrchové vrstvičky se pohybuje obvykle od 10 do 100 μm . Při experimentech bylo zjištěno zvýšení pevnosti vzorků skla tloušťky 3 mm zhruba 1,3 až 4,2x ve srovnání s výchozím nezpevněným sklem. Na rozdíl od tepelně tvrzeného skla, které má i charakter skla bezpečnostního, sklo zpevněné chemicky iontovou výměnou tuto charakteristiku postrádá. Zpevňované sklo může mít modifikované chemické složení zvláště vhodné pro tento proces.

Při výrobě chemicky zpevněného skla je zásobník s nezpevněným sklem vložen do taveniny KNO_3 ve zpevňovací peci. Vzhledem k poměrně vysoké teplotě taveniny (více než 380 °C) je nutné nejprve sklo temperovat v elektrické temperovací peci, aby nedošlo k prasknutí vlivem přechodného napětí. Po umístění temperovaného skla do taveniny je nutno přísně dodržovat technologické podmínky procesu v předepsaných mezích. Zpevňování trvá podle požadovaného stupně předpětí, teploty lázně a druhu skla od 4 do 48 hodin. Po ukončení procesu zpevňování je zásobník s dokončenou výrobou vyjmut z lázně a ponechán volně chladnout na teplotu okolí. Na povrchu tabulí skla zůstává zbytkový film použité soli, který je nutno odstranit v myčce. Popsaný způsob zpevnění nezanechává na povrchu skla žádný optický ani deformační efekt, což může být ve srovnání s tepelně tvrzeným sklem určitou výhodou pro aplikace s vysokými nároky na kvalitu (např. vrstvená čela rychlostních vlakových souprav).

S aplikací chemicky zpevněného skla se lze setkat při zasklívání oken dopravních prostředků, zejména u čelních skel vlakových souprav a letadel. Dále u displejů mobilních telefonů a tabletů (Gorilla Glass, Dragontrail a další). Širšímu rozšíření aplikace brání vedle omezených možností kontinuální výroby i skutečnost, že se nejedná o bezpečnostní sklo. Tento požadavek může být ovšem řešen vrstvením tohoto skla např. pomocí polyvinylbutyralové fólie.

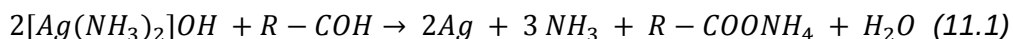
11.3.3 Nanášení vrstev na sklo

Jedná se o vytvoření vrstev na povrchu skla, působících požadovaný efekt a mohou být vytvořeny různými technologiemi. V následujícím textu je uveden jen výběr těch nejpoužívanějších technologií zušlechtní.

11.3.3.1 Stříbření, zlacení a platinování

Jde o techniky nanášení vrstev těchto drahých kovů na sklo pro užité a dekorační účely. První je nanášení směsi jemného kovového prášku (Ag, Au) a taviva (oxid bizmutitý s boraxem nebo boritan olovnatý). Tavivem se při vypálení fixuje kov na povrch skla, jeho vzhled je však matný a je nutné jej mechanicky vyleštit. Směs se nanáší většinou ve formě suspenze v levandulovém oleji.

Zcela odlišný postup stříbření se volí při výrobě zrcadel a zrcadlových ploch obecně, včetně stříbření bižuterních kamenů pro simulizování a stříbření dírek rokajlových perliček. Základní podmínkou je plocha skla vyleštěná a dokonale vyčištěná, bez sebemenší mastnoty a jiných nečistot. Povrch je před stříbřením aktivován roztokem chloridu cínatého, který na povrchu skla vytváří síť redukčních center. Na takto připravenou plochu se aplikuje čerstvě připravená směs amoniakálního roztoku dusičnanu stříbrného, který obsahuje komplex diamminstříbrný $[Ag(NH_3)_2]^+$, a roztoku glukózy. Uvedený komplex se lehce redukuje jednoduchými cukry s aldehydickou skupinou, například glukózou ($C_6H_{12}O_6$), na kovové stříbro. Velmi zjednodušeně lze tento proces vyjádřit chemickou reakcí:



Po proběhnutí chemických reakcí se na povrchu skla vyloučí tenká vrstva kovového stříbra, již je nutné po ukončení procesu pokrýt ochrannou vrstvou vhodného laku, která zabraňuje působení ovzduší a chrání stříbro před oxidací i mechanickým poškozením.

Lesklý kovový povlak zlata dává jeho organická sloučenina rezinát nanášená v levandulovém nebo jiném vhodném oleji na sklo, která se po vysušení a vypálení na zhruba 550 °C redukuje na kov, pevně lnoucí k povrchu skla. Lesklá platinová vrstva vzniká podobným postupem z rezinátu platiny. K oběma rezinátům se často přidávají další rezináty kovů (Rh, Ag, Bi, Co, Cr ...), které zlepšují adhezi a vlastnosti vzniklé vrstvy a mění i její barvu.

Luxusní zboží lze také zdobit lístkovým zlatem, což jsou fólie ryzího zlata, které se na povrch skla lepí pomocí bezbarvých lepidel s indexem lomu podobným, jako má sklo.

Stříbření je nejvíce používáno při výrobě zrcadel a při výrobě komponent skleněné bižuterie.

11.3.3.2 Výroba zrcadel

Převážná většina zrcadel se vyrábí chemickým nanášením kovů, především stříbra, na upravený povrch skla. Využívá se již zmíněné reakce amoniakálního roztoku dusičnanu stříbrného s redukadlem, následuje nanesení ochranné vrstvy. V minulosti se používalo mědi, od které se, vzhledem k její toxicitě, upustilo. Současné linky tzv. třetí generace jsou tvořeny technologickými celky, které umožňují plynulou výrobu s postupnými kroky:

1. **Zakládání polotovarů na stříbricí linku.** Tabule mají již daný rozměr, který požaduje zákazník.
2. **Čištění a leštění povrchu skleněné tabule** nejprve oplachem vodou, následuje čištění válcovými rotujícími kartáči. Povrch skla je posléze leštěn pomocí leštících mostů, pro vlastní leštění se používá směs na bázi oxidu ceričitého ve vodní suspenzi při teplotě 40 až 50 °C. Po dokončení leštění následuje opláchnutí tryskami. Čištění je ukončeno rotujícími válcovými kartáči zkrápěnými demineralizovanou vodou.
3. **Aktivace povrchu skla** před stříbřením se provádí pomocí roztoku chloridu cínatého řadou trysek, nechává se okolo 5 minut působit a následuje oplach demineralizovanou vodou.
4. **Stříbření** se provádí pomocí dvou řad trysek. V jedné řadě je přiváděn stříbricí roztok a v druhé řadě je přiváděn redukující roztok. K vzájemnému mísení dochází až na povrchu skla. Následuje oplach demineralizovanou vodou o teplotě 25 až 30 °C přiváděnou tryskami uspořádanými v řadě. Současně se provádí vizuální kontrola stejnoměrnosti a kvality nanášené vrstvy.
5. **Pasivace a silanizace** vytváří na vrstvě stříbra povlak, zajišťující jeho ochranu proti poškození. Pasivační roztok se nanáší rozprašováním pomocí řady trysek na postříbřený povrch, kde se nechá určitou dobu působit. Následuje oplach demineralizovanou vodou. V dalším kroku je aplikován silanizační roztok opět pomocí řady trysek, který rovněž vyžaduje určitou dobu působení. Tento krok je ukončen oplachem demineralizovanou vodou.
6. **Zahřívání** je prováděno za účelem odstranění zbytků vody a předebrátí tabule před nanesením ochranné vrstvy laku. Systém je tvořen soustavou topných odporových těles rozmístěných do sekcí, jejichž zapínáním a vypínáním lze regulovat teplotu tak, aby dosáhla přibližně 60 °C.
7. **Lakování** se provádí ve dvou krocích a cílem je vytvoření ochrany proti mechanickému a chemickému poškození. V prvním kroku se nanáší lak základový pomocí lakovací hlavy, která vytváří souvislou clonu. Touto pokovená tabule projíždí určitou rychlostí, takže dojde k vytvoření vrstvy základového laku o požadované a rovnoměrné tloušťce (kap. 11.3.3.7). Stejným způsobem se v druhém kroku provádí nanášení vrstvy krycího laku.
8. **Chlazení, mytí a sušení hotového výrobku.** Chlazení se primárně provádí pomocí ventilátorů, které nasávají vzduch z okolního prostředí a ofukují tabuli skla z obou stran. Ke konečnému chlazení a současně mytí tabule dochází v boxech s oddělenou funkcí. Nejprve je vrchní povrch tabule myt vodou pomocí systému trysek (při tom je i ochlazován). Následuje mytí (a chlazení) rotujícími válečky z měkkého materiálu. Válečky jsou namáčeny ve vanách nejprve ve vodě, dále v roztoku síranu železitého (kterým dochází k odstranění zbytků stříbra na hranách zrcadla) a opět ve vodě (oplach zbytků po reakcích předchozího roztoku). Konečné omývání tabule se provádí ostřikováním spodního i vrchního povrchu tabule za současného působení

rotujících kartáčů. Sušení hotových výrobků je prováděno účinkem tlakového vzduchu přiváděného hubicemi.

Po dokončení technologických operací se obvykle provádí potisk jednotlivých tabulí identifikačními údaji, následuje kontrola a odběr hotových výrobků z linky.

11.3.3.3 Similizace bižuterních kamenů

Dalším příkladem je similizace. Protože vybroušený, vyleštěný a vyčištěný skleněný kámen nemá tak dokonalý optický efekt (lesk, brilance a hra barev) jako dobře vybroušený přírodní kámen, je pro zlepšení efektu spodní část kamenů similizována (pokrývána stříbrnou zrcadlovou vrstvou) a to již od sedmdesátých let 19. století. Similizováním je nazýván souhrnně celý proces, kterým se na povrchu spodní části skleněného kamene (např. šatonu) vytváří odrazivá stříbrná vrstvička, chráněná zvenčí ochrannou vrstvou laku s pigmentem. Jde opět o princip vytvoření zrcátka, který se v tomto případě skládá z řady dílčích operací a zvláštních pracovních postupů, které lze rozdělit na přípravné práce, vlastní zušlechťování a dokončovací operace. K přípravným pracím patří čištění zboží před similizováním, nasazování kamenů do upínací látky a její příprava, zapouštění kamenů do upínací látky, případně i chlazení ploten se zapuštěnými kameny. Upínací látka umožňuje hromadné stříbření a bronzování, kdy zapuštěné vršky kamenů jsou před postříbřením chráněny touto látkou. Dříve se k upínání kamenů používala gutaperča (látka příbuzná kaučuku), ale dnes se používá především fólie z měkčeného polyvinylchloridu ve tvaru kruhové desky nebo pásu (v případě kontinuální automatické linky). Fólie se zahřívá do změknutí v zapouštěcím prostoru a po vložení síta s kameny do tohoto prostoru se z něj odsaje vzduch. Dojde k zapuštění kamenů do PVC účinkem vakua a prázdné síto se vyjme.

Vlastní operace zušlechťování jsou: mytí povrchu a jeho aktivace pro stříbření, stříbření, sušení postříbřených kamenů, bronzování a sušení. Před stříbřením se musí kameny mýt a následně je jejich povrch aktivován 0,1% roztokem chloridu cínatého. Stříbření se provádí stříkáním pomocí tlakového vzduchu. Stříkácí pistole je vybavena dvěma tryskami, z nichž jednou se stříká amoniakální roztok dusičnanu stříbrného a druhou roztok redukční. Postříbřené kameny na plotnách se suší obvykle v tunelové sušárně a následuje nanášení ochranného laku s kovovým pigmentem stříkáním. Pigmentem je bronz mosazná (zlaté simili) nebo hliníková (stříbrné simili). Po zaschnutí ochranné vrstvy se kameny ohýbáním ploten nebo pásu uvolní (vylátnou) a vypadají.

Na operace zušlechťování navazuje dokončovací operace, kterou je vypalování ochranné vrstvy při teplotě 150 až 200 °C. Všechny operace na sebe navazují v similizační lince, která je automatizována. Na výstupu z linky se kameny kontrolují a třídí.

