

Posouzení možnosti výroby skleněných nanovláken

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T010 – Inovační inženýrství
Autor práce: **Bc. Jitka Kulifay, DiS.**
Vedoucí práce: prof. Ing. Ladislav Ševčík, CSc.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jitka Kulifay, DiS.**
Osobní číslo: **S14000342**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Inovační inženýrství**
Název tématu: **Posouzení možnosti výroby skleněných nanovláken**
Zadávací katedra: **Katedra částí a mechanismů strojů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Na základě známého řešení stroje na výrobu nanovláken z tavenin polymerů proveďte posouzení možnosti inovace tohoto zařízení na výrobu nanovláken ze skla.

- 1) Proveďte rozbor vlastností různých typů skleněné taveniny s ohledem na technologii spinningu elektrickým proudem ve vysokém napětí.
- 2) Popište stávající stav zařízení a proveďte jeho kritické hodnocení.
- 3) Navrhněte nové požadavky na stávající zařízení s ohledem na vyšší teplotu tavení.
- 4) Proveďte několik inovačních návrhů řešení laboratorního zařízení na odzkoušení základního principu a jejich zhodnocení.
- 5) Určete optimální variantu dle zvolených kritérií a k nim přiřazených váhových faktorů.
- 6) Sestavte rozhodovací tabulku a proveďte výběr varianty pro realizaci.
- 7) Udělejte na vybranou variantu úplný konstrukční návrh včetně výrobně technické dokumentace.

Rozsah grafických prací: přílohy dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: 50
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- [1] PEŠÍK, L. *Části strojů. 1. díl.* Liberec: Technická univerzita 2005. ISBN 978-80-7372-573-0
 - [2] PEŠÍK, L. *Části strojů. 2. díl.* Liberec: Technická univerzita 2005. ISBN 978-80-7372-574-7
 - [3] LEINVEBER, J. a P. VÁVRA. *Strojnické tabulky.* Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4
 - [4] MAŠÍN I. a L. ŠEVČÍK. *Metody inovačního inženýrství: Inovace, plánování a navrhování výrobku.* Vyd. 1. Liberec: Institut technologií a managementu, 2006. ISBN 80-903533-0-4
 - [5] MAŠÍN, I. *Inovační inženýrství - Plánování a návrh inovovaného výrobku.* 1. vydání. Liberec: TUL, 2012. 168s. ISBN 978-80-7372-852-6.
 - [6] KLEBSA, V. *Základy technologie skla pro hospodářskou fakultu.* Liberec: Technická univerzita 2002. Skripta 55-091-01.
 - [7] KLEBSA, V. a V. HOTAŘ. *Silikáty, sklo, žáruvzdorné materiály.* Liberec: Technická univerzita 2005. Skripta 55-044-05
 - [8] Kolektiv autorů. *Tavení skla.* Jablonec nad Nisou: Česká sklářská společnost 2008. ISBN 978-80-904044-0-3.
- Databáze knihovny TUL

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Ladislav Ševčík, CSc.
Katedra částí a mechanismů strojů
Konzultant diplomové práce: Ing. Petra Dančová, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Datum zadání diplomové práce: 12. listopadu 2015
Termín odevzdání diplomové práce: 12. února 2017

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



prof. Ing. Ladislav Ševčík, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 12. listopadu 2015

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

V Liberci dne: 27. 5. 2016

Podpis:

TEMA: Posouzení možnosti výroby skleněných nanovláken

ANOTACE:

Diplomová práce se zabývá posouzením možností výroby skleněných nanovláken pomocí elektrostatického pole, a podrobným rozбором zvláknujících skelných metod v porovnání s polymerním elektrospinningem. Veškeré poznatky se opírají o rozsáhlé experimentální testování a nové konstrukční řešení tvorby skleněných nanovláken pomocí elektrostatické energie.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Skleněná vlákna, sklo, sklovina, elektrospinning, Taylorův kužel

THEME: Possibilities of glass nano-fibre production

ANNOTATION:

Diploma thesis deals with possibilities of glass nano-fibre production with use of electrostatic field. It in detail analyses glass fibre spinning and compare it with common polymer electro-spinning. Presented knowledge are based on extensive experimental testing and new design of glass nano-fibre production by use of electro-static energy.

KEY WORDS:

Glass fibre, glass, molten glass, electro-spinning, Taylor cone

Zpracovatel: TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra částí a mechanismů strojů

Počet stran: 82

Počet grafů: 7

Počet tabulek: 17

Počet obrázků: 64

Pročet příloh: 2

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat panu prof. Ing. Ladislavu Ševčíkovi, CSc. za odborné vedení mé diplomové práce, cenné rady a odborný dohled.

Dále bych ráda poděkovala panu doc. Ing. Pavlu Rydlovi, Ph.D., Ing. Pavlu Pokornému, Ph.D., Bc. Filipu Sanetrníkovi a paní Ing. Petře Dančové, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích.

OBSAH

Seznam zkratk	9
Úvod	10
1. Výroba skleněných filamentů	11
1.1.Historie skleněných vláken	11
1.2.Skelná vlákna je možné dělit do několika skupin dle určitých aspektů	12
1.3.Popis výroby skleněných monofilů	14
1.4.Rozdělení skelného zvlákňování na základě technologického procesu	15
1.4.1. Odstředivé tažení (rozvlákňování) v horizontálním směru rotace soustavy tří kotoučů	15
1.4.2. Odstředivé tažení (rozvlákňování) ve vertikální ose rotace za pomoci jednoho kotouče	16
1.4.3. Odstředivé tažení (rozvlákňování) ve vertikálním směru rotace s využitím speciálně upraveného kotouče	17
1.4.4. Tažení plynným médiem	18
1.4.5. Mechanické tažení - Volný výtok	19
1.5.Zhodnocení stávajících zvlákňovacích technik	20
2. Elektrostatické zvlákňování – elektrospinning	21
2.1.Historie elektrospinningu	21
2.2.Podrobný popis elektrostatického zvlákňování	22
2.2.1. Zvlákňovací technologie pomocí kapiláry	23
2.2.2. Zvlákňovací technologie pomocí válce - Nanospider	24
2.3.Nabídka elektrostatických komponentů	25
3. Základní vlastnosti materiálu určující možnosti zvlákňování technologií elektrospinningu	26
3.1. Taylorovy kužely	26
3.2.Viskozita materiálu	27
3.2.1. Viskozita skloviny	28
3.2.2. Viskozita polymeru	30
3.3.Povrchové napětí	32
3.3.1. Povrchové napětí skloviny	33
3.3.2. Povrchové napětí polymeru	33
4. Praktická část - testování	33
4.1. Základní vlastnosti skla	33

4.1.1. Struktura přírodních silikátů	34
4.1.2. Sklářské suroviny	34
4.1.2.1. Základní rozdělení surovin	35
4.2. Materiálové složení skla určeného k utavení (zvláknění)	37
4.3. Hrubost tavného materiálu	38
4.4. Výběr tavícího odporového média	38
4.4.1. Odporový kanthalový drát	38
4.4.2. Odporový kanthalový pásek	40
4.5. Počátky testování	41
4.5.1. Optický pyrometr - PYROMET	42
4.6. Vliv okolního prostředí na tavbu skleněného preparátu	46
4.6.1. Tavení skla v neizolovaném (volném) prostředí	47
4.6.1.1. Záznamy termokamerou	51
4.6.1.2. Vyhodnocení testování v neizolovaném prostředí	55
4.6.2. Tavení skla v izolovaném prostředí (laboratorní komora)	55
4.6.2.1. Podmínky tavby skelného materiálu v izolovaném prostředí	59
4.6.2.2. Tabulkové záznamy pořízené při testování v izolovaném prostředí	59
4.6.2.3. Zhodnocení tabulkových záznamů	63
4.6.2.4. Grafické záznamy doprovázející testovací fáze	63
4.6.2.5. Zhodnocení grafických záznamů	66
5. Konstrukční řešení	66
6. Inovační záměry pro vytváření skleněných nití pomocí elektrostatického pole	68
6.1.1. Varianta 1: Tažení filamentu pomocí žáruvzdorné výtlačnice zakončené kapilárním emitorem	68
6.1.2. Varianta 2: Zvláknování pomocí sady kapilár	69
6.1.3. Varianta č. 3: Tažení filamentů pomocí platinového roštu	71
6.1.4. Varianta č. 4: Tažení skleněných vláken z volné hladiny	72
6.2. Zhodnocení inovačních záměrů	73
Závěr	75
Seznam použité literatury a podkladů	78
Seznam příloh	82

Seznam zkratek

Symbol zkratky	Jednotka	Popis zkratky
A, B, C	[-]	konstanty, tabelované hodnoty skla
A_l	[-]	emisivita povrchu tělesa
dF	[N]	jednotka síly
dl	[m]	jednotka délky
dv	[ms ⁻¹]	přírůstek rychlosti
dy	[m]	přírůstek délky mezi vrstvami
η	[Pa s]	dynamická viskozita
g	[ms ⁻²]	gravitační zrychlení
γ	[Nm ⁻¹]	povrchové napětí
I	[A]	elektrický proud
λ	[mm]	vlnová délka
Σd	[m]	součet průměrů původních vláken
ΣM	[kg]	součet hmotností kapek
T	[K]	absolutní teplota, termodynamická teplota
τ	[MPa]	tečné napětí
t	[°C]	teplota
U	[V]	elektrické napětí

Úvod

Diplomová práce se zaměřuje na problematiku stávajících zvláknovacích technologií skelného materiálu v oblasti velikosti a zachování průměru vlákna, délky filamentu a zástavbových prostor celého zařízení.