11.3.3.4 Vakuové napařování

Vakuové napařování je ve sklářské výrobě doménou především bižuterie. Principem vakuového napařování (vakuového pokovování) je odpařování materiálů ve vysokém vakuu a kondenzace jejich par na povrchu předmětů. Upravený napařovaný předmět s dokonale čistým povrchem se umístí v uzavřeném prostoru, z něhož je odčerpán vzduch na tlak $1 \cdot 10^{-2}$ Pa. Látka, která má vytvořit na předmětu povlak, se za tohoto vakua zahřeje odpařovacím zdrojem na teplotu odpařování v tzv. „lodičkách“. Teplota napařování dané látky musí být nižší než její tavicí teplota. Vlivem zvýšené kinetické energie částic v povrchu odpařované látky dojde k uvolnění atomů, případně molekul, které se ve vakuu šíří přímočaře, pokud

nenarazí na zbylé molekuly plynu. Na povrchu předmětů s nižší teplotou (napařovaný předmět, ale i stěny a veškerá vnitřní výbava zařízení) kondenzuje odpařovaný materiál. Při dostatečně vysokém vakuu dopadne většina odpařených molekul na povrch předmětu, aniž by se srazila s molekulami zbytkových plynů. Vlivem kinetické energie, kterou odpařené molekuly mají, se vytváří na předmětu souvislý povlak s dobrou přilnavostí. Napařenou vrstvou může být pokryt celý výrobek, tzv. **celopokov** anebo jen část, **polopokov**.

Jedna napařená vrstva je velmi tenká, obvykle 30 až 50 nm a vždy se nanáší několik vrstev (běžně 7 až 10 vrstev), které mohou být různého složení. Vrstvy mohou být tvořeny jedním nebo více kovy, tzv. **kovové dekory**. Používá se zejména hliník, chrom, nikl, měď, stříbro, zlato, chromnikl a další. Vzniklé dekory mají typický kovový lesk a pokud tloušťka přesáhne 100 nm, mají i kovový vzhled.

Vrstvy mohou být tvořeny i oxidy (pro dosažení podobného efektu jako při irizování se používá monoxid titanu), ale mohou být také nanášeny vrstvy rozdílného složení a navzájem se tyto vrstvy mohou kombinovat a střídát, aby se dosáhlo požadovaného optického a barevného efektu. Příkladem jsou vrstvy interferenční, kdy se nanáší střídavě vrstvy s vysokým a nízkým indexem lomu o přesně určené tloušťce. Vznikají tak **interferenční dekory**, kde nejznámějším je dekor vzniklý z kombinace vrstev oxidu titanu a křemíku Aurora borealis (nazývaná též. AB – dekor, dříve Titania). Z nekovových látek se napařují dále fluoridy, např. fluorid hořečnatý a mnoho dalších.

Kombinované dekory jsou složeny z kombinace kovových a interferenčních vrstev. Kovová vrstva v tomto případě většinou slouží jako reflexní a interferenční vrstvy vytvářejí vlastní dekorativní efekt.

Vakuově napařované vrstvy mají dostatečnou odolnost a jen v některých případech (vrstvy měkkých kovů – hliníku, mědi) se chrání ještě vrstvou odolného oxidu naneseného rovněž ve vakuu nebo vrstvou laku.

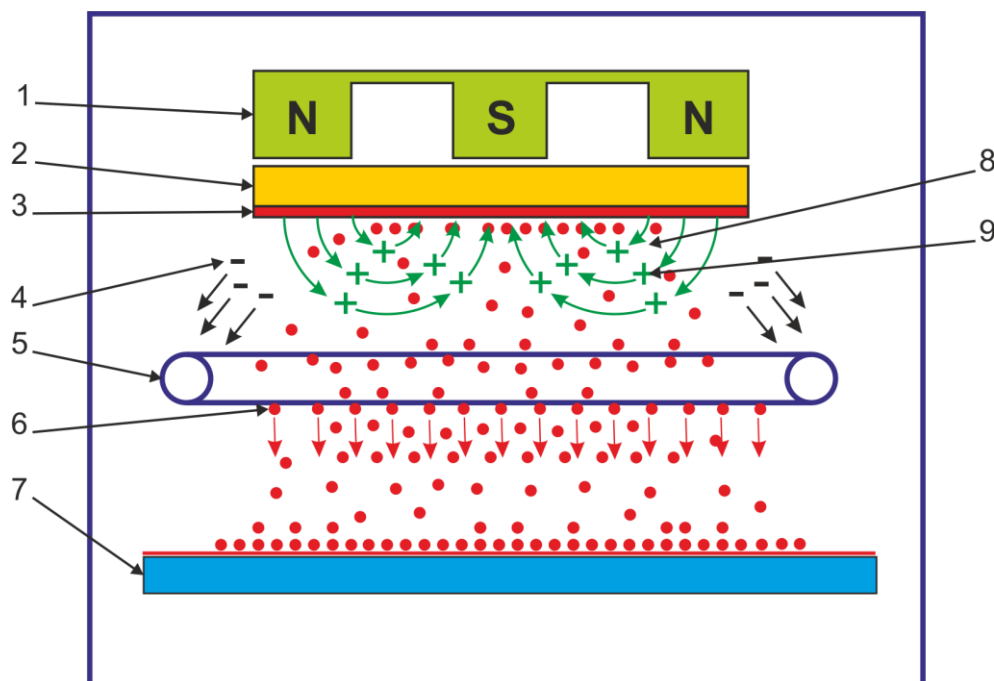
Vakuové napařování se provádí ve vakuových napařovacích aparaturách. Zařízení je složeno z několika částí: vlastní napařovací zařízení, vakuové soustavy složené z rotační vývěvy, Rootsovy vývěvy, difuzní vývěvy a řídicího systému. Výrobky jsou po napařování vypáleny na 200 až 400 °C (podle druhu zboží), aby se zlepšila přilnavost a mechanické vlastnosti.

11.3.3.5 Magnetronové naprašování

I když klasické termické vakuové napařování nalezlo již ve sklářském a bižuterním průmyslu své stabilní uplatnění, existují v současné době progresivnější metody nanášení vrstev. Význačné místo mezi nimi zaujímá katodové naprašování, zvláště pak naprašování pomocí magnetronu. Tato technologie je uplatňována zejména u plochého skla pro zasklení oken s dvěma a více skly (izolační skla). Jedná se o povlaky, které jsou relativně měkké (oproti pyrolytickému pokovování, kap. 11.3.3.6) a snadno se poškrábají. Proto jsou tato skla používána výhradně pro izolační zasklení (dvou a víceskla), kde jsou takto zpracované plochy orientovány směrem do dutiny zasklení. Celý systém je uzavřen obvodovým tmelením a dilatačním profilem obsahujícím vysoušedlo.

Proces magnetronového naprašování spočívá v bombardování terče (target) částicemi ionizovaného plynu ve vakuových komorách. Energie částic je dostatečně velká, aby

dokázala uvolnit z terče částice materiálu, který je třeba nanášet. Tyto částice dopadají na povrch skla, kde tvoří tenkou vrstvu, schéma procesu je na Obr. 11.32.



Obr. 11.32 Schéma magnetronového naprašování: 1 – permanentní magnet, 2 – katoda, 3 – terč (target) – nanášený materiál, 4 – elektrony, 5 – anoda, 6 – odprášené atomy, 7 – tabule skla (substrát), 8 – magnetické pole, 9 – kationty

Do vakuové komory se přivádí inertní plyn, nejčastěji argon, který se v doutnavém výboji ionizuje. Působením permanentních magnetů vzniká silné magnetické pole, jehož působením se vznikající plazma koncentruje bezprostředně před katodou. Sekundární elektrody se odchyľují k pomocné anodě nebo ke stěně recipientu, čímž se značně snižuje teplota substrátu. Argonové ionty zvyšují svoji kinetickou energii a bombardují target (terč), upevněný na měděné katodě chlazené vodou. Target se rozprašuje a vytváří na substrátu žádaný povlak. Pracovní tlak se běžně pohybuje od 0,1 do 1 Pa, teplota substrátu od 50 do 250 °C. Rychlost přírůstku tloušťky vytvářené vrstvy může být až desetinásobně vyšší než u vakuového napařování.

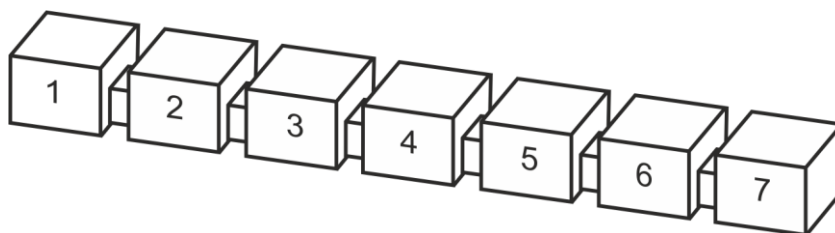
Naprašované vrstvy jsou strukturně homogenní s vysokou adhezí a reprodukovatelným složením, což je důležité hlavně u slitin. Stejnoseměrné magnetrony umožňují naprašování všech těžkovitavlných kovů (W, Ta, Mo, Zr, Hf, atd.), použití vysokofrekvenčních magnetronů i naprašování dielektrik (SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 atd.). Další předností je stejnoměrné ovrstvení velkých ploch (např. skleněných tabulí), proto některé magnetrony dosahují značných rozměrů.

Magnetrony umožňují i reaktivní naprašování vrstev, při kterém základní kov nebo sloučenina reaguje během procesu s reaktivními plyny, připouštěnými za tímto účelem do recipientu. Takto je umožněno připravovat celou škálu dekorativních i funkčních velmi tvrdých vrstev (TiN, TiAlN, WC, CrN, WN, atd.). Pracovní podmínky při reaktivním naprašování jsou velice náročné nejen na geometrické uspořádání, ale vyžadují i přísné

dodržování nastavených podmínek, jako je stupeň ionizace, intenzita magnetického pole a regulace ionizovaného i reaktivního plynu. Pro tyto účely je zařízení vybaveno řídicí jednotkou.

Technologie naprašování může být použita jak pro monolitické vrstvy, tak pro vícevrstvé systémy. Pořadí vrstev pak odpovídá pořadí terčů umístěných na lince v jednotlivých komorách, tím je také stanovena variabilita zařízení ve smyslu výroby různých druhů povlaků. Vrstev může být na skle i několik desítek. V současné době existují i naprašované vrstvy, které jsou vhodné i pro následné tepelné tvrzení.

Pro velké výkony jsou vyráběna velkokapacitní zařízení in-line, tvořená řadou samostatných komor umístěných za sebou, Obr. 11.33. Zařízení se nazývá coater a je provozováno kontinuálně s dopravníkem, na kterém je umístěno ploché sklo.



Obr. 11.33 Schéma linky na magnetronové naprašování: 1 – zakládání tabulí skla, 2 – myčka, 3 – kontrola, 4 – vakuování, 5 – naprašovací zóna, 6 – postupné zvyšování tlaku, 7 – výstup tabulí s vytvořenou vrstvou

V první fázi je sklo založeno na dopravníku, umyto a zkontrolováno. Dále sklo pokračuje do dekompresních zón, kde dochází k postupnému snižování tlaku na pracovní tlak. V naprašovací zóně se vytváří na povrchu skla žádaný povlak. Následuje postupné zvýšení tlaku průchodem soustavou komor. V průběhu procesu je prováděna kontrola. Zejména je kontrolována kvalita skla, tloušťka jednotlivých vrstev, homogenita vytvořeného povlaku, barevnost povlaku a další.

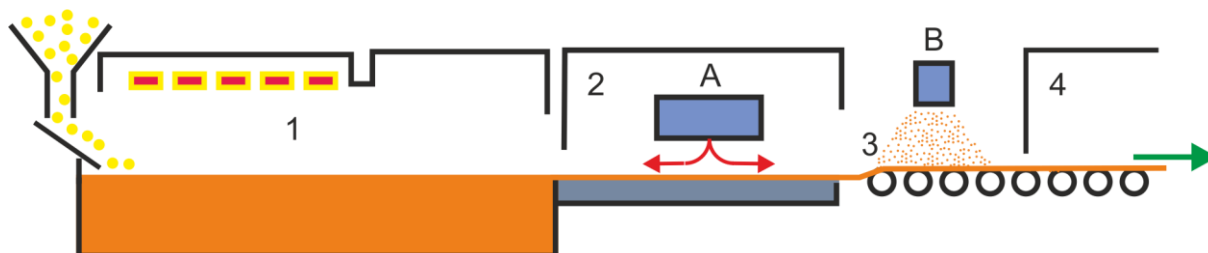
11.3.3.6 Pyrolytické pokovování

Pyroliticky pokovené sklo je sklo pokovené tvrdou vrstvou kovového oxidu naneseného sprejem nebo technologií CVD¹⁷. Tato technologie umožňuje nanesení dokonale stejnoměrné ochranné vrstvy kovových oxidů vlivem reakce plynu na tabuli skla. Plyn přichází do kontaktu se sklem za vysoké teploty a vytváří na něm tvrdou „pyrolytickou“ ochrannou vrstvu, která je pevně vázaná na povrch skla. Tyto vrstvy jsou odolné vůči mechanickému poškození a často také vůči klimatickým vlivům při expozici na vnějším prostředí. Využití tak nacházejí výrobky s tímto zušlechťením v monolitickém zasklení a výhodou je také snadné další zpracování jako je broušení a tepelné tvrzení.

Zařízení je často součástí linky FLOAT (Obr. 11.34) na výrobu plochého skla, kap. 9.6.3. Při nanášení účinné vrstvy pomocí spreje dochází ke kontaktu použitého přípravku s horkým povrchem pásu skla na počátku chladicí pece, při použití CVD je účinná vrstva

¹⁷ Chemical vapor deposition – chemické napařování.

vytvářena v prostoru cínové lázně, což je modernější způsob, který umožňuje vytváření vícevrstvých povlaků.



Obr. 11.34 Schéma vytváření pyrolytického povlaku: A – nanášení metodou CVD, B – nanášení pomocí spreje, 1 – tavicí a pracovní část pece, 2 – cínová lázeň, 3 – zvedací válce, 4 – chladicí pec

11.3.3.7 Skla s funkčními povlaky

Především ploché sklo pro architekturu je opatřeno povrchovou vrstvou za účelem zlepšení jeho funkčních vlastností. Jelikož není možné ani ekonomicky účelné vyvíjet nová skla speciálních vlastností změnou jejich chemického složení a také flexibilita dnešních výrobních linek na ploché sklo z pohledu změny složení skla není vysoká, jsou vyvíjeny povlaky, které vlastnosti skla zlepšují. Funkční povlaky na ploché sklo se nanášejí především výše zmíněnými technologiemi magnetronového naprašování a pyrolytického pokovování. Tyto vesměs transparentní vrstvy ve viditelné oblasti záření se uplatňují zejména za účelem změny odrazivosti a pohlcení části spektra, což zlepšuje tepelně izolační vlastnosti skla a schopnost selektivního prostupu jednotlivých složek slunečního záření. Dále mohou mít povlaky na skle antibakteriální účinky, měnit stupeň reflexe povrchů nebo mohou být upraveny pro snadnější zpracování a čištění. Vlastnosti skel s povlaky jsou vždy posuzovány jako celek, protože vlastnosti základního skla – substrátu ovlivňují také celkové vlastnosti tohoto skla s povlaky.

Sklo s nízkou emisivitou je nazýváno sklo s tepelně izolační funkcí. Taková skla použitá pro zasklení snižují v zimním období tepelné ztráty objektu na minimum, tím že minimalizují úniky tepla přes sklo z vnitřku budov a přitom dovolují přímý vstup slunečního záření. Použití je pro nízkoenergetické a pasivní budovy. Základním parametrem určujícím tepelně izolační vlastnosti je normálová emisivita povlaku, která je klíčová pro dosažení vysokého stupně tepelné izolace. Součinitel prostupu tepla U [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] vyjadřuje, kolik tepla unikne plochou skla o ploše 1 m^2 při rozdílu teplot jejích povrchů 1 K . Nižší hodnoty součinitele představují lepší izolaci. Samostatné plavené sklo bez funkčních povlaků má například u tloušťky skla 4 mm součinitel prostupu tepla $5,8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. U kvalitních izolačních dvojskel s funkčními povlaky jsou uváděny hodnoty kolem $1,1\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, u trojskel se mohou hodnoty přiblížit až k $0,6\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

Selektivní sklo umožňuje snížení tepelného zisku způsobeného pronikáním slunečního záření v letním období. Běžná skla propouští optické záření v rozsahu $\lambda \approx 300\text{ nm}$ (UV záření) až $\lambda \approx 5\,000\text{ nm}$ (IR záření), tedy část ultrafialového a široký rozsah infračerveného záření (kap. 3.9.3). Tímto zářením je do interiérů vnášeno teplo. Cílem selektivní vrstvy je minimalizovat vstup UV a IR záření a zároveň propustit viditelné záření. Selektivita zasklení se dá vyjádřit pomocí podílu světelného činitele (L_T) prostupu a

celkového činitele prostupu slunečního záření (S_F). Viditelné světlo tvoří 50 % z celkového rozsahu slunečního spektra. Proto se např. pro zasklení s $L_T = 50$ % uvažovalo s nejlepším možným $S_F = 25$ %. Donedávna platilo, že selektivita skla s povlakem může dosahovat hodnot 0 až 2. S příchodem nových materiálů a technologií již lze dosáhnout hodnoty selektivity vyšší než 2. Maximální hodnotu selektivity splňují jen nejlepší skla.

Další typy povlaků specifických vlastností jsou nanášeny řadou dalších různých technologií jako je např. sol-gel. **Sol-gel metody** jsou používány pro přípravu hlavně anorganických oxidických materiálů ve formě vrstev a jsou založeny na přípravě koloidního roztoku (solu), který je převeden na gel a následně na pevný materiál. Rozvíjejí se také **nanotechnologie**, které umožňují vytvářet povlaky odolné vůči poškrábání, nesmáčivé a nepřilnavé povlaky (na nichž neulpívá špína, mastnota, vodní kámen, otisky prstů, ..), s dalšími aplikacemi se lze setkat při barvení povrchu, při výrobě fotovoltaických solárních článků, při zvyšování požární odolnosti skla apod. Existují i další technologie, které jsou ovšem většinou součástí výrobního know-how.

Příkladem dalších funkčních povlaků je **antibakteriální povrch skla**, který je upraven tak, že součástí struktury skla jsou nadifundované ionty stříbra. Díky této úpravě povrch skla dlouhodobě ničí škodlivé bakterie (99,9 %) a zabraňuje vzniku a růstu řady plísní.

Povlaky pro snadnější údržbu mají za cíl zjednodušit péči o povrch skla. Jedná se především o povlaky s hydrofobními, hydrofilními a fotokatalytickými vlastnostmi. Základní přístupy pro snadnou údržbu povrchu jsou dva.

Tím prvním je opatření povrchu skla hydrofobní vrstvou, která odpuzuje mastnotu a vodu, chrání povrch skla před korozí, nedochází k jeho poškození, např. graffiti. Vrstvy jsou nanášeny na povrch nejčastěji pomocí spreje nebo je použita metoda CVD, vrstvy jsou dále vytvrzeny chemickou reakcí nebo působením vysoké teploty. Jako materiálu může být použito např. polymerů (silan nebo fluoropolymer). Hlavním nedostatkem těchto vrstev je nižší odolnost vůči mechanickému poškození.

Druhý přístup reprezentuje použití hydrofilního povlaku s fotokatalytickými vlastnostmi. U tohoto povlaku je využíváno jako katalyzátoru nanočástic TiO_2 , které vykazují fotokatalytickou aktivitu (spouští ji UV-A záření). Princip funkce povlaku lze rozdělit do dvou dějů:

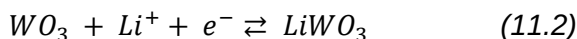
- UV záření, které je součástí slunečního světla, startuje fotokatalytickou reakci, která rozkládá organické nečistoty na povrchu skla a zároveň se povrch skla stává hydrofilním (potřebná intenzita UV záření proniká i přes mraky).
- Při následném dešti se na skle díky hydrofilním vlastnostem povrchu vytvoří tenký film, který rovnoměrně smyje rozložené organické nečistoty a zbylé anorganické částice. Tento vodní film snadno a rychle usychá.

Vzhledem k tomu, že nejsou rozkládány všechny organické částice a efekt je závislý na mnoha faktorech (intenzita UV záření, umístění na budově, orientace ke světovým stranám, úroveň znečištění ovzduší anorganickým prachem) nejedná se o tzv. „samočištění“, jak je někdy z marketingových důvodů uváděno, ale jedná se o povrch se snadnější údržbou. Problémem nadále zůstává trvanlivost povrchů, dále jejich kompatibilita s dalšími

používanými materiály (např. pro tmelení izolačních skel) a také skutečnost, že je nutné povlaky nanášet i na druhou stranu tabule, což je technicky zatím velmi náročné.

Antireflexní povlaky mohou snížit odrazivost skla ze 7,7 % až na méně než 1 % (při kolmém dopadu světla). K tomuto účelu se používají antireflexní sol-gel povlaky nanášené jako dip-coating (namáčení v lázni solu a následné tepelné zpracování) nebo naprašováním.

Okna s regulovanou propustností (barevností) mají dvě základní varianty, tou první je princip založený na vrstvě umístěné ve fólii s tekutými krystaly, princip je popsán v kap. 11.4.1.1. Druhý princip využívá tzv. elektrochromní sklo, které regulací napětí dokáže měnit barvu od obvyklé bezbarvé přes světlemodrou až po tmavomodrou. Základem jsou dvě tabule skla pokryté velmi tenkou průhlednou elektricky vodivou vrstvou (vrstvy ITO, indiem dopovaný oxid cínčitý), mezi nimiž je vrstva polymerního materiálu, který je dobrým elektrolytem, takže se v něm mohou pohybovat ionty lithné. Jedna část této vrstvy je opatřena velmi tenkou vrstvou oxidu wolframového WO_3 , nanesenou za definované atmosféry, druhá vrstva obsahuje ionty lithné. Na elektricky vodivé vrstvy na povrchu skel je připojen vnější zdroj stejnosměrného napětí, jehož účinkem se mohou vytvářet barevná centra. Stmívání je řízeno vratnou elektrochemickou reakcí, spojenou s difúzí iontů lithných do vrstvy WO_3 :



$LiWO_3$ je tmavě modrý. Intenzita zabarvení do odstínu tmavě modré závisí na trvání stimulace. Vznikající $LiWO_3$ je tmavě modrý. Deaktivování zabarvení se provádí obrácením polarity, což způsobí zpětnou reakci a návrat do původního čirého stavu.

11.3.3.8 Barvení povrchu skla

Barvení povrchu skla je možné rozdělit na lakování, malování a lazurování. Největší objemy výrobků jsou lakovány. Jedná se o nanášení tenkých barevných vrstev na sklo některým z „mechanických“ způsobů. Lakování má dva základní účely. První má za cíl vytváření ochranné vrstvičky především stříbrem pokovených skleněných povrchů. Druhým uplatněním je funkce zdobící, kdy se uplatňují jak transparentní barvy, tak barvy syté.

Lakování jde napříč aplikací skla. Nejrozšířenější je v bižuterii, obecně u stavebního skla (např. ploché sklo, skleněné stavební tvárnice, ...), v užitkovém skle, ale také u vánočních ozdob.

Mezi lakování je možné zařadit i sítotisk, nanášení barvy válcem, clonové nanášení barev, stříkání, digitální tisk atd.

Sítotisk

Technologie sítotisku je založena na protlačení barevné pasty přes sítotiskovou matici přiloženou k povrchu skla, následné vysušení barvy a její vypálení. Sítotisková matrice je připravována na základě návrhu, který se fotografickou cestou přenese na jemnou (často silonovou) síťku, která se upne na rámeček. Síťka je propustná jen v místě ofotografovaného návrhu a jinak je celá plocha síťky nepropustná.

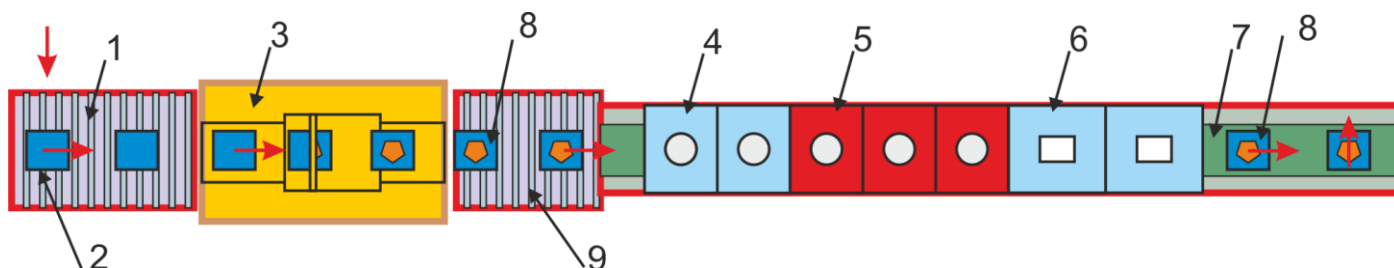
Čisté sklo je přesně umístěno pod rám nesoucí matici v souladu s požadavkem na umístění vzoru a je přitom vždy v horizontální poloze, poté je na ně spuštěna matrice

s požadovaným umístěním vzoru a předem připravená barva ze zásobníku je deponována na síto z horní strany. Barva je následně protlačena stěrkou, která po matrici přejede. Kvalita nanesení barvy a tloušťky nanesené vrstvy je dána viskozitou barvy, přitlakem stěrky a zejména hustotou síta.

Barvy pro sítotisk jsou keramické frity, dnes bez těžkých kovů a škodlivých komponent, které byly součástí barev v minulosti. Nanášení barev se provádí rozptýlením barviva do nosného kapalného prostředí, které tvoří buď potiskovací olej (založený na terpenu, sosnovém oleji a pojivech v nich rozpustných), případně ve vodě rozpustná média (vodou ředitelná organická rozpouštědla a pojiva) nebo média na vodní bázi.