V úvodu se diplomová práce věnuje stručnému popisu skelného zvláknění v závislosti na jeho historii, vlákenných produktech a výrobních technologiích. Druhá kapitola „Elektrostatické zvláknování – elektrospinning“ se zaměřuje na metodu tvorby polymerních filamentů využívající silového iniciátoru v podobě elektrostatického pole (historie elektrospinningu, technologické principy, atd.). Třetí kapitola „Základní vlastnosti materiálu určující možnosti zvláknění technologií elektrospinningu“ jasně vypovídá o rozhodujících aspektech materiálu (skloviny, polymeru) v závislosti na viskozitě, povrchovém napětí, ale i teplotě pro využití této techniky zvláknění. Kapitola čtyři obsahuje praktickou část, jako je materiálové složení skla určeného k utavení, výběr odporového média, měřicí zařízení pro detekci teplot, výběr testovacího prostředí včetně hodnotových dat, fotografií, podrobných popisků i grafických výstupů. Pátá kapitola „Konstrukční řešení“ představuje testovací zařízení, které bylo použito pro základní výzkum prokazující, že lze pomocí elektrostatické energie zvláknit sklovinu. V závěru této diplomové práce je navrženo několik inovačních záměrů a zařízení pro vytváření skleněných nití pomocí elektrostatického pole.

Cíle diplomové práce

- Zmapování současného stavu zvláknovacích technologií v oblasti skla.
- Kritické zhodnocení stávajícího stavu procesu skelného zvláknění.
- Zmapování zvláknující technologie polymeru pomocí elektrostatické energie.
- Sestavení základních vlastností obou materiálů určujících jejich možnosti zvláknění pomocí elektrospinningu.
- Návrh několika vlastních inovačních návrhů včetně návrhu pro stávající zvláknovací zařízení.
- Zhodnocení vlastních inovačních návrhů.
- Konstrukční realizace vybrané varianty inovovaného návrhu.
- Technicko – ekonomické zhodnocení realizované varianty.

1. Výroba skleněných filamentů

Produkce skleněných vláken spadá do samostatné skupiny výrobních technologií tvarování skla, včetně jeho specifického využití. Vlastnosti vláken (délka, průměr monofilu, pevnost, křehkost) určují jejich využití v průmyslových odvětvích (strojírenský, textilní, farmaceutický, potravinářský průmysl aj.), viz tabulka 1 v přílohách.

1.1. Historie skleněných vláken

Již roku 1800 př. n. l. staří Egypťané znali výrobu skleněných vláken (průměr 3 - 5mm), kterými vytvářeli svá proslulá balsamária neboli malé lahvičky obsahující vonné oleje, aromatické masti a parfémy (obr. 1). Technika tvorby dutých výrobků spočívala v navíjení sklovitých vláken (postupné vytahování dávky skloviny z náběru) na hliněné jádro, [1].

Od 13. století n. l. (16. století pak přináší rozkvět) benátská sklářská zahrnovali svého rozmanitého umění tenké tyčinky (max. 3mm průměr), viz obr. 2, vyráběné ručním vytahováním skloviny (sklářská píšťala, vytahovací kleště) z náběru upraveného barevným sklovitým vrstvením (přejímané sklo). Tyčinky (sekané, nesekané) se dále využívaly pro optické a dekorativní efekty při vytváření skleněných objektů (vázy, číše, lustry), [2]. Skelný pramen (dlouhé sklo) s následnou přímou aplikací (tvarování, lepení, protahování, lisováním aj.) na výrobek plnil funkci plastické dekorace (obr. 3), [3].

V roce 1870 John Player vypracoval masový způsob výroby skleněných, minerálních vln za pomoci vodní páry, [4]. O šest let později (1876) A. D. Elbers pozměnil princip iniciátoru zvláknění do podoby rotujícího kola s lopatkami (tříštění materiálu, kinetická energie), [5].

Hermann Hammesfahr, který je nazýván jako "dědečkem vláknové optiky" a sklolaminátu, roku 1880 patentoval vlastní vynález skleněného vlákna. Na světové výstavě v Chicagu (r. 1892) byl představen výstřelek oděvní módy - šaty ze skleněného hedvábí (Libbey Glass Company). Základním nosným materiálem (osnovou) bylo hedvábí a útek v podobě skelného vlákna, [6, 7, 8].

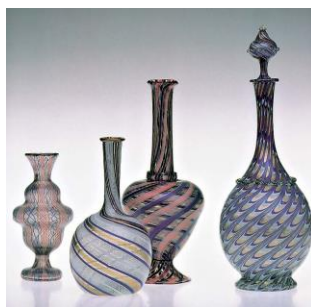
O uplatnění odstředivé síly rotujícího kotouče ve vertikální rotační poloze, se zmiňuje patent z roku 1939, sepsán vynálezci E. Staffordem, Ch. G. Harfordem. Produkt této technologie nabývá podob cupovaného materiálu, označovaného také jako

vlna nebo vata (a je stále využíván), [9]. S rozdílnou technologií výroby, ovšem se stejným konečným výsledkem přichází roku 1951 Ch. J. Stalego roku, [10].

Dodnes využívané kontinuální tažení filamentů probíhá na základě volného výtoku (gravitační síla, hydrostatický tlak) z platinové pícky (1966 patent publikován J. Burgmanem a L. L. Margasonem), [11].



Obr. 1: Egyptská skleněná lahvička



Obr. 2: Benátcké sklo, optická dekorace



Obr. 3: Benátcké sklo, ručně tvarovaný dekor

1.2. Skelná vlákna je možné dělit do několika skupin dle určitých aspektů

Dělení skelných vláken podle délky

- Nekonečná vlákna – Rajón (obr. 4a), [12]
- Konečná vlákna – Staple (obr. 4b), [13]



Obr. 4: a) nekonečné vlákno, b) sekané vlákno

Dělení monofilu vzhledem k velikosti průměru

- Mikrovlákna
- Submikronová vlákna
- Ultramikronová vlákna

Rozdělení vláken podle výrobní technologie

- Mechanické tažení
 - volný výtok (kapiláry, vlákna Vertex)

- b) Odstředivé zvlákňování
 - horizontální osa rotace (sibral, rotující válce a kapka)
 - vertikální osa rotace (sibral, rotující disk nebo talíř)
- c) Tažení plynným médiem
 - volný výtok (prošíváný sibral, skelná vata, izolace)

Formy výrobků ze skelných vláken

- a) Rohože

Obsahují neorientované sekané sklovláknité prameny spojené pojivem (emulze, prášek), [14].
- b) Rovingy

Netkané paralelně sdružené prameny vláken, navinuté bez zákrutu (lubrikace), viz obr. 5a, [15, 16].
- c) Vaty, „cuchaná vlákna“

Vlákna zdvojená, nerovnoměrně prostorově rozmístěná, viz obr. 5b, [17].
- d) Splétání skelných vláken

Proces splétání vytváří nový materiál díky úmyslnému křížení vláken (biaxiální, multiaxiální pleteniny). Výsledný produkt vykazuje vyšší hodnoty oproti základnímu materiálu (tuhost, pevnost, hustota), [18].
- e) Skelné tkaniny

Výroba spočívá v kombinaci rovingů nebo sklovláknitých pramenců s převážně rovnoměrně vyváženou dostavou nebo také s jednosměrně orientovanou tkaninou (pásky), [19].
- f) Biaxiální tkaniny

Biaxiální tkaniny jsou vyráběné na šicích strojích (polyesterové nitě sešívají vlákna osnovy a útku přímého skelného rovingu), s úhlově odchýleným rozložením vlákenných vrstev ($0^\circ/90^\circ$), fixaci zajišťuje prošívací.
- g) Multiaxiální tkaniny

Multiaxiální prošíváné tkaniny obsahují 4 a více rohoží (vrstev materiálu) s úhlovými odchylkami v daleko větším rozptylu ($0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$), viz obr 5c, [16].
- h) Kombinace „kombimat“, „sendvič“

Kombinace rovingového vlákna, pramenů nebo tkanin společně s volným skelným vláknem (vata plošně rozmístěna, vrstvena) o určité úpravě (lubrikace,

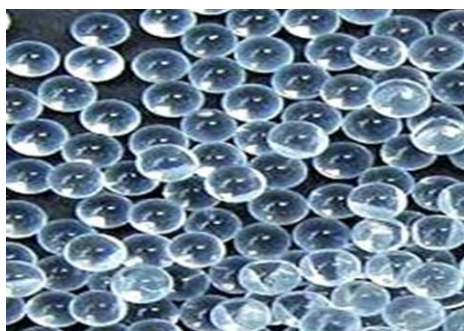
prošívání), dosahuje konečných podob dle specifických požadavků daných zákazníkem.



Obr. 5: a) rovingové tkaniny, b) skelná vata, c) multiaxiální tkanina

1.3. Popis výroby skleněných monofilů

Výroba skelného monofilu je závislá na několika aspektech (viskozita, povrchové napětí, teplota) vyskytujících se mezi procesy natavení skelného materiálu a jeho zvláknění. Technologické metody, díky nimž vzniká skelné vlákno, se v těchto bodech (aspektech) velice liší v závislosti na výsledném produktu (průměru vlákna, délka, tvar). Základním tavným skelným materiálem pro tyto procesy je skelná granuláž (obr. 6) v podobě broků, kuliček, válečků či jako klasická střepáž (obr. 7) o definovaném rozměru (velikosti). Veškeré chemické procesy iniciované tavení skla, tedy přechodem ze sklářského kmene (směs nerozpustných látek v sypkém stavu) do podoby skloviny (viskózní průhledná, průsvitná látka) již proběhly (průměrná teplota tavení cca 1300°C). Teplotní údaje pro natavení granulátu se pohybují v nižších oblastech (cca 1000°C). Tavicí teploty ať u sklářského kmene nebo granuláže (střepáže), jsou spjaté s vlastním chemickým složením (obsah sklotvorných prvků, tavidel, stabilizátorů atd.), viz sklářské suroviny, [20, 21].