Velkoplošné tisky se uplatňují pro fasádní zasklení nebo interiérové příčky. Plně automatizované linky pro menší rozměry a velké série jsou používány například k potisku autoskel. Sítotisk je uplatňován i u užitkového a dekorativního skla, pro výrobu levnějších výrobků, na obalovém skle, kde nahrazuje etikety, ale například i u vánočních ozdob. Celý proces může být manuální, poloautomatický až po plně automatizovaný s využitím jedné nebo více barev a motivů. Vícebarevné tisky probíhají postupně, barvy jsou mezi nanášením vysušeny.

Při sušení se odstraňují těkavé látky a provádí se buď horkým vzduchem nebo infračervenou radiací. Následuje vypálení, kterým se vrstvy barvy spojí s povrchem skla. Příklad linky na potisk plochého skla je na Obr. 11.35.

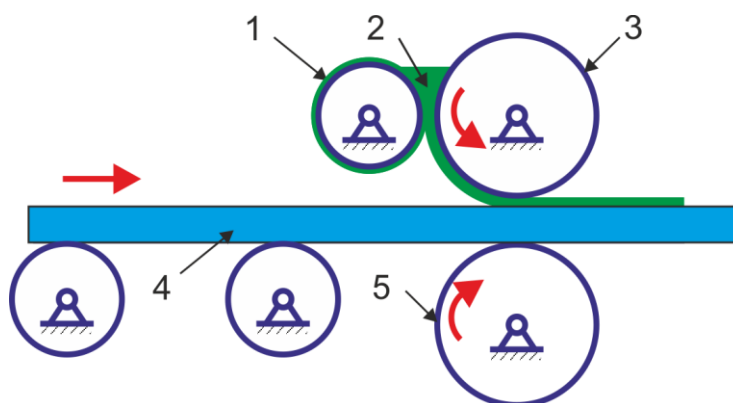


Obr. 11.35 Příklad linky na potisk plochého skla: 1 – nakládání na válečkový dopravník, 2 – sklo, 3 – stroj na sítotisk, 4 – sušení, 5 – výpal, 6 – chladicí zóna, 7 – dopravník, 8 – potištěné sklo, 9 – dopravník pro kontrolu tisku

Nanášení barvy válcem

Barva používaná pro sítotisk, může být také nanášena válcem na ploché sklo, tzv. Roller Coating. Nanášením barvy válcem mohou být vytvořeny samostatné barevné efekty, případně může být doplněn potisk vytvořený sítotiskem.

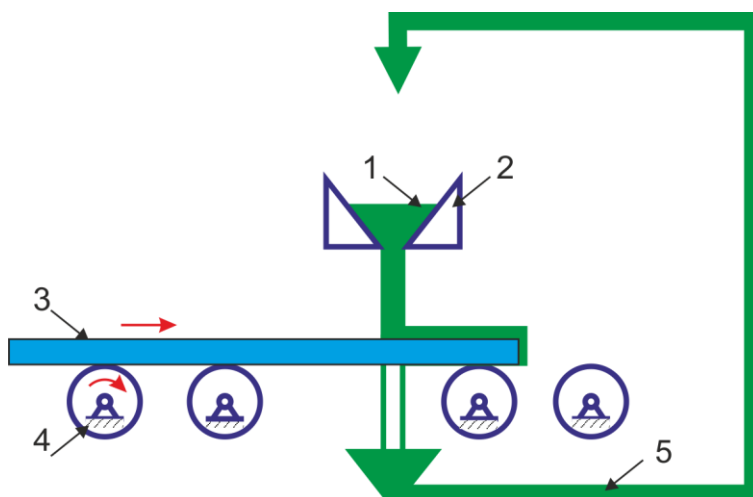
Princip nanášení je schematicky znázorněn na Obr. 11.36. Sklo se pohybuje v horizontální poloze na dopravníku, z horní strany k němu přiléhá aplikační válec, který se otáčí ve směru pohybu skla. Pohybem aplikačního válce je barva ze zásobníku přenášena na povrch skleněné tabule, na něm vytvoří homogenní film s dobře kontrolovatelnou tloušťkou (přibližně 30 až 200 μm). Vrstvy nanesené touto technologií mohou být celoplošné anebo mohou mít dekor, který se opakuje v souladu s otáčením aplikačního válce. Po nanášení následuje stejně jako u sítotisku sušení a výpal.



Obr. 11.36 Princip nanášení barvy válcem, 1 – zásobník, 2 – barva, 3 – aplikační válec, 4 – sklo, 5 – transportní válec

Clonové nanášení barev

Clonové nanášení barev se aplikuje opět u plochého skla např. při výrobě zrcadel. Při této technologii nanášení barev vytéká tenká vrstva barvy podélnou štěrbinou aplikátoru (hlavy) a vytváří souvislou clonu, Obr. 11.37. Tou skleněná tabule projíždí určitou rychlostí, takže dojde k vytvoření vrstvy laku o požadované a rovnoměrné tloušťce. Určitou nevýhodou tohoto procesu může být, že přední hrana skla procházející clonou je také obarvena a v případě nutnosti může být její očištění náročné.



Obr. 11.37 Princip clonového nanášení barvy, 1 – barva, 2 – výtoková štěrbin, 3 – tabule skla, 4 – transportní válce, 5 – cirkulace

Stříkání

Pro dekorování výrobků malých rozměrů jsou používány systémy se stříkáci pistolí, které také umožňují flexibilní změnu barvy. Použité barvy mohou být různého složení, od moderních na vodní bázi, přes pasty používané na nanášení válcem nebo pro clonové nanášení. Důležité je dodržení stálé tloušťky nanášené vrstvy barvy. Nevýhodou této

technologie jsou značné ztráty barvy. Automatizované zařízení na nanášení barev představuje dopravník, kterým jsou unášeny skleněné polotovary. Samotný systém trysek je umístěn nad dopravníkem a přejíždí napříč.

Lakování perliček

Světlostálé barvy se také používají k lakování některých druhů perliček (např. rokajl, dvoukrátky, pipes, čípky, atlasové perle, ...). Barvy jsou nanášeny na nahřáté polotovary a některé se i následně vypalují. Proces je dnes často automatizován. Barví se v sudech a nanášené barvy jsou vodou ředitelné. Dříve se používaly lihové barvy.

Digitální tisk

V současné době se rozšiřuje tisk digitální, který umožňuje vysokou flexibilitu motivů a rychlost tisku. Aplikace jsou především na ploché sklo pro stavební účely (interiéry a exteriéry) a automobilové sklo.

Škála barev ve formě inkoustů je také rozmanitá, od transparentních až po opakní. Potištěná skla mohou být chlazená (často vrstvená) nebo tvrzená. Inkousty mohou být keramické a potřebují po nanesení na sklo výpal, ovšem mají delší životnost a barevnou stálost. Inkousty mohou být také vytvrzovány UV zářením.

Barva je nanášena tiskovou hlavou umístěnou na portálovém nosníku, který umožňuje pohyb ve dvou osách (podobně jako řezací hlavy pro dělení plochého skla). V současné době je možné dosáhnout rozlišení až 720 dpi a rozměr skla může být až 18 x 3,3 m.

Malování

Malování je typickým procesem zušlechťování pro užitkové a především dekorativní sklo. Jedná se především o ruční výrobu. Malířské techniky lze rozdělit na malování vypalovacími barvami, malování lazurovacími směsami, malování studenými barvami, malování kovy, perokresbu, ledování a matování matovací solí.

Při malování vypalovacími barvami se používají sklářské barvy krycí plošné, krycí reliéfní a transparentní. Krycí barvy mají tři základní složky: tavivo, barvítka a kalivo. Taviva jsou nízkotavitelná bezbarvá skla (frity), obsahující oxid olovnatý, boritý, sodný a malá množství oxidu křemičitého. V nových typech taviv je oxid olovnatý nahrazen bezpečnějšími nejedovatými oxidy, například oxidem vizmutitým. Barvítka (keramické pigmenty) jsou převážně jednoduché či podvojně oxidy kovů, které dávají sklovině (fritě) potřebné zabarvení. Jestliže se v tavivu rozpouštějí barvítka zcela dokonale, jde o iontové zabarvení a vznikají barvy transparentní. Pokud tavivo s barvítky reaguje jen omezeně, případně vůbec, vznikají barvy krycí – pigmenty. Kaliva jsou látky způsobující neprůhlednost barev. Jde převážně o těžko rozpustné oxidy nebo oxidy způsobující rekrytalizaci (oxidy cíničitý, titaničitý, zirkoničitý, ceričitý, antimonitý apod.). Vlastní výroba barev je velice zdlouhavá, zvláště mletí frit v kulových mlýnech, které trvá řádově i několik dní. Aby barvy v podobě jemného prášku mohly ulpět na povrchu skla, musí se mísit s pojivy a upravovat přidávkou ředidel. Jde o substance organického původu; ředidla jsou lehce těkavé silice a jako pojiva se používají balzámy a pryskyřice. Příkladem známé látky, která je již připravena k použití, je terpentýn. Upravená barva se nanáší na povrch skla různými malířskými pomůckami a po vysušení se vypaluje při teplotách 500 až 600 °C, tedy při teplotě, která je nižší než teplota

měknutí podkladového skla (přibližně při dolní chladicí teplotě), ale vyšší než je teplota měknutí barevného prášku. Při této teplotě již barva změkne natolik, že vytvoří souvislou vrstvu, která se dobře spojí se skleněným výrobkem.

Lazurování

Lazurování je jednou z nejstarších malířských technik ve sklářství (od 14. století). Podstatou tohoto procesu je vnikání barvicí látky difúzí do povrchu skla za zvýšené teploty. Postupuje se tak, že se na sklo nanáší barvicí složka spolu s nosičem, což bývá kašovitá směs kaolínu a vody. Barvicí složkou je buď chlorid stříbrný AgCl nebo síran měďnatý CuSO_4 , případně jejich směs. Ionty kovů difundují při teplotě 500 až 600 °C do povrchu skla a zabarvují jej. Tak vzniká difúzí Ag^+ žlutá lazura, difúzí Cu^{2+} nejdříve slabě žlutozelené zabarvení (1. výpal), které pálením v redukční atmosféře získá zabarvení černé (2. výpal) a poté v oxidační atmosféře přechází na žádanou lazuru červenou (3. výpal). Kombinací obou iontů lze docílit též zelené lazury [23, 38].

Technika lazurování je používána zejména pro zušlechťení užitkového a dekorativního skla, ale lze ji použít i pro mačkané perle, tzv. mazání lazurou. Technologie se obtížně automatizuje.

Vrstvy používané u skleněné bižuterie

Vrstvy mohou být vytvořeny různými technologiemi:

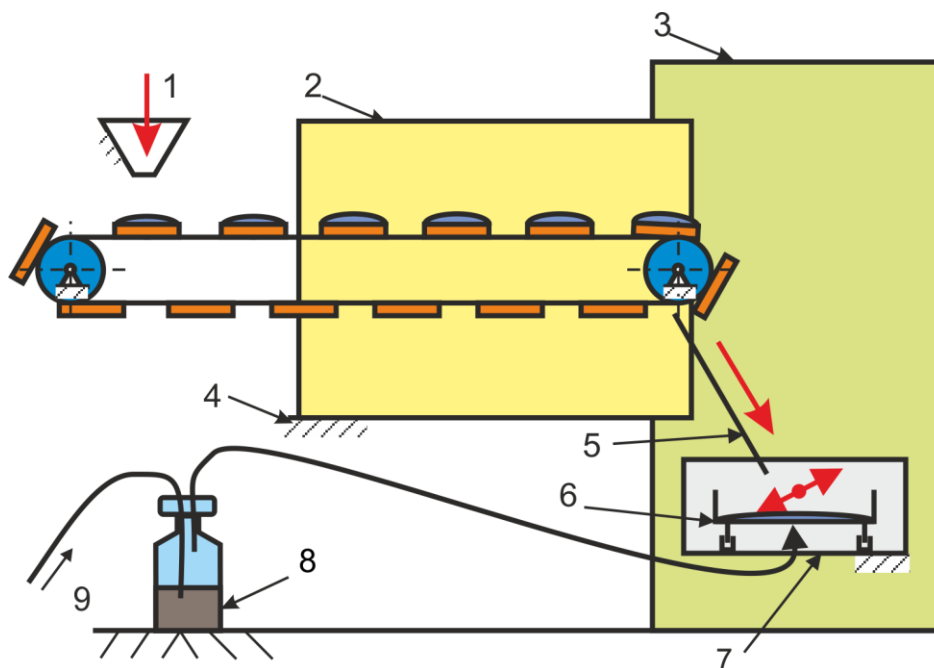
- listrování,
- irizování,
- stříbření, zlacení a platinování, similizování (kap. 11.3.3.1),
- vakuové napařování (vakuové pokovování, kap. 11.3.3.4),
- voskování,
- lakování (uvedeno výše v této kapitole),
- malování a lazurování.