Obr. 6 Skleněný polotovár v podobě granulátu (mikrokuličky)



Obr. 7: Skleněný polotovár (granulát) v podobě střepáže

Faktory ovlivňující tažení skleněného monofilu

- Viskozita – kapalina s co nejnižší viskozitou vykazuje dobré vlastnosti při tažení
 - Povrchové napětí – snaha kapaliny zaujmout minimální plochu, stav s nejnižší možnou energií, ideální podmínky - nejnižší povrchové napětí
 - Teplota skloviny na výtoku – vazba s viskozitou, povrchovým napětím, rychlostí odtahování, výtokem
 - Teplota okolí – závislost na rychlosti chlazení vlákna
 - Vlhkost klimatu – ovlivňuje procesy tažení
 - Atmosférické prostředí – vzduch / vakuum
-
- Iniciátor pro vytékání kapalné látky – samovolné vytékání (gravitační), nucené vytékání (mechanické, pneumatické)
 - Rychlost odtahování vzniklých vláken – rychlost odtahu je závislá na průměru vláken

1.4. Rozdělení skelného zvlákňování na základě technologického procesu

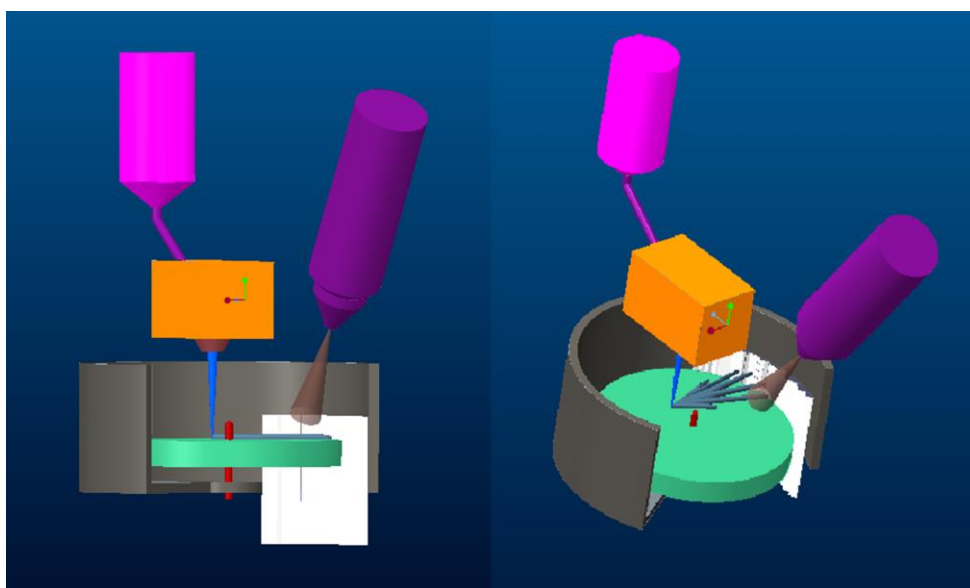
Vytváření skelných filamentů je historicky dokladováno od roku 1939. Rapidní vývoj technologického rozkvětu ve sklářském odvětví je možné datovat od druhé poloviny 20. století. Podrobnější popis zvlákňovacích procesů včetně obrazových dokumentů s patentovými odkazy se nachází níže.

1.4.1. Odstředivé tažení (rozvlákňování) v horizontálním směru rotace soustavy tří kotoučů

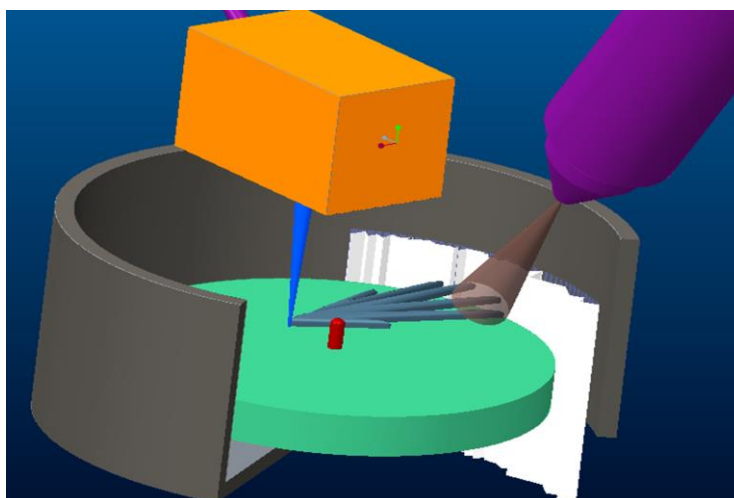
Zvlákňování skloviny v horizontální ose pomocí odstředivé síly spočívá v rychlém odklonění dopadajících kapek skloviny od vlastní osy za iniciace rotujících kotoučů. Dodání kinetické energie skleněným kapkám umožňuje jejich vlastní vytažení do určitých délek. Proces zvlákňování probíhá od volného výtoku žhavé skloviny až po pozvolné unášení vytvořených vláken proudem vzduchu směrem k transportnímu pásu, resp. proud vytékající skloviny dopadající na tři rotující kotouče je dělen (rozstříknut) na jednotlivé kapky. Změnou rychlosti (urychlení) a trajektorie kapky ve směru odstředivé síly dochází k jejímu vytažení, prodloužení. Vyráběný polotovár touto metodou nazýváme vatou (cupování materiálu), nebo licí suspenzí (směs vody, pojiva a vláken).

1.4.2. Odstředivé tažení (rozvlákňování) ve vertikální ose rotace za pomoci jednoho kotouče

Tvorba vláknenného produktu spočívá v jednoduchém technologickém procesu (obr. 8 a 9). Volným výtokem v dolní části pecního prostoru protéká utavená sklovina dopadající na rotující kotouč. Působením silového odstředivého účinku o požadované rychlosti dochází k vytažení kratších vláknenných útvarů. Vzniklý polotovar definujeme jako vatu či cupovaná vlákna. Polotovar je zachycen sběračem (boční ochranný kryt), odkloněn proudem spalín a dále transportován k dalšímu stupni zpracování, tj. úpravám např. lubrikacím, pýchováním, lisováním nebo prošíváním. Dokumentováno r. 1939 (Stafford E., Harford Ch. G), [9].



Obr. 8: Odstředivé tažení za pomoci jednoho kotouče

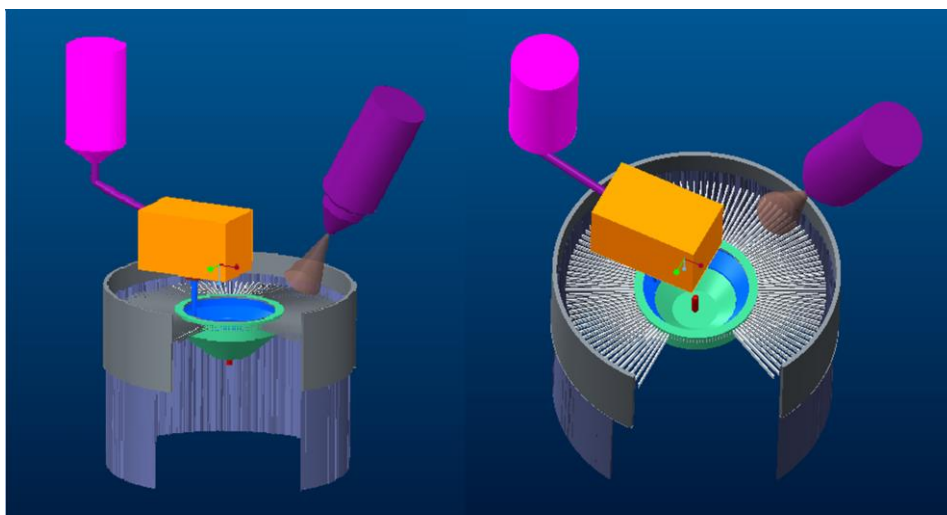


Obr. 9: Detail odstředivého tažení za pomoci jednoho kotouče

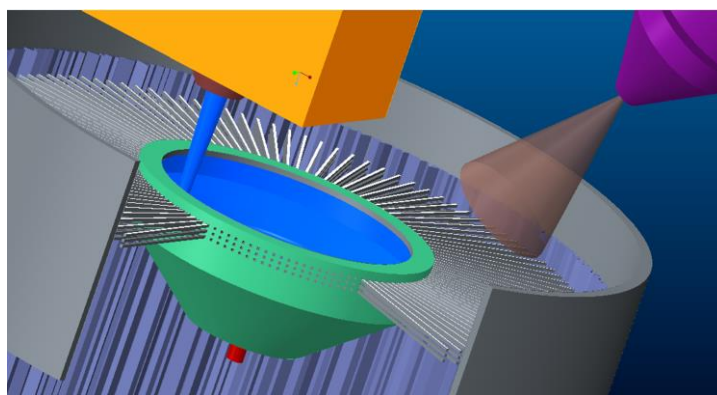
1.4.3. Odstředivé tažení (rozvlákňování) ve vertikálním směru rotace s využitím speciálně upraveného kotouče

Rozvlákňování je iniciováno rotací speciálně upraveného vlákního talíře s definovanými otvory, jimiž sklovina vytéká ven, viz obr. 10 a 11), (1962 Stalego Ch. J., 1972, Russell R. G.), [22].

Hlavní charakteristickou částí celého zařízení je rotační zvlákňovací hlava (talíř) válcovitého tvaru s přizvedlým okrajem obsahující výtokové otvory o průměru cca $5\mu\text{m}$. Sklovina z pecních prostor excentricky vtéká na speciální kotouč s těmito otvory a vlivem odstředivé síly je protlačována (vlákněna). Proud spalin působících v kolmém směru dolů o vysoké rychlosti strhává vzniklé filamenty, které pak dále unáší (transport na dopravní pás, rozvrstvení), [22, 23].