Vrstvy v bižuterii jsou velmi rozmanité, jsou popsány v odborné literatuře, zde je uveden jen jediný zástupce, a to je irizování.

Nejrozšířenější je teplý iris chloridu titaničitého, kdy se páry kovových solí usazují na ohřátém skle. Za tepla se irizují skla sytě barevná, způsobující zvýšený barevný efekt dokonalým odrazem na rozhraní vzduch – vrstva a vrstva – sklo. Chlorid titaničitý (TiCl_4) je dodáván v kapalném stavu a páry se získávají probubláváním suchého vzduchu kapalinou, což umožňuje libovolně dlouhou dobu expozice. Suchý vzduch se používá z důvodu nebezpečí reakce se vzdušnou vlhkostí. Různou dobou expozice lze dosáhnout různé tloušťky vrstvy a tím i různého zabarvení, které je možné rozdělit podle zvětšující se tloušťky do těchto po sobě jdoucích stupňů: šedá, hnědá, modrá, zelená, červená, ostře zelená, ostře červená.

Proces je prováděn většinou na poloautomatických strojích s obsluhou, Obr. 11.38. Výrobky jsou dávkovány na talíře uložené na dopravníku, který se pohybuje přetržitě. Jsou dopravovány do pece a prohřívány na teploty od 300 do 350 °C, poté padají přes skluz na síto. Páry jsou vedeny z láhve, do které je přiváděn suchý vzduch pod mírným tlakem. Páry působí na výrobky na sítu umístěném v peci s teplotou přibližně 100 °C. Síto se přičně

pohybuje tam a zpět, aby byl dekor rovnoměrný. Po požadované době je síto nakloněno a výrobky jsou ze stroje vysypány do boxu a pak prány ve vodě, aby se odstranily chloridy z jejich povrchu.



Obr. 11.38 Schéma technologie zušlechťování irizováním teplým TiCl_4 : 1 – dávkování, 2 – vyhřívání na 300 až 350 °C, 3 – pec, 4 – rám stroje, 5 – skluz, 6 – síto, 7 – otvor pro vysypání výrobků, 8 – láhev s chloridem titaničitým, 9 – přívod tlakového vzduchu

11.3.4 Spojování – lepení

Mezi chemické postupy lze zařadit i lepení skla. Pro spojování skla lze obecně použít tří skupin lepidel:

- silikony – jednosložkové tmely a lepidla zpevňující reakcí se vzdušnou vlhkostí,
- dvousložková lepidla – zpevňující po přesném smíchání základní hmoty s tužidlem,
- jednosložková lepidla – k vytvrzení dochází působením UV záření nebo aktivováním povrchu, výsledný spoj je transparentní a velmi pevný.

Vytváření „neviditelných“ spojů, např. u lepených ověsových figurek se dnes provádí především pomocí UV lepidel, které po ozáření UV světlem fotochemicky polymerují. Zpevnění vrstvy se provádí osvětlením UV lampou se zářením o vlnové délce 315 – 400 nm. Pomocí těchto lepidel je možné vytvářet spoje nejen sklo – sklo, ale i sklo – kov, sklo – plast, případně i sklo – dřevo, sklo – kámen. Mohou být dvousložková, čirá nebo zabarvená a speciální dokonce nevyžadují UV lampu a vytvrzují se i za denního světla. Pro různé aplikace se vyrábějí lepidla s různou viskozitou (nízká, střední, vysoká), indexem lomu a pevností. Vytvrzení proběhne většinou do několika sekund.

Tato pojiva nejsou vhodná tam, kde je nutný elastický spoj nebo tam, kde je spoj vystaven trvalému působení vody. U objektů umístěných ve venkovních prostorech musí být spoj překryt ochrannou vrstvou neutrálního silikonu.

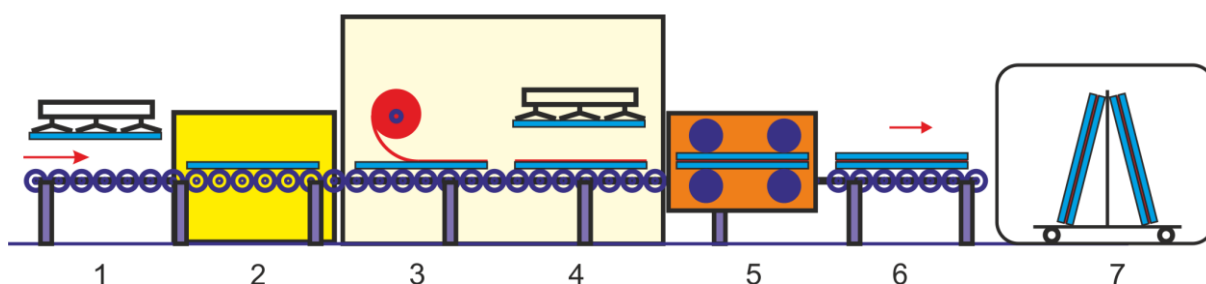
11.4 Zvláštní techniky zpracování a zušlechťování

Další technologií, kterou nelze zařadit mezi mechanické nebo tepelné způsoby zpracování je vrstvení (lepení) skla pomocí plastových fólií a další typy vrstvených skel. Ve své podstatě se nemusí jednat pouze o sklo ploché, ale ploché sklo je u níže zmíněných technologií nejčastější.

11.4.1 Vrstvené ploché sklo

Vrstvené ploché sklo se uplatňuje v architektuře a u automobilových skel (lze se také setkat s pojmem bezpečnostní vrstvené sklo). Ploché vrstvené sklo je složeno minimálně ze dvou tabulí skla a jejich spojení za pomoci přilnavé elastické vrstvy (nejčastěji polyvinylbutyral – PVB nebo etylenvinylacetát – EVA). Použité sklo může být vyrobeno technologií FLOAT nebo se může jednat o ornamentní lité sklo, dále ohýbané, barvené, s potiskem, chemicky matované a další. Elastické vrstvy mohou být barvené, s potiskem, s protihlukovými vlastnostmi a podobně.

Základní operace při výrobě vrstveného skla jsou příprava skleněné tabule, prokládání fólie, předlisování, někdy řezání skla a závěrečné lisování při zvýšené teplotě v autoklávu, schéma linky je na Obr. 11.39. Při procesu výroby jsou dodržována velmi přísná pravidla pro čistotu, protože jakákoliv nečistota, která by se dostala mezi tabule skla a fólii snižuje jakost výrobku.



Obr. 11.39 Schéma automatické výrobní linky na výrobu vrstveného skla: 1 - pokládání skla, 2 - mytí, 3 - aplikace PVB fólie, 4 - pokládání horního skla, 5 - předlisování, 6 - překládání na stojan, 7 - autokláv

Na začátku procesu jsou přířezy požadovaného tvaru nejprve omyty demineralizovanou vodou o mírně zvýšené teplotě a za použití válcových rotujících kartáčů. Následně jsou dokonale usušeny přehřátým vzduchem.

Nejčastěji používaná PVB fólie je dodávána ve speciálních obalech, které zabraňují přístupu vlhkosti. PVB fólie totiž váže část vlhkosti a tím mění některé své vlastnosti. Fólie je také skladována při 8 až 10 °C. Samotné prokládání je často řešeno ručně a u moderních linek se tak jedná o jediný výrobní krok, který není automatizován. S automatizací prokládání se lze také setkat, má však své specifické problémy. V případě ručního prokládání se často jedná o klimatizovanou místnost, kde je udržována teplota na 25 °C, vlhkost vzduchu na 30 % a místnost je udržována v mírném přetlaku. Po uložení fólie na sklo a položení horního skla na fólii proběhne ořez přebytečné fólie. Pro výrobu vrstveného skla se používá PVB fólie tloušťky 0,38 mm nebo 0,76 mm, ve zvláštních případech je možné fólii aplikovat ve více vrstvách.

Předlis se provádí několika technologiemi, jednou z nich je použití pryžových válců. Při předlisování dojde k co možná maximálnímu vypuzení zbytkového vzduchu mezi tabulemi skla a fólií a k předběžnému spojení tabulí skla.

Tabule skla mohou být děleny před závěrečným lisováním nebo po něm. V obou případech se dělí pomocí lámání skla po naškrábnutí (kap. 11.1.1.1). K naříznutí musí ovšem dojít z obou stran, a to velmi přesně. Lámání probíhá pomocí lámacích válců, které postupně odlomí spodní a vrchní tabuli zdvojeného skla. Při lámání jsou oddělované části od sebe odtahovány (aby se zabránilo poškození hran skla) a za současného ohřevu odporovým drátem, při kterém dojde k přetavení PVB fólie. Pokud jsou lepená skla složena z více než dvou vrstev plochého skla, je nutné k dělení použít diamantového kotouče, případně jiné technologie.

Lisování se provádí v autoklávu, při kterém se dosáhne dokonalého spojení tabulí skla s PVB folií. Po provedení předlisu (a případném dělení) jsou skla naskládána do stojanu, který umožňuje transport a také dokonalé vyplnění autoklávu. Skla na stojanu jsou hermeticky uzavřena v autoklávu a v něm je zvýšena teplota na 140 °C a tlak na 1 MPa (10 barů). Tlak i teplota jsou na základě nastaveného cyklu udržovány v autoklávu po dobu 5,5 až 6,5 hodiny. Doba lisování je určena tloušťkou použité PVB fólie. Na závěr je v autoklávu postupně snížena teplota pomocí vodních chladičů, snížen tlak a po otevření víka pracovního prostoru je stojan s hotovými výrobky vyvezen.

11.4.1.1 Vrstvené sklo s dalšími vlastnostmi

Vedle zlepšených mechanických vlastností, bezpečnostních vlastností a zvýšené ochrany poskytují vrstvená skla i další zlepšení vlastností samotného kompozitu.

Jedná se o **sklo regulující prostup záření**, kterého může být dosaženo použitím skla barveného hmotě, použitím reflexních skel nebo použitím PVB fólie s vlastnostmi regulujícími prostup záření.

Protihlukové vrstvené sklo je vybaveno fólií, která zlepšuje akustické vlastnosti skla.

Vrstvení skla, většinou s více než dvěma skly a více než jednou fólií, je používáno pro výrobu **neprůstřelného skla**. Kompozit je složen ze skel větších tloušťek, které jsou na straně, kde se předpokládá případný útok (větší tloušťka pohltí více energie), několika PVB fólií vrstvených i na sebe a tenčího skla, které má zabránit průniku střepů na chráněnou osobu. Často je kompozit ještě doplněn lepeným sklem (ze dvou tabulí spojených jednou fólií) do vzdálenosti 50 mm, aby se zabránilo jakémukoliv průniku střepů na chráněnou osobu. Vedle neprůstřelných skel existují skla s ochranou před násilným vniknutím, která jsou proti sklu neprůstřelnému méně odolná. Na druhou stranu existují skla s ochranou proti prostřelení a výbuchu, která jsou odolnější než skla neprůstřelná.

Lepená skla mohou mít ve fólii umístěné tekuté krystaly, které se při průchodu elektrického pole natočí tak, že umožní průchod světla. Vzniká tak sklo, které umožňuje **změnu průhlednosti** podle potřeby. V případě že elektrické pole přestane působit, tekuté krystaly se natočí náhodně a způsobí neprůhlednost. Takovéto řešení umožňuje už dnes úplnou opacitu. Uplatnění nalézá toto sklo v interiérech, například při oddělení toalety od koupelny. Dále například u rychlovlaků pro oddělení kokpitu a cestujících. Lze se setkat

s použitím tohoto skla i u prosklených střech automobilů. Zastínění je tak otázkou vypnutí a zapnutí ovládacího prvku na přístrojové desce.

Ve fólii může být také **integrované LED osvětlení**. Mohou to být samostatné LED diody propojené tenkými drátky nebo průhlednou vodivou vrstvou. V blízké budoucnosti je velmi pravděpodobné využití integrovaného LED osvětlení a následně OLED¹⁸ technologie u dvojskel s nezávislým řízením každé RGB diody (pixelu).

11.4.2 Skla se zvýšenou odolností proti ohni

Sklo zpomalující šíření požáru díky své vysoké odolnosti vůči jeho účinkům je často nazýváno sklem protipožárním. Úkolem a primární funkcí tohoto výrobku je zachovat si při běžném provozu optické vlastnosti běžného čirého skla a v případě požáru chránit uživatele před jeho účinky, a to po předem známou dobu. Cílem je umožnit uživatelům bezpečný únik z prostoru požáru a účinně zpomalovat jeho šíření. Vedle základní ochrany před pronikáním kouře nebo plamenů nabízí dnes protipožární sklo také vysoký stupeň tepelné izolace jako ochranu před pronikajícím teplem nebo zneprůhlednění skla vlivem vysoké teploty pro omezení panikového chování uživatelů. Hlavním parametrem výkonnosti je vždy čas, po který si sklo zachovává požadovanou funkci při testování podle platných norem.