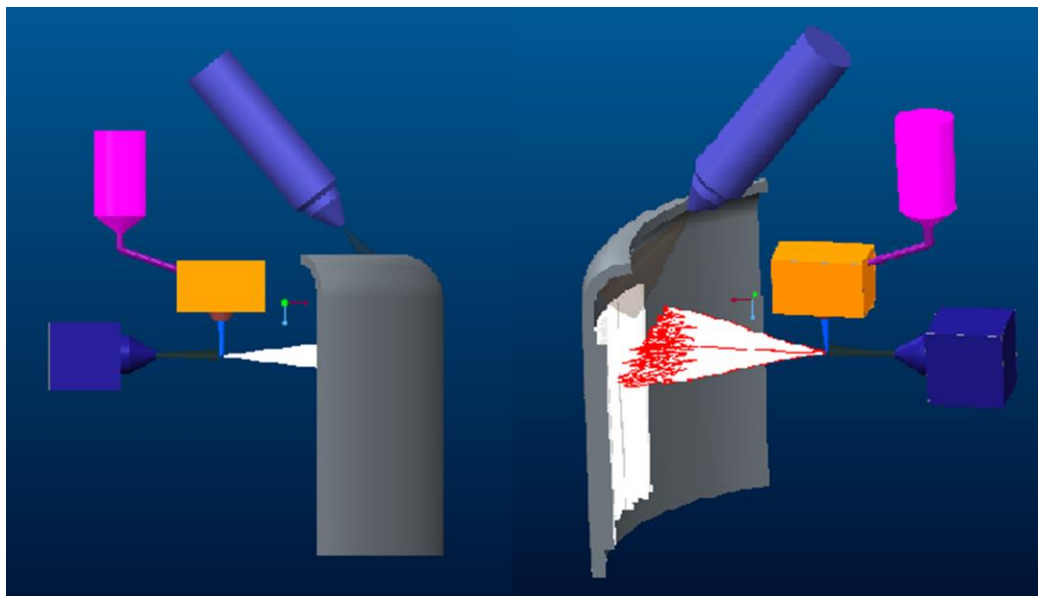
Obr. 10: Odstředivé tažení ve vertikálním směru rotace



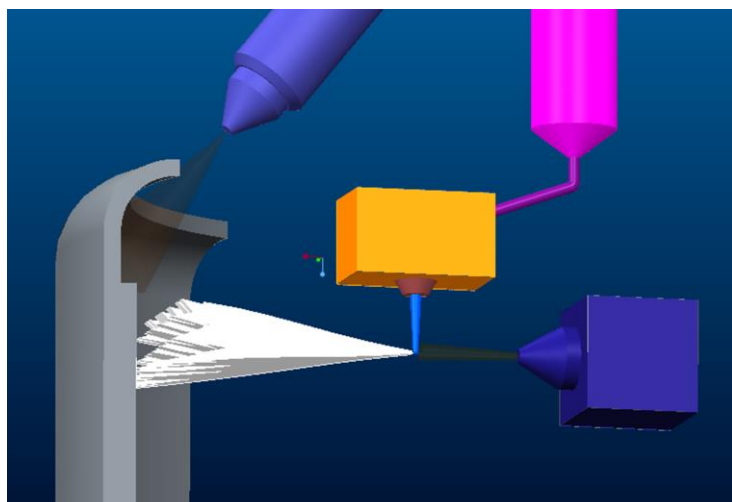
Obr. 11: Detail odstředivé tažení ve vertikálním směru rotace

1.4.4. Tažení plyným médiem

Vytváření skelných vláken za přispění plyného média je velice jednoduché (obr. 12 a 13). Volný výtok (tj. celistvý pramen) utavené skloviny se deformuje proudem vzduchu o vysoké rychlosti (vysokorychlostní vzduchová tryska) do podoby rozstříku, tedy volně letících kapek. Jelikož přehřátý vzduch je také nosičem rychlosti, dochází k urychlení pohybu kapiček a tudíž i jejich tvarové změně - protažení (zvláknění). Transport materiálu na dopravní pás obstarává tíha nahromaděných vláken ve skluzovém prostoru, společně s proudem spalin. Technologie zvláknění je dokladována již od roku 1951 Stalegoem Ch. J., [23].



Obr. 12: Tažení plyným médiem

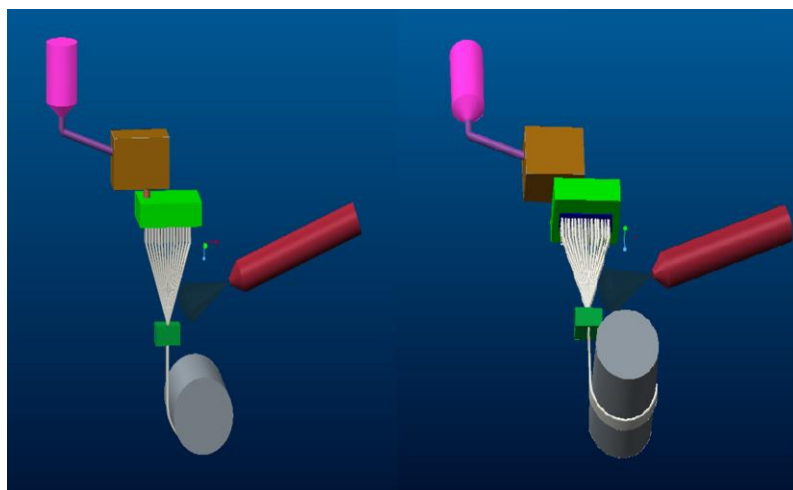


Obr. 13: Detail tažení plyným médiem

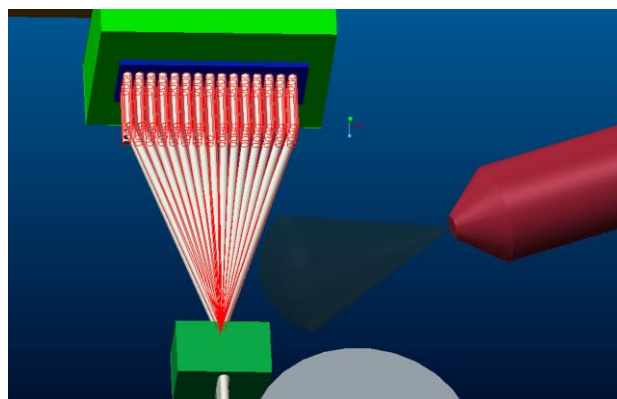
1.4.5. Mechanické tažení - volný výtok

Proces mechanického zvlákňování spočívá ve využití hydrostatického tlaku pro samovolný výtok skloviny ze speciálních trysek definujících skelný monofil, viz obr. 14 a 15. Tato technika zvlákňování je kontinuálním procesem průmyslově vyráběných skelných vláken od roku 1966 (vynálezci J. Burgman a L. L. Margason), [24, 25].

Utavená sklovina je pomocí nátokového žlabu svedena do píčky (slitina platiny a rhodia) obsahující v její spodní části soustavu výtokových trysek. Pomocí hydrostatického tlaku je žhavá sklovina vytlačována jednotlivými tryskami a zvlákňována (odtahovací válec svou rotační rychlostí ovlivňuje průměr filamentu). Počet trysek ve dně píčky může nabývat až 2000 (kusů). Vytékající sklovina z trysek samovolně nebo regulovaně tuhne v pevné sklo, vlákno (chladicí zóna), které je dále zpracováno lubrikací (lubrikační zóna) a splétáno do pramenců. Koncovou fází celého procesu završuje navíjení pramenů na cívku o požadovaných rozměrech, [8, 26].



Obr. 14: Mechanické tažení (gravitační)



Obr. 15: Detail mechanického tažení (gravitační)

Produkty ze skelného materiálu nabývají podob vat, tkanin, rohoží, rovingů, desek, sendvičových desek i multiaxiální tkaniny apod..

Výrobce: Saint – Gobain Adfors CZ s.r.o. ČR, BTTO s.r.o aj.

Pro příklad jsou v práci uvedena některá výrobní označení: Supafil Loft 045, Isover Unirol Profi, Sibra Standard, Sibril Super, viz [27, 28].

1.5. Zhodnocení stávajících zvlákňovacích technik

Technologie uvedené v kapitole 1.4. jasně poukazují na zastaralé techniky, které jsou i přesto v dnešní době stále využívány. Je nutné podotknout, že rozměrová variabilita filamentů oproti jiným zvlákňovacím technologiím (např. elektrospinningu) a materiálům (polymery) je značně omezena.

V tabulce 2 jsou výše uvedené procesy ohodnoceny váhovým kritériem na základě důležitých aspektů, jako jsou rozměry vláken, stabilita vlákenného průřezu, anebo zástavbové prostory zařízení).

Tabulka 2: Srovnávací tabulka zvlákňovacích technologií

Zvlákňovací technologie	Váhový ukazatel	Volný výtok	Vertikální osa rotace - jeden kotouč	Horizontální osa rotace - 3 kotouče	Vertikální osa rotace - speciální kotouč	Tažení plynným médiem
Požadavky						
Vlákna konečná	5		●	●	●	●
Vlákna nekonečná	1	●				
Lubrikace vláken	3	●				
Přídavné chlazení	5	●	●	●	●	
Vzdušná manipulace s vlákny	1		●	●	●	●
Nízké náklady na výměnu komponentů	1		●			
Střední náklady na výměnu komponentů	3	●		●	●	●
Rozměry vláken 9 -20 μm	3	●				
Rozměry vláken 0,5 -30 μm	3		●	●	●	●
Stabilita rozměru vlákna	1	●				
Nestabilita rozměru vlákna	5		●	●	●	●
Vysoká možnost zpracování vláken	1	●				
Střední možnost zpracování vláken	3		●	●	●	●
Malé zástavbové prostory zařízení	1		●		●	
Středně velké zástavbové prostory zař.	3			●		●
Velké zástavbové prostory zařízení	5	●				
Celkový součet bodů		22	24	28	26	23
Hodnocení		1	3	5	4	2

Nejoptimálnější ohodnocení získalo zvlákňování pomocí volného výtoku s 22 body. Místo druhé s 23 body bylo uděleno tažení plynným médiem a třetí s 24 body pro tažení ve vertikální ose rotace s jedním kotoučem.