Protipožární skla s tepelně reaktivní vrstvou jsou založena na principu vrstveného skla spojeného čirými mezivrstvami, které mohou nabobtnat a v případě požáru se mezivrstvy rozpínají při zhruba 120 °C a mění se v neprůhledný štít. Toto zasklení přitom splňuje kritérium celistvosti, kdy zasklení nepraskne ani nepropustí zplodiny hoření a navíc splňuje kritérium izolace, kdy takové sklo nepropustí ani sálavé teplo, ani kondukcí. Specifikum transparentních protipožárních konstrukcí je v tom, že zasklení a rám v kombinaci vytváří konstrukci odolnou ohni. Proto je sklo testováno vždy s konkrétním typem uchycení nebo profilu. Pro tento typ zasklení je také velice důležitá instalace skla, která podléhá zpravidla podrobnému instalačnímu manuálu.

11.4.3 Sklo pro solární aplikace

Sklo pro solární aplikace je používáno v mnoha podobách, těmi hlavními je využití pro stavbu zařízení pro získání ekologicky „čisté“ energie. Základní uplatnění jsou:

- solární panely pro ohřev teplé vody,
- solární fotovoltaické panely,
- zrcadla pro solární termální (koncentrátorové) elektrárny.

Kapacity **solárních panelů pro ohřev vody** v roce 2014 byly 406 GW ohřáté teplé vody (v roce 2004 to bylo pod 100 GW). Tyto panely mají několikanásobně větší účinnost (60 % oproti uváděným 15 % fotovoltaických článků). Převážnou část tvořily skleněné panely vyrobené z plochého skla nebo trubic (nad 95 %). Ploché sklo používané pro výrobu solárních panelů je buď vyrobené technologií plavení (kap. 9.6.3) nebo technologií lití (kap. 9.6.2). U technologie lití jsou skla často opatřena na spodní straně strukturou (často výstupky

¹⁸ OLED - Organic Light-Emitting Device, typ displeje využívající technologii organických elektroluminiscenčních diod.

tvaru čtyřbokého jehlanu), která zlepšuje zpětný odraz slunečního záření směrem do kolektoru. Trubicové solární panely jsou vyrobeny z několika trubic v řadě. Časté jsou vakuové solární kolektory složené ze dvou tenkostěnných trubic (tloušťka stěny okolo 1 mm), mezi kterými se nachází vakuum, které snižuje tepelné ztráty.

Kapacity **solárních fotovoltaických (PV) elektráren** stále rostou. V roce 2004 bylo tímto typem elektráren celosvětově vyrobeno 3,7 GW elektrické energie, ale v roce 2014 již 177 GW. Takto prudký nárůst je dán především politikou podpory výkupu elektrické energie vyrobené touto technologií. Účinnost běžných PV panelů, které využívají monokrystalické nebo polykrystalické křemíkové články, je okolo 15 % (na připojení do sítě). Výroba elektrické energie tímto způsobem by bez legislativní podpory nebyla konkurence schopná s jinými méně ekologicky „čistými“ technologiemi výroby elektrické energie. Cílem je proto dosáhnout účinnosti průmyslově vyráběných PV panelů blížící se k 40 % a předpokládá se především využití širokospektrálních solárních článků, zpracovávajících záření ve viditelném, ale také z části v infračerveném spektru (současný rekord u laboratorních zařízení je 46% účinnost na článku). Jedná se o systém, který využívá až 900-ti násobně koncentrované záření dopadající na plochu vícenásobného polovodičového článku, např. galium-indium-fosfid/galium-indium-arsenid/germanium. Rozvíjí se i tenké filmy nebo organické PV články, které mají nižší účinnost než křemíkové PV články, ale jsou relativně levné. Všechny uvedené články využívají především skla jako velice trvanlivého, pevného, transparentního materiálu, které fotovoltaickou technologii nejen chrání, ale umožňuje její snadnou instalaci a navigaci vůči poloze slunce.

Nárůst světových kapacit elektráren je tak spojen i s poptávkou po skle pro výrobu PV panelů. Sklo používané pro panely je výhradně sklo ploché plavené nebo lité, čiré s nízkým obsahem železa, často opatřené antireflexní úpravou nebo se speciálním strukturovaným povrchem umožňujícím zachycení maximálního množství slunečního záření. Skla jsou často tvrzená tak, aby při tloušťce běžně 3 mm měla dostatečnou odolnost proti proražení a mohla odolávat významným rozdílům teploty. Pro umístění článků pod ochranné sklo se používá adaptované technologie výroby používané pro bezpečnostní sklo vrstvené. Mezivrstva používaná pro tyto výrobky je v naprosté většině případů EVA a PVB. Folie EVA má obecně lepší vlastnosti pro výrobu PV článků, neboť má v průběhu laminace nižší viskozitu a je tak schopna lépe vyplnit veškeré mezery a nerovnosti vzniklé mezi PV článkem a sklem. Sklo s články může být uchyceno v rámu se zakrytým obvodem tabule nebo stále častěji s hranou obnaženou pro dosažení maximální energeticky účinné plochy. V tomto případě je velice důležitá dlouhodobá stabilita hrany vůči účinkům vody i změnám teploty.

Sklo pro solární fotovoltaické panely sleduje v současné době tři trendy: tenké sklo plavené (maximalizace transparence), extra čiré sklo plavené s minimem barvicích oxidů, lité sklo s povrchovou strukturou, která snižuje odrazivost a zvyšuje účinnost solárních panelů.

Solární termální elektrárny využívají koncentrovaného slunečního záření pro ohřev tekutého média, ze kterého je ve výměníku vyráběna pára, která roztáčí turbíny (většinou v kombinaci s plynovou nebo uhelnou elektrárnou). Existují 3 základní typy těchto elektráren:

- centrálně umístěný absorbér energie (zrcadla jsou umístěna kolem věže, tzv. absorbéro), na jehož vrchol směřuje odražené sluneční záření, v absorbéro je většinou teplo předáváno kapalině primárního okruhu, ten zahříváním vody vyrábí páru, která pak pohání běžnou parní turbínu),
- parabolické žlaby (zrcadla mají podobu části válce a koncentrují energii na trubici s protékající kapalinou, která stejně jako u předchozího typu zahřívá vodu a ta pohání turbínu) a
- parabolické disky (v ohnisku disku je umístěn Stirlingův motor, který umožňuje dosáhnout účinnosti přes 31 %).

Solární termální elektrárny využívají skla jak pro výrobu parabol, tak například trubic pro rozvod ohřívajícího média u parabolického žlabu.

11.4.4 Autoskla

Velmi důležitou technologií výroby je výroba autoskel, která má vysokou přidanou hodnotu. Jedná se o produkty, které jsou neustále inovovány a inovací prochází i jednotlivé výrobní operace. Výroba je tak u většiny typů vysoce automatizována. Polotovarem pro výrobu těchto skel je ploché sklo vyrobené technologií plavení (kap. 9.6.3) přibarvené ve hmotě železem (skla jsou tak modrozelená).

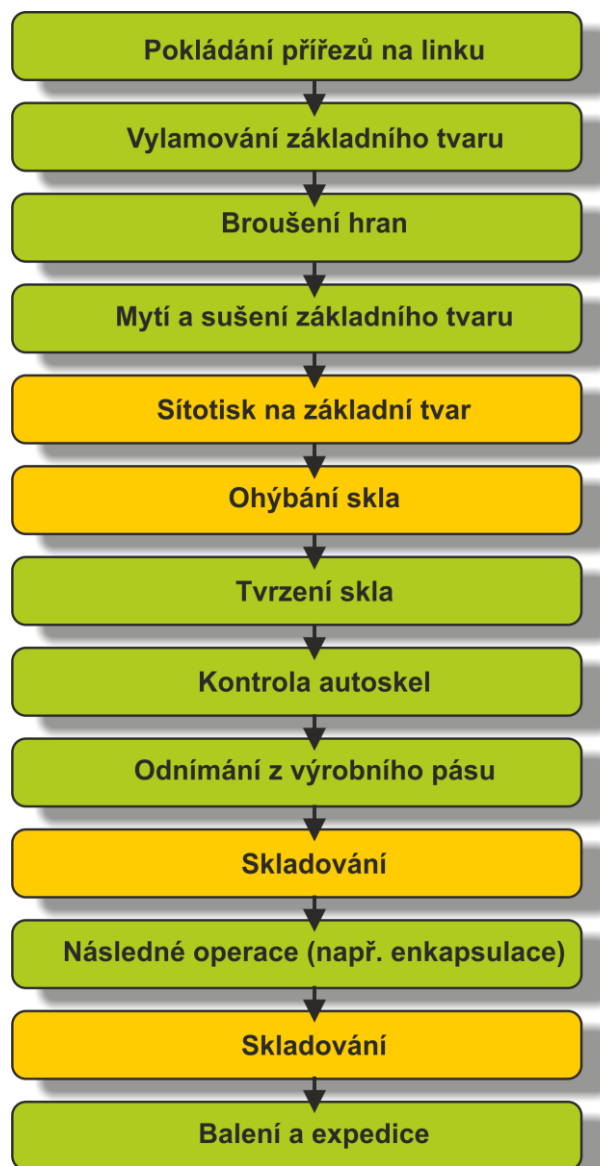
Výrobky lze rozdělit do dvou typů:

- bezpečnostní tvrzené sklo,
- bezpečnostní vrstvené sklo.

Uvádí se, že tvrzené sklo je zhruba desetkrát levnější než vrstvené sklo a je používáno na boční a zadní zasklení aut. Na přední sklo se však z bezpečnostních důvodů musí používat sklo vrstvené. Skla jsou často ohýbána (kap. 11.2.5), mají potisk nanesený technologií síťotisku (kap. 11.3.3.8), mohou mít na povrchu nanесeno vyhřívání, antény a další. Technologie výroby tvrzeného skla je uvedena v kap. 11.2.5. Schéma výrobního procesu tvrzeného automobilového skla je na Obr. 11.40.

Výrobní proces začíná zakládáním přířezů na dopravní část. Velikost přířezů je většinou již přizpůsobena vyřezávané velikosti automobilových skel a je tak dodávána přímo z výrobní linky plochého skla FLOAT. V první fázi jsou skla dělena vylamováním. Nejprve jsou naříznuta kolečkem z tvrdokovu a následně oddělena mechanicky nebo tepelně pomocí nahřívání vybraných míst hořáky (kap. 11.1.1.1). Následuje přesné upnutí polotovaru na broušící stroj, který zbrousí hrany do potřebné kvality. Po broušení následuje mytí a sušení. Dalším krokem může být potisk okrajů pomocí síťotisku, případně nanесení dalších prvků na povrch jako jsou antény GPS, antény rádia, televize nebo vyhřívání skla. Dalším krokem je ohýbání skla gravitačně nebo pomocí razníku a formy. Následuje prudké, ale rovnoměrné zchlazení, kterým se v povrchu skla vyvolá žádané trvalé tlakové napětí. Po zchlazení na teplotu blízkou teplotě okolí jsou výrobky odnímány z linky a skládány na stojany. Kontrola

kvality se buď provádí pro každý kus (optické vady) nebo po několika kusech před odnímáním skla nebo až následně pro kontaktní ověření správného tvaru.



Obr. 11.40 Schéma výrobního procesu tvrzeného automobilového skla

Bezpečnostní vrstvené sklo (nazýváno také bezpečnostní lepené, kap. 11.4.1) je používáno pro přední skla automobilů. Přesto lze předpokládat, že se budou stále více uplatňovat ve vyšší třídě automobilů i u bočního a zadního zasklení, a to vzhledem k lepším akusticko-tepelně-izolačním vlastnostem a integraci nových funkcí. Schéma výroby vrstveného skla pro automobily je naznačeno na Obr. 11.41.

Vrstvená přední skla jsou ohýbána, tabule tvořící vnější povrch je o něco větší než vnitřní. Nerovné okraje je obtížné vyrovnávat následným opracováním, proto je výhodnější připravit tvar obou skel již při řezání. Linka pro vylamování polotovarů a broušení je tak často zdvojená. Následuje potisk vnějších okrajů skla pomocí sítotisku. Skla se posypou jemným

práškem, aby se následně neslepila, a skládají se před procesem gravitačního tvarování. Obě skla (vnitřní i vnější) pak putují výrobním procesem ohýbání na propadových formách spolu. Po tvarování je sklo pozvolna ochlazeno, aby v něm nevzniklo trvalé napětí. Skla jsou opět rozložena, umyta a usušena. Následuje vkládání PVB fólií, jejich ořezání a předlis, který je již prováděn na ohnutých sklech s fólií pomocí profilovaných válců. Potřebný profil je vytvořen pryžovými kotouči různého průměru sestavených tak, aby předlisovací „válce“ kopírovaly zakřivení povrchu ohýbaného skla. Dalším krokem je lisování v autoklávu za zvýšené teploty a tlaku. Pak následuje kontrola a může také následovat upevnění držáku na zpětné vnitřní zrcátko.

Oba typy skel jsou následně zpracovávány. Nejčastěji se jedná o tzv. enkapsulaci, kdy je celé sklo zataveno do plastových rámců, které slouží k zalepení nebo montáži skla do automobilu. Skla mohou být také opatřena různými držáky a přípravky, které se lepí nebo jsou upevněny v rámci zmíněné enkapsulace. Takto vyrobené sklo je dodáváno na montážní linky automobilů, kde je montováno nebo vlepováno přímo do karoserie.

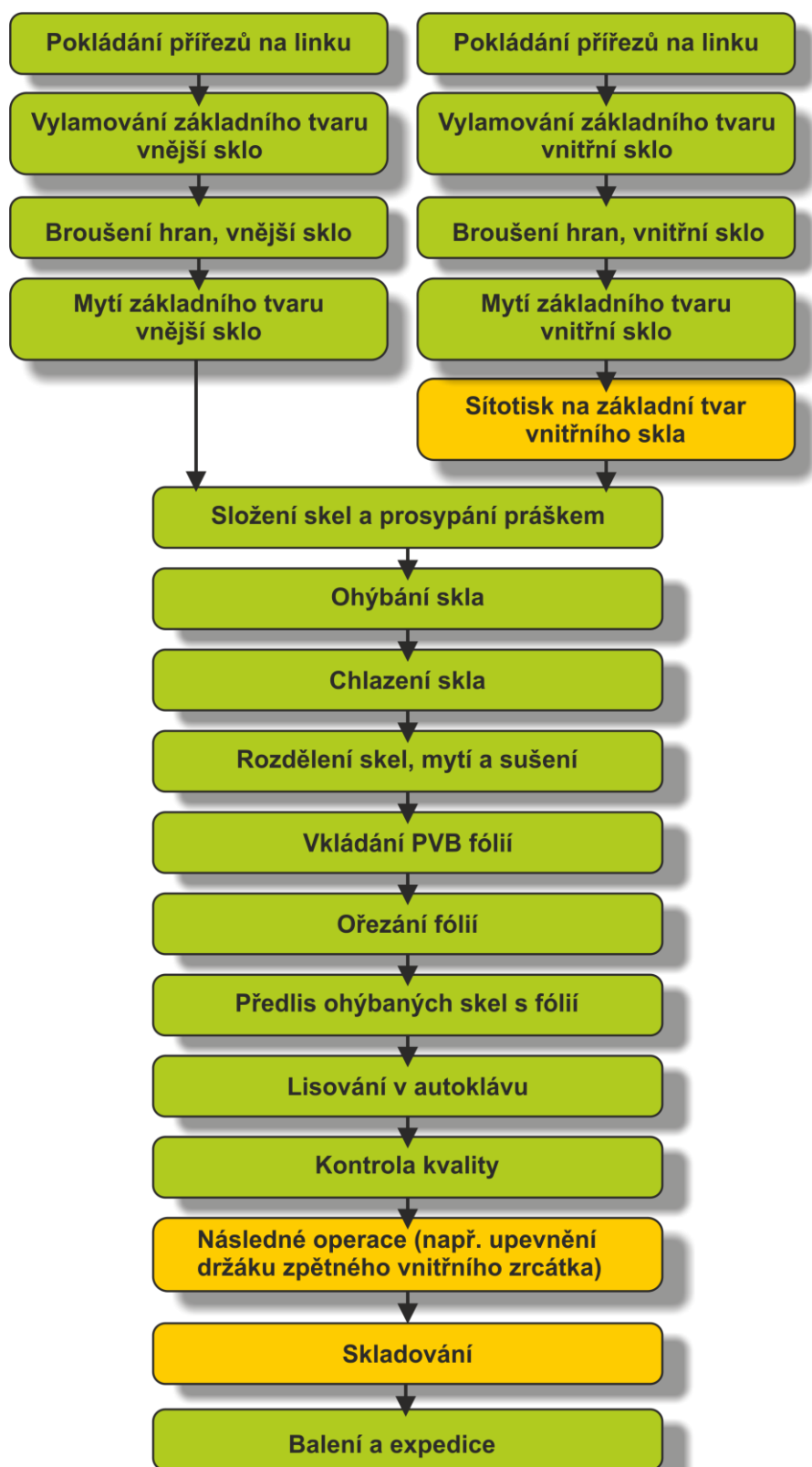
11.4.5 Další technologie a výrobky

Trendem je integrace dalších funkcí do autoskel. Jsou to například průhledné vrstvy pro vyhřívání skla, komunikační prvky (anténa rádia, TV, nebo GPS), dešťové senzory, úchyty zpětných zrcátek, hydrofobní povlaky zamezující ulpívání kapek vody na skle při dešti, vyhřívání části pro průhled stále častějších kamer, speciální fólie na čelním skle pro head up displeje (HUD), samozakalovací skla, která mění průhlednost po zmáčknutí ovladače, elektrochromní skla, povrchové úpravy zamezující zamrzání skla a rosení a další.

Head-Up displeje jsou dnes zaváděny a jsou založeny na odrazu užitečných údajů pro řidiče na čelním skle. Skládají se z promítací jednotky a z průhledné vrstvy mezi skly, která umožní odraz informace do očí řidiče. V zorném poli řidiče jsou tak zobrazovány důležité informace (aktuální rychlost, povolená rychlost, navigace, atd.), což zvyšuje bezpečnost řízení, neboť řidič nespouští oči ze silnice před sebou.

V současné době se již prodává sklo s označením POWERGLAS. Jedná se o speciálně upravená dvojskla, která jsou opatřena fólií zajišťující vyhřívání. Na speciálně vrstvené skleněné desce je přiveden elektrický proud, který se v důsledku odporu polovodiivých vrstev promění v tepelnou energii. Za pomoci teplo odrážející vrstvy se až 90 % tepelné energie rovnoměrně odráží zpět do obytného prostoru. Díky tomu se odstraní studené zóny z blízkosti oken. Tento způsob využití sálavého tepla je srovnatelný s vytápěním podlahy nebo stěn.

Dalšími výrobky jsou vrstvená skla s mezivrstvou tvořenou nebo obsahující skleněná vlákna proměnlivého průřezu určená pro difúzní osvětlení, např. galerií a prostorů s nárokem na uniformní osvětlení, izolační skla s integrovanými žaluziemi, plynochromická izolační skla pro změnu světelných a energetických vlastností zasklení, izolační skla s komorou vyplněnou aerogelem pro zvýšení tepelně izolačních vlastností. Sklo zde slouží buď primárně pro zajištění určité funkce, či jako materiál krycí nebo zlepšující funkci nějakého zařízení nebo materiálu.



Obr. 11.41 Schéma výrobního procesu vrstveného automobilového skla

12 Vady skla a skleněných výrobků

Ze zkušeností získaných při sledování sklářské výroby plyne, že žádné průmyslově vyráběné sklo se nevyhne riziku přítomnosti některé z častých vad. Vady vznikají a objevují se postupně ve všech fázích sklářské výroby a jejich včasná identifikace umožňuje provádět takové zásahy do technologického procesu, které tyto vady pomáhají odstranit nebo alespoň minimalizovat. V následující kapitole bude provedena stručná klasifikace těchto vad a uvedeny konkrétní příklady, s kterými je možno se v praxi setkat.

12.1 Vady vznikající při výrobě skloviny až po její přípravu ke tvarování

12.1.1 Kamínky

Jedná se o přítomnost krystalické fáze, která může mít různé příčiny.

Kamínky ze žárovzdorných materiálů, které se uvolňují nejčastěji ve fázi tavení (tavení, čerení, homogenizace), zdrojem může být koroze žárovzdorných materiálů nejčastěji na fázovém rozhraní (vyzdívka, hladina skloviny, pecní atmosféra), ale i na jiných místech tavicího agregátu, např. uvolňování kamínků z klenby apod. Chemické složení i krystalická fáze odpovídá použitému žárovzdornému materiálu, takže rozlišujeme kamínky z křemičitých materiálů (dinas, tavený křemen, ostatní žárovzdorné křemičité materiály), kamínky z hlinitokřemičitých materiálů (šamot), kamínky z vysocehlinitých materiálů (mullit, silimanit), kamínky z materiálů na bázi Al_2O_3 , kde obsah oxidu hlinitého zpravidla přesahuje 90 % (korundové materiály), kamínky z materiálů hlinito-zirkoničito-křemičitých (označovaných AZS), kamínky z materiálů zirkoničito-křemičitých (zirkoniových), kamínky z materiálů obsahujících Cr_2O_3 , event. další,

Kamínky ze vsázky, zde bývá nejběžnějším zdrojem nejobtížněji se rozpouštějící surovina křemenný písek, ale i další zdroje. Jak již bylo řečeno, jedná se nejčastěji o kamínky z neprotaveného písku, kamínky z doprovodných minerálů nacházejících se v písku (např. kyanit, chromit), kamínky z hydrátu hlinitého a konečně i kamínky ze znečištěné vsázky (doprava, použití vlastních a cizích střeptů apod.),

Kamínky vytvořené krystalizací skla (produkty odskelnění). Jako příklad je možno uvést β -cristobalit, γ -tridymit, devitrit, β -wollastonit, diopsid a další produkty krystalizace skla.

Pokud se kamínky dostanou až do hotového výrobku, projevují se nejen opticky jako nepřipustná vada, ale v důsledku odlišného chemického složení od okolního skla dochází na fázovém rozhraní k vnitřnímu napětí, které může způsobit i porušení výrobku.

12.1.2 Skelné nehomogenity – šlíry

Šlíry jsou skelné nestejnorodosti ve skle. Jedná se o sklo, které se svými vlastnostmi liší od okolního skla a je tedy viditelné. Šlíry, které se svým chemickým složením liší od okolního skla, se nazývají šlíry chemické, šlíry, které se svým složením od okolního skla neliší, jsou šlíry tepelné (některými autory je existence tepelných šlír odmítána).

Mezi šlírami a okolním sklem může vzniknout vnitřní napětí i u výrobků dobře vychlazených. Stává se to tehdy, když chemické složení a tedy i teplotní roztažnost šlír se

liší od okolního skla. Tento rozdíl v teplotní roztažnosti způsobuje, že se obě skla při ochlazování smršťují jinak, čímž může dojít nejen ke vzniku vnitřního napětí, ale i k popraskání.

12.1.3 Plynné nehomogenity ve skle – bubliny

Bubliny sehrávají při výrobě skla dvojí roli. V samotném tavicím procesu je jejich působení většinou příznivé (podporují konvekci a přispívají tak k homogenizaci taveniny), nejsou-li však ze skloviny včas odstraněny, způsobují nepřijatelnou vadu.

Ve fázi tavení je důležitý původ plynů a jejich rozpustnost ve sklovině (jednak fyzikální, jednak chemická), dále kinetika chování bublin ve sklovině (zejména rychlost vzestupu), růst a rozpouštění bublin ve sklovinách a v souhrnu vliv teploty, tlaku a složení skloviny na rychlost odstraňování bublin. Nejčastějším původem jsou bubliny vzniklé chemickými a elektrochemickými reakcemi a konečně bubliny vzniklé mechanickou cestou. Sem patří bubliny vzniklé z okolní atmosféry (míchání skloviny, dávkování skloviny, odstřih kapky apod.), bubliny pocházející ze žárovzborných materiálů i bubliny pocházející z chladicí vody. Pro konečnou kvalitu skleněného výrobku je nutné zdroje bublin a jejich růst omezovat a pokud možno jejich existenci potlačit.

12.1.4 Vady zabarvení skloviny

Tyto vady mohou být způsobeny nepřesností při výpočtu složení vsázky, předávkováním barvicích složek nebo naopak nedostatkem odbarvovacích přísad. Rovněž se může negativně projevit uvolňování barvicích složek (například sloučenin chromu) ze žárovzborného materiálu, ale i nevhodné použití „cizích“ střeptů jako suroviny ve vsázce. Tyto vady jsou absolutně nepřijatelné v oblasti výroby plochých skel, optických skel, ale i ve výrobě skleněné bižuterie. Do jisté míry se mohou tolerovat při tavení skloviny pro obalové sklo (hnědé nebo zelené láhve). I odbarvování skla (potlačení barevného odstínu způsobeného obsahem oxidů železa v sklářském tavném písku) je možno na toto místo zařadit.

12.2 Vady vznikající při tvarování

Sem jsou řazeny vady vznikající při tvarování skloviny až po začátek chlazení (vady způsobené odstřihem kapky, příliš vysokou anebo naopak nízkou teplotou tvarovací formy, vady způsobené deformací výrobku v důsledku nedodržení technologie, vady vzniklé nedostatečným odvodem tepla a další). Specifickým příkladem této vady je nestandardní tloušťka vyráběného pásu skla FLOAT při přechodu z jedné hodnoty tloušťky pásu na hodnotu jinou (veškeré vyráběné sklo mezi rozměry původní a nové tloušťky je nutno střeptovat).