2. Elektrostatické zvlákňování – elektrospinning

Tato zvlákňovací technologie využívající polymerní tekutiny či tavenin, které pomocí elektrostatické energie (elektrospinning) vytvářejí dlouhá vlákna o průměru od 2 μm až do několika mikrometrů. Hlavní výhodou zvlákňovacího procesu je kontinuální produkce nanovláken s relativně širokým výběrem výrobního materiálu.

Druhy polymerů určených pro elektrostatické zvlákňování

- a) Přírodní
Kolagen, želatina, chitosan, kyselina hyaluronová
- b) Syntetické
PLA (polymer kyseliny mléčné – Polylaktid), polyethylenoxid, PLGA (kopolymer kyseliny glykolové a mléčné)

2.1. Historie elektrospinningu

První poznatky byly zaznamenány v 16. století lékařem, filozofem a fyzikem Williamem Gilbertem. Jeho studie byly věnovány magnetickým a elektrostatickým jevům. Elektrostatický objev Gilbert popsal na chování vodní kapky kulového tvaru ležící na nesmáčivé ploše, která vykazovala tvarové změny (kuželovitosti) při přiblížení jantarového předmětu nabitého třením.

Další zmínky o této metodě zaměřené na výrobu umělých vláken pocházejí z roku 1934, kdy vědec A. Formhal patentoval svůj proces elektrického zvlákňování mezi dvěma elektrodami včetně celého zařízení. Vysloužil si tak uznání jako „otec moderního elektrostatického zvlákňování“, [29]

Roku 1914 publikoval J. Zelený svou vědeckou práci zabývající se povrchovými projevy kapky (tekutiny) na konci kovových kapilár. Jeho prvotní pokus spočíval v matematickém modelu chování kapalin pod působením elektrostatických sil.

Polymerní vlákna se rovněž vyvíjejí na Technická univerzita v Liberci. V roce 2005 byl publikován patent bezjehlového průmyslového zařízení na výrobu polymerních nanovláken za pomoci elektrostatického zvlákňování. Vědecký tým byl složen ze členů

pedagogického sboru pod vedením prof. O. Jirsáka, Bc. F. Sanetníka, prof. D. Lukáše a kol. [světový patent WO2005024101, český patent CZ294274], [30, 31, 32].

2.2. Podrobný popis elektrostatického zvlákňování

Princip elektrostatického zvlákňování využívá vysokého elektrického napětí (sběrná elektroda, kolektor), které iniciuje polymerní roztok nebo taveninu (základní tekutina, emitor) k vytvoření proudu elektricky nabitých částic dané látky (zvlákňování). Jde tedy o působení vysokého elektrického napětí na povrch tekutiny (kapky), která pak vykazuje deformační projevy povrchového napětí (zakulacení, zaoblenost, hladkost) vznikem špiček (paprsků), viz obr. 19. Samotné zvlákňování nastává v přechodu od deformačních špiček (paprsků) přecházejících v kónický tvar (Taylorův kužel - obr. 18) až po pohybující se vlákněný roztok (proud látky) ke kolektoru. Velikost proudu a vzdálenost elektrod od sebe ovlivňuje rychlost tažení, tedy i průměr vlákna. Při samotném zvlákňování dochází k doprovodným procesům, projevujícím se jako odpařování aditivních látek (ředitel, nosič) ale také k chladnutí vláken vlivem okolního prostředí. Výsledný vlákněný produkt je zachycen na samotném kolektoru nebo na náhradním nosiči (textilní materiál) umístěným těsně před ním. Vlákněná na povrchu nosiče jsou nahodile orientována i zhuštěna, [33].

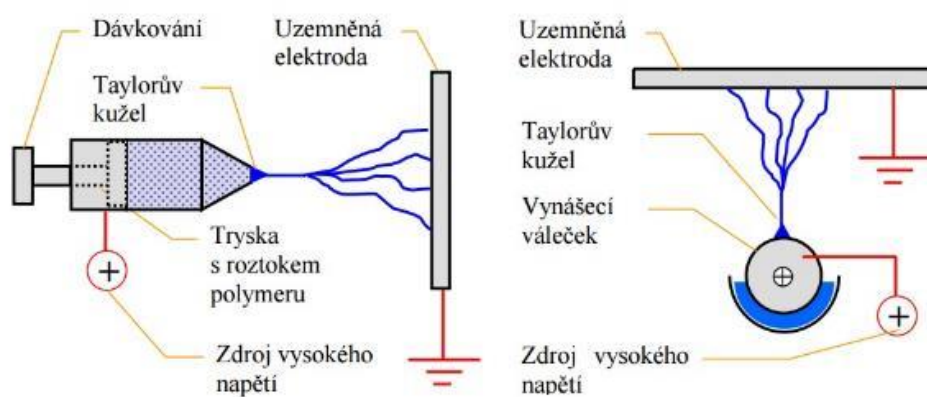
Faktory ovlivňující tažení polymerních vláken

- Viskozita – kapalina s co nejnižší viskozitou vykazuje dobré vlastnosti při tažení
- Povrchové napětí – snaha kapaliny zaujmout minimální plochu, stav s nejnižší možnou energií, ideální podmínky - nejnižší povrchové napětí
- Teplota okolí – rychlost chladnutí vlákna, odstranění aditiv
- Elektrické pole – homogenní / nehomogenní, síla elektrického pole určuje rychlost tažení vláken, *nízké elektrické pole* – malá rychlost tažení, větší průměr vlákna, *vysoké elektrické pole* – velká rychlost tažení, malý průměr vlákna
- Proudové pole – stálost proudového pole umožňuje lineární tažení vlákna, nestálé pole pak způsobuje rotaci vlákněných prvků
- Vzdálenost elektrod od sebe – *malá* – rychlé tažení, velký průměr vlákna
velká – pomalé tažení, malý průměr vlákna
- Prostředí – vzduch / vakuum
- Koncentrace vrstvení vláken – *malá* – řídký vrstvení / *velká* – husté vrstvení

- Výstupní plocha kapaliny – *bod* – malá koncentrace vláken / *plocha* – vysoká koncentrace vláken
- Výtok kapalné látky – *samovolný* – gravitační / *nucený* – mechanický, pneumatický

Rozdělení elektrostatického zvlákňování podle tvorby vlákna z emitoru

- Zvlákňovací technologie pomocí kapiláry (obr. 16a)
- Zvlákňovací technologie pomocí válce – Nanospider (obr. 16b)



Obr 16: a) zvlákňování polymeru pomocí kapiláry, b) zvlákňování polymeru pomocí válečku

2.2.1. Zvlákňovací technologie pomocí kapiláry

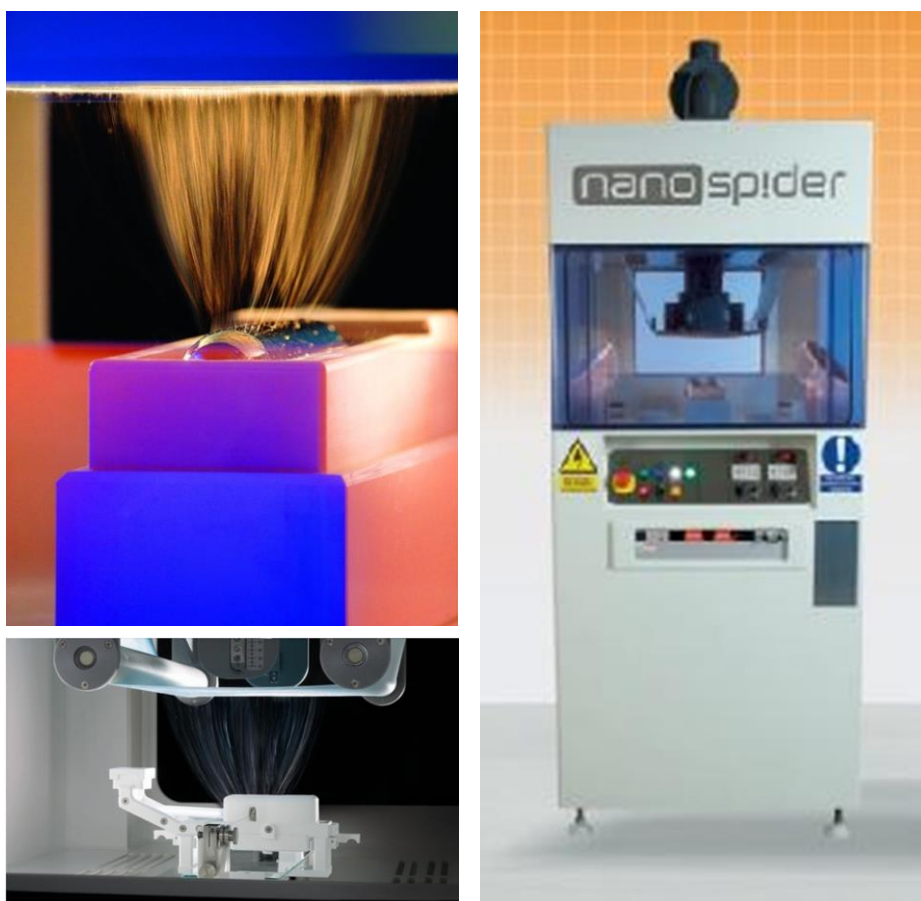
Podstata zvlákňování polymerní tekutiny pomocí kapiláry (obr. 16a) je dokumentována od roku 1910 (patentováno r. 1914) J. Zeleným. Roztok tekutého materiálu se pomocí dávkovacího zařízení vtlačuje do trysky sloužící jako zdroj vysokého napětí (kladně nabitá elektroda). Uzemněná elektroda (záporně nabitá elektroda) neboli kolektor, přitahuje jemné vláknenné útvary polymeru vystupující z Taylorova kuželu doformované kapky. Měrný odpor vláken je natolik velký, že jejich náboj se před dopadem na kolektor - sběrnici (záporně nabitou elektrodu) vyruší.

Problematika této metody spočívá v nízké produktivitě (0,1 – 1 g/h) zvlákňovacího zařízení s nerovnoměrným rozprostřením hmoty vzniklé nanovrstvy.

2.2.2. Zvlákňovací technologie pomocí válce - Nanospider

Základy této metody (rok 2001) pocházejí z laboratorních prostor Technické univerzity v Liberci pod vedením prof. Jirsáka, prof. Lukáše a dalších členů výzkumného týmu (obr. 16b, 17). Kladně nabitá elektroda u tohoto zařízení má tvar válce smáčeného za rotačního pohybu v roztoku polymeru. Válec umožňuje transport materiálu v podobě tenké rovnoměrně nanesené vrstvy na svém povrchu k opačně nabité elektrodě. Přitažlivé síly působící na tenkou vrstvu iniciují samovolný vznik více skupin Taylorových kuželů (oproti kapilárnímu zvlákňování). Procesy zvlákňování, ulpění vytvořeného materiálu na sběrnici a jiné pochody jsou totožné s předešlou výrobní technikou. Nové technologické řešení s využitím Nanospideru výrazně zvyšuje výrobní produktivitu (1 - 5 g/min. m), [34].

Jako příklad je v kap. 2.3. uvedena nabídka komponentů firmy 4spin určených pro zvlákňovací zařízení, [35].



Obr. 17: Nanospider

2.3.Nabídka elektrostatických komponentů

Společnosti zabývající se procesem elektrospinningu ve svém portfoliu nabízejí nepřeberné množství variant zařízení a jednotlivých komponentů. Pro přehled je níže uveden bodový výpis vybraných dílů dodávaných firmou 4spin (tab. 3), [35].

Varianty dávkovacího zařízení (emitoru) určeného pro zvláknění tekutého materiálu

- a) Jehlový, kapilární princip:
 - 1. Singel jet E1
 - 2. Kompozitní duble jet E6 – dva různé materiály s vlastními výstupy
 - 3. Koaxiální singel jet E9 – duální vtoková soustava systém (dva různé materiály)
 - 4. Multi jet kapilární emitor E2 – totožnost s E1, 6 jehel
- b) Bezjehlový princip:
 - 1. Injekční tyč E3 – pro malé hmotnosti vzorkovací tekutiny
 - 2. Multi jet E4 – pro velké hmotnosti vzorkovací tekutiny
 - 3. Kompozitní multi jet E7 – duální vtokový systém (dva různé materiály)
 - 4. Lineární multi jet E5
 - 5. Kompozitní lineární multi jet E8 – duální vtokový systém (dva různé materiály)

Varianty sběrného zařízení (kolektoru) určeného pro zachycení vlákenného materiálu

- a) Statické kolektory (desky):
 - 1. Plošný kolektor C1
 - 2. Vzorovaný kolektor C2
- b) Kontinuální kolektory (válce):
 - 1. Rotující sběrnice s celistvou plochou C3
 - 2. Rotující vzorovaný kolektor C4

Firmy dodávající elektrospinningové zařízení

- www.spraybase.com
- www.4spin.info
- www.inovenso.com
- www.elmarco.com
- www.electro-spinning.com

Tabulka 3: Nabídka komponentů firmy 4spin, [35]

Dávkovací zařízení (emitor)								
Jehlový, kapilární princip zvláknování	E1		E6		E9		E2	
	E3		E4		E7			
	E5		E8					
Sběrné zařízení (kolektor)								
Statický kolektor	C1		C2					
Kontinuální kolektor	C3		C4					

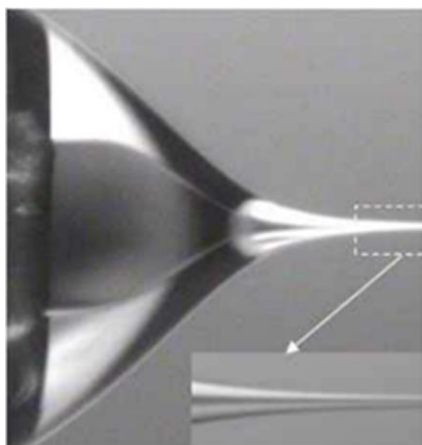
3. Základní vlastnosti materiálu určující možnosti zvláknění technologií elektrospinningu

Základní předpoklad pro uplatnění elektrospinningu spočívá ve vytvoření adekvátních podmínek zvláknující tekutiny, díky níž vznikají tzv. Taylorovi kužely. Vytvoření těchto kuželů je podmíněno fyzikálními veličinami charakterizujícími kapalinový tok. Jedná se o hodnoty viskozity a povrchového napětí.

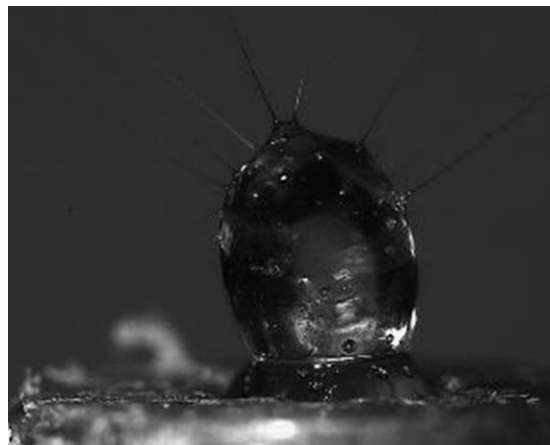
3.1. Taylorovy kužely

Projev Taylorových kuželů závisí na reakci požadovaného roztoku (polymerní kapalina, sklovina) o nízké viskozitě za působení vysokého elektrického napětí. Kladné náboje obsažené v tekutině (indukované náboje) se díky vlivu pole přeskupují, přemísťují z celého svého obsahu na povrch (plášť). Stoupající hodnota elektrického pole (oblast

mezi emitorem a kolektorem) modifikuje původní kulovitý, hemisférický tvar kapky (kapilární síly, povrchové napětí) do podoby kónické (obr. 18). Vzájemná odpudivost kladných (povrch kapaliny) a záporných (povrch kolektoru) nábojů vyvolá inverzní sílu, tj. sílu opačnou, o stejné hodnotě jako je tomu u povrchového napětí. Dosažením kritické hodnoty elektrického pole - překonáním nežádoucích sil (povrchové napětí) je ze špičky kužele vytlačen elektricky nabitý pramen tekutiny směřující (letící) ke kolektoru (obr. 19), [36, 37].



Obr. 18: Taylorův kužel vytvořený při elektrostatickém zvláknění polymeru [38]



Obr. 19: Projevy Taylorových kuželů vlivem působení elektrostatického pole na dávece polymerního materiálu

3.2. Viskozita materiálu

Viskozita je obecně definována jako hodnota podílu mezi tečným napětím a rychlostní změnou dvou sousedních vrstev od sebe vzdálených při procesu skutečného kapalného proudění. Lze také říci, že viskozita je důsledkem přitažlivých mezimolekulárních sil, závislých na tepelném pohybu částic (vnitřní tření). Newton popisuje odpor proti tečení η jako vztah tečného napětí τ úměrného gradientu rychlosti dv/dy , tj. podílu přírůstku rychlosti dv mezi dvěma přiléhajícími vrstvami ve vzdálenosti dy . Zmíněný vzorec platí pouze pro Newtonské kapaliny (nízkomolekulární látky), [39, 40].

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

η – dynamická viskozita [Pa s], τ – tečné napětí [MPa], dy – vzdálenost vrstev mezi sebou [mm], dv – přírůstek rychlosti [mm s^{-1}]

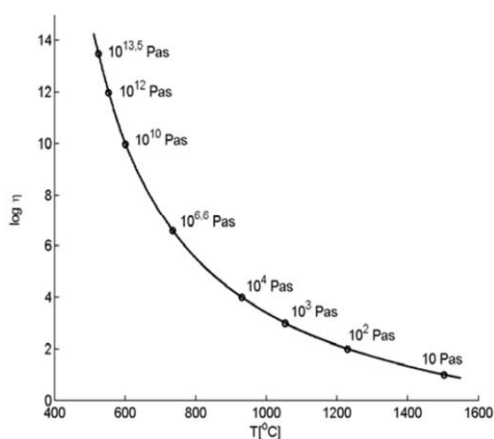
3.2.1. Viskozita skloviny

Vnitřní odpor částic proti tečení u sklovitých materiálů je definován na základě vztažných bodů viskozity (obr. 20 a obr. 21). Tyto body jsou obecně stanoveny pro snazší pochopení procesu přeměny tuhé látky v kapalnou v závislosti na teplotě. Chemické složení skla (tabulka 4 a obr. 21) značně ovlivňuje tekutost skloviny projevující se na tvaru viskozitní křivky a délce zpracování (dlouhá skla, krátká skla), viz příloho obr. 23 a tabulka 5. Vogel – Fulcher – Tammannova rovnice (V – F – T rovnice) snáze určuje průběh viskozitní křivky díky matematickému výpočtu oproti experimentální metodě, která je nejen časově zdlouhavá, ale i přístrojově náročná, [41, 42, 43, 44].