12.3 Vady vznikající při chlazení skla

Nesprávným postupem při chlazení skleněných výrobků mohou vzniknout různé vady. Některé jsou okamžitě zřejmé (deformace, praskání, změna barvy), jiné nelze na první pohled postihnout (vnitřní napětí, zvýšená křehkost).

Pod pojmem dobré nebo špatné chlazení výrobků se rozumí velikost vnitřního napětí. Dobře vychlazený výrobek obsahuje vnitřní napětí přípustné velikosti, špatně vychlazený výrobek má vnitřní napětí přesahující přípustnou velikost.

12.4 Vady vznikající při zpracování a zušlechťování skla

Do této skupiny náleží mj. sekundární odskelnění, sekundární vznik bublinek, praskání a všechny vady způsobené nedodržením technologického postupu při zpracování nebo zušlechťování skla.

12.5 Vady dodatečné

Do této skupiny jsou řazeny vady projevující se v průběhu manipulace, dopravy, skladování a užívání skleněného výrobku (samovolné praskání, vady povrchu jako je např. zvětrávání, solarizace aj.).

Vady se dělí na opravitelné, neopravitelné a vady zařazující výrobek do nižší třídy jakosti. Vady musí být pokud možno včas detekovány, aby se nezvyšovala ztráta dalším zpracováním nekvalitního výrobku, který bude nakonec stejně vyřazen. Kontrola jakosti je tak nezbytnou součástí výrobního procesu a to od ruční výroby až po plně automatizovanou.

13 Kontrola jakosti

Během výrobního procesu mohou vznikat vady na výrobcích, které jsou nežádoucí. Kontrolu jakosti lze obecně provádět:

- kontaktně,
 - bez porušení výrobku,
 - s porušením výrobku,
- bezkontaktně.

Kontaktní metody jsou založeny na přímém kontaktu s testovacím přípravkem nebo zařízením. Často jsou zaměřeny na mechanické testování výrobků, ale mohou být také využity pro testování správného tvaru (např. pomocí tzv. maket u autoskel).

Prakticky vždy je u výrobků ze skla prováděna (převážně bezkontaktní) vizuální kontrola, která může být provedena:

- pouze operátorem - jeho znalosti umožňují vyhodnotit kvalitu výrobku, jedná se o relativně nejsnazší způsob kontroly, který je ale zatížen zkušenostmi operátora a například i jeho únavou,
- pouze operátorem při srovnání s etalonem - opět jsou důležité zkušenosti operátora, ale etalon umožňuje částečně eliminovat rozdíly v hodnocení,
- digitálním srovnáním s etalonem/vzorem - používány jsou průmyslové kamery, které provedou srovnání s etalonem/vzorem uloženým v paměti počítače a vyhodnotí odchylky od požadovaného stavu,
- komplexní automatické vyhodnocení (případně i rozpoznání typu vady) - jedná se o pokročilé systémy kontroly jakosti, které komplexně hodnotí jakost výrobku, používají laserů a průmyslových kamer.

13.1 Kontrola jakosti při výrobě plochého skla technologií plavení

Systém kvality se liší podle výrobků a technologií. Příkladem uplatnění velmi komplexní kontroly je výroba plochého skla technologií plavení.

Detektory vad pro jádrovou jakost jsou používány na principu laserů nebo průmyslových kamer a jsou zařazeny za myčkou skla. Detektory musí být schopny podat informaci nejen o velikosti/závažnosti vady, o její poloze, ale také o hustotě vad na daný rozměr a čas. Obecně se používá hodnota počtu vad ve vztahu k ploše skla, např. na 10 m², ve vztahu ke stanovené době výroby, např. za 6 minut, hodinu a den. Současné detektory umí i rozdělení vad do základních kategorií, jako je čočka, nit, bublina, sulfát, cín, atd. Informace o vadách jsou okamžitě předány pracovníkům hutního provozu jako zpětná vazba pro zásah k odstranění vad.

U plochého skla je dále kontrolována optická kvalita, kde základními parametry jsou:

- světelná propustnost - provádí se pro oblasti viditelného optického záření, ultrafialového a infračerveného záření,
- zebra test - je důležitý především u automobilového skla, kdy sklo nesmí zkreslovat průhled řidiče,
- corrugation test - je zaměřen na optickou kvalitu v reflexi a je důležitý při výrobě zrcadel,
- šlírový test - odhaluje nepřípustné šlíry ve skle způsobené nehomogenitou skloviny nebo prouděním cínu v lázni.

Kontrola kvality povrchu je neméně důležitým parametrem jakosti skla zejména pro automobilový průmysl. Jedná se především o škrábance, odřeniny, střepy a pod.

13.2 Kontrola jakosti při výrobě obalového skla

Dalším příkladem využití pokročilých metod kontroly jakosti je výroba obalového skla. Prováděna je jak bezkontaktní optická kontrola pomocí průmyslových kamer, tak i kontrola kontaktní. Kontrola se provádí často na všech lahvích.

Optická kontrola může využívat 20 i více kamer, které snímají láhev z různých úhlů včetně hrdla a dna. Velmi často je zařízení řešeno formou boxů, které jsou vřazeny na pásový dopravník pro dopravu hotových lahví po zušlechťení na studeném konci. Rychlost kontroly lahví je i více než 500 kusů lahví na víno za minutu. V případě jiných typů lahví a vyšších objemů produkce se zařízení zdvojí, tedy láhve jsou rozděleny do dvou dopravníků a kontrolovány ve dvou boxech současně.

Kontaktní kontrola je často používána pro zkoušku bočním tlakem a kontrolu těsnosti ústí.

14 Závěr

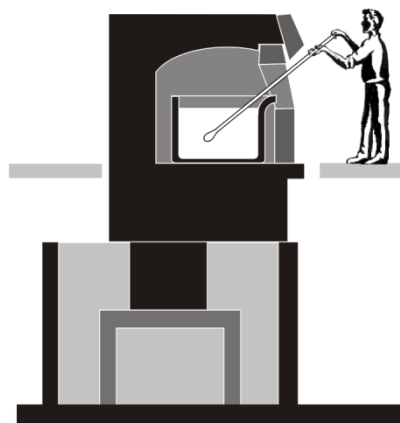
Moderní sklářské linky jsou dnes plně automatizovány a využívají posledních poznatků vědy a výzkumu. Více než 99 % veškeré produkce ze skla v objemových jednotkách je vyráběna na plně automatizovaných zařízeních, kde skláři plní úlohu seřizovačů, technického dozoru, kontroly jakosti anebo sedí u počítačů na tzv. velíně. Sklářská píšťala je dnes spíše symbolem než výrobním nástrojem. Píšťaly však lze na mnoha strojích najít, jsou transformovány do zařízení jako nutná technologická součást výroby.

Znalosti sklářských technologií jsou tak velmi důležité pro současné absolventy sklářských oborů. Obecný přehled, který je v této učebnici uveden, je jen úvodem do znalostí o sklářských technologiích, mechanizaci a automatizaci v dané výrobě. Zde uvedené informace by také neměly být podkladem pro memorování a učení se textu nazpaměť. Měly by spíše sloužit pro pochopení základních principů a jako obecné východisko dalšího studia.

Pokud se zaměříme na stav sklářství v ČR, není žádný důvod k ukvapeným závěrům o konci tohoto průmyslového odvětví u nás. Rozvoj sklářské výroby a jeho trendy v České republice je třeba vnímat v kontextu s evropským sklářským průmyslem a díky silnému vlivu globalizace trhů i v kontextu světovém. Opodstatnění tohoto pohledu podporuje i fakt, že většina českých sklářských firem je vlastněna nadnárodními společnostmi. Ve srovnání se světovou produkcí výroba skla v České republice činí 1,5 % (výroba piva 0,9 %, automobilů 1,6 %). Sklářský průmysl má silně proexportní charakter a vzhledem k přepočtenému množství skla na obyvatele má větší význam pro národní hospodářství než ve většině zemí Evropy. Z výše uvedeného vyplývá, že české sklářství si udržovalo svou úroveň nikoliv lpěním na tradicích, ale díky schopnostem zavádět nové poznatky, technologie a také stroje do výroby.

Literatura

- BARTUŠKA, M. a kol.: Vady skla. 1. vyd. Praha: Práh, 2001.
- BELDA, J.: Sklářské stroje I. Skripta. Liberec: VŠST. 1991.
- BELDA, J.: Sklářské stroje II. Tepelné výpočty. Skripta. Liberec: VŠST. 1986.
- DRAHOTOVÁ, O. a kol.: Historie sklářské výroby v Českých zemích, I. díl, Od počátku do konce 19. století. 1. vyd. Praha: Academia, 2005. ISBN 80-200-1287-7.
- FANDERLIK, I.: Vlastnosti skel. Praha: Informatorium, 1996.
- HOTAŘ, V.: Úvod do výroby komponent skleněné bižuterie. Skripta. Liberec: Technická univerzita v Liberci. 2009.
- HOTAŘ V.: Trendy evropského a světového sklářského průmyslu. Sklář a keramik, 62 (3-4) (2012), s. 55-63.
- HOTAŘ V.: Vize ve vybraných aplikacích skla. Sklář a keramik, 62 (5 -6) (2012), s. 111-116.
- KIRSCH, R. a kol.: Kovy ve sklářství. Praha: Informatorium, 1992.
- KIRSCH, R. a kol.: Historie sklářské výroby v Českých zemích, II. díl/1. Praha: Academia. 2003.
- KIRSCH, R. a kol.: Historie sklářské výroby v Českých zemích, II. díl/2. Praha: Academia. 2003.
- KLEBSA, V.: Technologie skla pro HF. Skripta. Liberec: Technická univerzita v Liberci. 2002.
- KLEBSA, V. – HOTAŘ, V.: Silikáty, sklo, žárovzdorné materiály. Skripta. Liberec: Technická univerzita v Liberci. 2005.
- KLEBSA, V.: Technologie skla a keramiky I. Skripta. Liberec: VŠST. 1983.
- LNĚNIČKOVÁ, J. České a moravské obalové sklo, historie a současnost. Plzeň: G2 studio s. r. o., 2007.
- NOVÁK, L. a kol.: Sklářství, učební texty závodní školy práce. Jablonec nad Nisou: Preciosa. 1996.
- NOVOTNÝ, V.: Vypracování chladicího postupu skleněných výrobků a kontrola jejich chlazení. Sklář a keramik, 1985, roč. 35, č.5, s. 106-110. ISSN 0037-637X
- POPOVIČ, Š. Výroba a zpracování plochého skla. Praha: Grada Publishing, a. s. 2009.
- SHILL, F.: Chlazení skla. Praha: Informatorium, 1993.
- SMRČEK, A.: Strojní tvarování skla. SNTL, Praha 1981.
- SMRČEK, A., a kol.: Tavení skla. Jablonec n. Nisou: Česká sklářská společnost o. s., 2008.
- SMRČEK, A. – VOLDŘICH, F.: Sklářské suroviny. Praha: Informatorium, 1994.
- STRNAD, P. – MEDEK J.: Výroba skleněné bižuterie a ozdobných předmětů. Praha: SPN. 1985.
- VÍCH, M. – NOVOTNÝ, V.: Nové přístupy ke sledování pevnosti skla. Informativní přehled, SVÚS Hradec Králové, 1983, č. 2-3.
- VOLDÁN, J. – DUŠÁNEK, V.: Elektrické vlastnosti skel, SNTL, Praha 1983.



TECHNOLOGIE AUTOMATICKÉ VÝROBY SKLA

Výukový text vznikl na základě zkušeností ve výuce technologie skla pro budoucí absolventy inženýrského studia na Katedře sklářských strojů a robotiky. Opírá se o současné poznatky z oboru a zmiňuje některé trendy sklářské technologie.

Skripta jsou určena pro předmět Technologie automatické výroby skla pro studenty 1. ročníku navazujícího studijního programu N2301 Strojní inženýrství, zaměření Sklářské stroje a robotika.

Vytvoření a vydání skript bylo podpořeno projektem OPVK „Zvýšení technických kompetencí absolventů pro průmyslovou praxi“ (Registrační číslo CZ.1.07/2.2.00/28.0311).

© Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D., doc. Ing. Vladimír Klebsa, CSc., Ing. Ivo Matoušek, Ph.D.

Recenzenti	doc. Ing. Petr Exnar, CSc. Ing. Jan Macháček, Ph.D.
Vydavatel	Technická univerzita v Liberci
Schváleno	Rektorátem TUL dne 29.9.2015 čj. RE 61/15
Vyšlo	v září 2015
Počet stran	318
Vydání	1.
Náklad	100 kusů
Tiskárna	Vysokoškolský podnik Liberec, spol. s r. o., Studentská 1402/2, Liberec 460 01
Číslo publikace	55-061-15
ISBN	978-80-7494-237-2