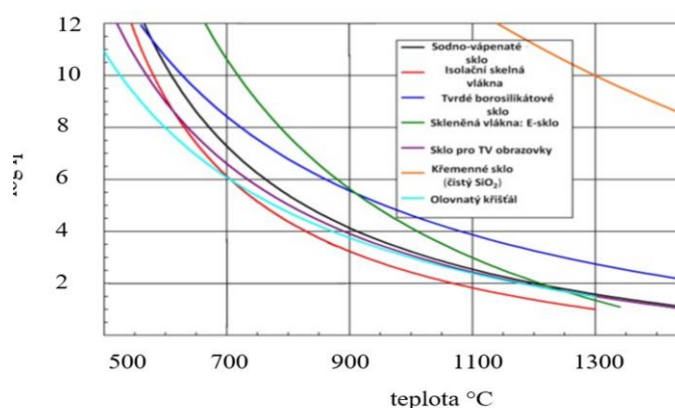
$$\log \eta = A + \frac{B}{T - C} \quad (2)$$

η – dynamická viskozita [Pa s], T – absolutní teplota [K], A , B , C – konstanty

(tabelované hodnoty pro příslušné sklo)



Obr. 20: Viskozitní křivka [41]



Obr. 21: Viskozitní křivka různých typů skel [42]

Tabulka 4: Chemické složení skla s % výčtem složek [41]

Složka	Ploché sklo	Obalové sklo zelené	Olovnatý křišťál	Simax sklo
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

Tabuka 5: Porovnání dlouhého a krátkého skla ve vztažných bodech viskozity,[45]

Vztažné viskozitní body	Sklo dlouhé (vysoce olovnaté)	Sklo krátké (barnaté)	Viskozita v určitých bodech [dPa s]
Transformační bod T_g [°C]	415	630	$10^{13,5}$
Bod měknutí T_m [°C]	595	761	10^8
Bod tečení T_t [°C]	785	890	100
Teplota liquidu T_l [°C]	1200	1093	
Dolní chladicí teplota T_d [°C]	395	608	$3 \cdot 10^{14}$
Horní chladicí teplota T_h [°C]	423	635	10^{13}
Oblast tuhnutí [°C]	415 - 1200	630 - 1093	$10^{13} \rightarrow 3 \cdot 10^{14}$
Oblast zpracování [°C]	538 - 1076	720 - 1023	$10^4 \rightarrow 10^8$
Hustota [g/cm ³]	3,593	3,573	

Sklovina s nejnižší viskozitou se pohybuje v oblasti čerení 1450 °C pro běžná skla (nejvyšší dosažitelná teplota při procesu tavení skla), viz tab. 6. V této fázi tavení probíhá „bubling“ neboli chemická reakce vyvolávající bobtnání, záměrný projev plynů nutný k odstranění malých plynných (nežádoucích) látek z tekutiny (homogenizace skloviny), [41, 45].

$$\eta = \tau \frac{dy}{dv} \quad (3)$$

η – dynamická viskozita [Pa s], τ – tečné napětí [MPa], dy – vzdálenost vrstev mezi sebou [mm], dv – přírůstek rychlosti [mm s⁻¹]

Skla s nízkou hodnotou viskozity: olovnatá, draselná, sodná skla

Skla s vysokou hodnotou viskozity: křemenná, korundová skla

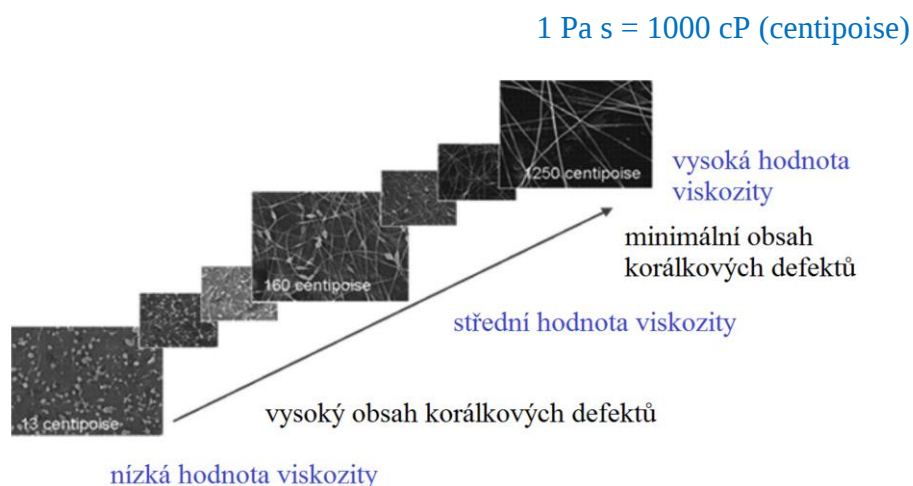
[43]

Tabuka 6: Hodnoty viskozitních bodů skloviny přirovnaných k jiným materiálům

Viskozita [dPa s]	Přirovnání tekutosti k jiným látkám	Tekutost skloviny
10^{-2}	Voda při 20°C	-
10^0	Lehký strojní olej	Teplota likvidu T_l
10^1	Těžký strojní olej	Bod čerení T_c , tavení skla
10^2	Olivový olej při 20°C	Bod tečení T_t
10^3	Tekoucí med při 20°C	Bod vnoření
10^4	Měkký med	Bod tváření, zpracování
$10^{7,6}$	Tuhý med	Littletonův bod měknutí T_m
10^8	Horní limit pro nízkou viskozitu	Bod tuhnutí, konec tvarování
10^{11}	Látka se bortí vlastní tíhou	Deformační bod
10^{13}	-	Horní chladicí bod T_h
$10^{13,5}$	-	Transformační bod T_g
$10^{14,6}$	-	Dolní chladicí bod T_d
10^{15}	-	Pevná fáze
10^{16}	Tuhá látka, pevná	Horní limit pro měření viskozity

3.2.2. Viskozita polymeru

Laminární polymerní tok tekutiny se neřídí Newtonskými zákony o kapalinách, ale naopak (Nenewtonské kapaliny). Poměr tečného napětí τ s rychlostním gradientem dv/dy není v tomto případě konstantní. Lze tedy říci, že hodnoty vnitřního tření částic jsou závislé na rychlostním gradientu (rozdílná viskozita pro rozdílné deformace). Procentuální obsah rozpouštědel v tekutině upravuje koncentraci polymeru, morfologii vlákna i samotnou viskozitu (vysoká koncentrace = vysoká viskozita). Viskozitní hodnoty látky se podílejí na podobě tvaru kapky, proudové trajektorie, průměru vlákna, tvorbě Taylorových kuželů (nízká viskozita) a korálkových defektů, viz obr. 24.



Obr. 24: Morfologie vlákenné vrstvy s rozdílnou koncentrací roztoku

Polymerní hodnoty viskozity

- a) Polymery s nízkou viskozitou $\eta < 1$
 - Defekty tvořící korálky na koncích vláken
 - Nepravidelné, zvlnění morfologie vláken
 - Variabilita průměrů vláken

- b) Polymery s vysokou viskozitou $\eta > 20$
 - Problematické zvlákňování (ovládání toku, stabilita)
 - Vysoká tvorba vlákenných svazků
 - Vysoké průměry vláken:
 - Stálost průměrů vláken
 - Změna tvaru průřezu vláken z kruhových na ploché
 - Pravidelné válcová morfologie
 - Minimální tvorba vlákenných svazků

Preferovaná velikost η polymerních plastů pro tažení nanovlákenných nití se pohybuje v rozmezí od 0,5 – 4 Pa s (5 dP a – 40 dPa s), u tavenin jsou to oblasti vyšší (100 – 2 000) Pa s viz tab. 7, [34, 36, 46].

Tabulka 7: Hodnoty dynamických viskozit pro určité druhy taveniny

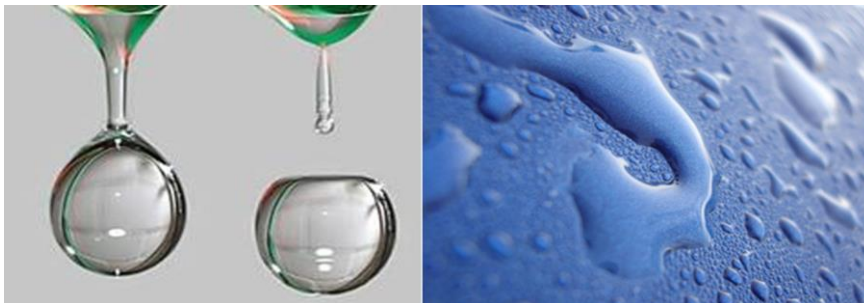
Druh taveniny	Dynamická viskozita η [Pa s]
kov	0,02
sklo	100
polymer	$10 \cdot 10^3$

3.3. Povrchové napětí

Definici povrchového napětí γ lze popsat jako sílu dF kolmo působící na povrch kapaliny o určité jednotce délky dl ve směru ke středu pomyslného tělesa (viz rovnice 4). Pomyslné těleso je ztvárněný proces vlastností tekutin o určitém objemu snáze zaujmout co nejmenší povrch (obr. 25, tab. 8), tedy tvar koule (kapka vody, mýdlová bublina), [47, 48, 49].

$$\gamma = \frac{dF}{dl} \quad (4)$$

γ – povrchové napětí [Nm^{-1}], dF – jednotka síly [N], dl – jednotka délky [m]



Obr. 25: Vysoká hodnota povrchového napětí

Obr. 26: Nízká hodnota povrchového napětí

Tabulka 8: Kapaliny s rozdílnými hodnotami povrchového napětí

Tekutiny	Povrchové napětí při 20 °C [10^{-3} Nm^{-1}]
Etanol	22,55
Aceton	23,3
Olivový olej	33,00
Glycerol	62,50
Voda	72,75
Rtuť	476

3.3.1. Povrchové napětí skloviny

Ve sklářském průmyslu se výhody povrchového napětí využívají zejména v oblastech tavení, čeření (bubling), dávkování, tvarování (zaoblení ostrých hran) i tepelného zušlechťování (leštění). Hodnoty napětí vyskytující se ve sklovině není zrovna lehké stanovit kvůli nepřesnostem v měření. Vlákenná analýza (viz rovnice 5) je jednou z nejpřesnějších i nejjednodušších experimentálních metod. Využívá pravidel aditivit (látky upravující vlastnosti skloviny), jakožto iniciátorů chemických změn v základním materiálu. Mezi sloučeniny zvyšující povrchové napětí patří oxidy vápníku (CaO) a hořčíku (MgO). Oxidy draslíku (K₂O), olova (PbO) nebo bóru (B₂O₃) naopak povrchové napětí snižují, [50].

$$\gamma = \frac{2g \Sigma M}{\pi \Sigma d} \quad (5)$$

γ – povrchové napětí [Nm⁻¹], g – gravitační zrychlení [ms⁻²], Σd – součet průměrů původních vláken, kapilár, tyčinek [m], ΣM – součet hmotností kapek [kg]

3.3.2. Povrchové napětí polymeru

Korekci povrchového napětí polymerního roztoku za pomoci rozpouštědel lze docílit minimálního projevu korálových defektů na filamentech. Variabilita chemického složení rozpouštědel může mít za následek rozdílné hodnoty povrchových sil. Závislost koncentrace na napětí polymeru obsahující rozpouštědlo je zanedbatelná.

Snížení sil působících v povrchu tekutiny (obr. 26) nemusí být pro elektrostatické zvlákňování výhodou, [36].

4. Praktická část - testování

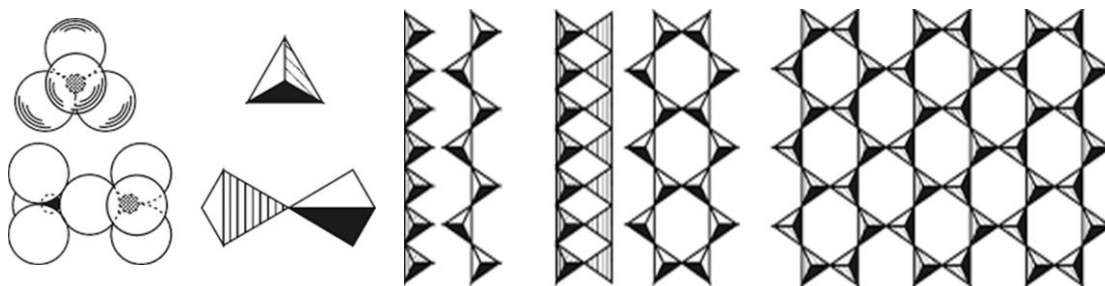
Veškeré testování a odborné konzultace probíhaly v prostorách Technické univerzity v Liberci (Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace, Fakulta textilní - Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů, Fakulta strojní – Katedra částí a mechanismů strojů, Katedra energetických zařízení, Katedra sklářských strojů a robotiky).

4.1. Základní vlastnosti skla

Sklo definujeme jako amorfni pevnou látku vznikající tuhnutím bez krystalické fáze. Tuhnutí skla je tedy způsobeno pozvolným růstem viskozity na určitou hodnotu, kdy se již materiál jeví jako látka pevná. Struktura tohoto materiálu pak na rozdíl od krystalů vykazuje prostorově neuspořádané atomy od sebe více vzdálené (obr. 27).

4.1.1. Struktura přírodních silikátů

Silikátové materiály spadají do jedné z nejsložitějších tříd anorganických látek. Základním stavebním prvkem je sloučenina křemíku s kyslíkem (popř. s ostatními doprovodnými prvky). Atom křemíku (Si) se v silikátech vyznačuje s koordinačním číslem 4, který zajišťuje polohu tohoto prvku vždy do středu tetraedru. Vrcholky tetraedru jsou obsazeny atomy kyslíku (O). Spoj čtyřstěnu (tetraedru) SiO_4 je snáze spojitelný s ostatními tetraedry, přičemž vznikají velmi složité řetězce, vrstvy nebo trojrozměrné struktury. V přírodních silikátech je křemík (Si) často nahrazován izomorfne hliníkem (Al) za vzniku alumosilikátů. [9]



Obr. 27: Struktury SiO_2

4.1.2. Sklářské suroviny

Základním kamenem pro výrobu skla (skleněných váz, trubic, tabulových skel, domácenských produktů či vláken) jsou vždy kvalitní suroviny dodávající materiálu své specifické vlastnosti ať ve stavu kapalném (urychlovače tavení, čeřiva, stabilizátory), či v pevném (mechanická odolnost, pevnost, transparentnost, barevnost).

Sklářský kmen je zhomogenizovaná (sypká, tuhá) směs sklářských surovin, ze kterých tavením vzniká sklovina (tekutá látka). Procentuální podíl složek vyskytujících se ve sklářském kmeni ovlivňují vlastnosti skla nejen při procesu tavení (viskozita, smáčení), tvarování (dlouhá skla, krátká skla), ale i po jeho vychlazení (chemická odolnost, mechanická odolnost, rozptyl světla).

4.1.2.1. Základní rozdělení surovin

Sklotvorné oxidy

Sklotvorné oxidy jsou oxidy, přesněji síťotvořiče se schopností přecházet do sklovitého neboli amorfního stavu. Díky této vaznosti iniciovanou prostřednictvím můstkových kyslíků vzniká vnitřní nepravidelná struktura skla.

Oxid křemičitý SiO_2

SiO_2 je základní sklotvorná složka pro běžná skla i skla speciální. Příznivě ovlivňuje vlastnosti skla po stránce chemické (odolnost proti kyselinám) i mechanické (pružnost, pevnost) tak v oblasti teplotní roztažnosti. Vysoký obsah SiO_2 má za následek snížení součinitele teplotní roztažnosti (vysoká odolnost proti teplotním rázům), na druhé straně způsobuje zhoršení tavitelnosti společně se zvyšující se schopností odskelnění (tvorba křemičitých krystalů).

Oxid boritý B_2O_3

Předností tohoto oxidu je částečné nebo úplné nahrazení oxidu křemičitého ve sklářském kmeni. Využití této složky je zejména ve výrobě varného skla (Simax), protipožárního skla (Pyrex) nebo vlákných produktů (BTTO s.r.o., RAYMOND GROUP, s.r.o., Bohemia tex s.r.o.). B_2O_3 zlepšuje tavitelnost sklářského písku, snižuje teplotní součinitel roztažnosti (odolnost proti teplotním rázům), zvyšuje chemickou odolnost skla (vůči kyselinám, louchům) a v neposlední řadě zvyšuje kvalitu lesku. Nevýhodou této suroviny je pak vysoká pořizovací cena.

Taviva

Taviva jsou suroviny napomáhající procesu tavení tím, že snižují teplotu rozkladu sklářského písku a jiných hůře tavitelných složek. Respektive jsou to látky se schopností snížit tavíci hodnotu písku ze 1725°C na $(1400 - 1500)^\circ\text{C}$, což významně ovlivňuje nejen finanční, ale i energetickou náročnost, životnost tavících agregátů a čas tavení.

Oxid sodný Na_2O

Na_2O je jedna z hlavních složek s vysokou tavíci schopností působící také na součinitel teplotní roztažnosti společně s viskozitou, a tím pádem prodlužuje tvarovatelnost neboli zpracovatelnost skloviny. Zvyšování podílu Na_2O ve sklovině podporuje elektrickou vodivost, kterou uplatňujeme při tavení s průchodem přímého elektrického proudu. Chemická odolnost skla proti kyselinám, louchům atd. je díky tomuto oxidu snížena.

Oxid draselný K_2O

Vlastnosti této sloučeniny jsou srovnatelné s oxidem sodným, avšak zvyšuje lesk skla, podporuje barevnost a sytost odstínů, ovšem zpracovatelnost skel je horší (krátká skla). Pro výrobu olovnatého křišťálu však představuje tento oxid základní surovinu.

Stabilizátory

Stabilizátory jsou suroviny ovlivňující fyzikální, mechanické, chemické, optické, tepelné a v neposlední řadě i elektrické vlastnosti skloviny či skla. Tyto sloučeniny umožňují specifické upravení vlastností dle našich potřeb a účelu.

Sloučeniny obsahující prvky: vápníku Na, hořčíku Mg, olova Pb, barya Ba, hliníku Al, vápníku Ca, zinku Zn

Oxid olovnatý PbO

Toxicitu olovnatých sloučenin je nutné brát v potaz stejně jako atmosféru, při níž se sklovina obsahující prvky Pb taví (oxidační prostředí). Olovo zvyšuje hustotu skla společně s její disperzí a indexem lomu (optická skla). Usnadňuje tavitelnost skloviny, zlepšuje tvarovatelnost skloviny (měkká skla) s delším intervalem pro tváření (dlouhá skla).

Pomocné suroviny

Barviva

Jedná se o doprovodné sloučeniny kovů vyvolávající ve skle požadované zabarvení. Částice, jako nositelky barevnosti mohou být ve skle přítomny v podobě molekul, iontů nebo koloidů. Konečný charakter barvy je vždy ovlivněn vícero činiteli (koncentrace barvicí látky, základní chemické složení skla, přítomnost oxidovadel či redukovadel v tavící atmosféře, způsob tepelného zpracování pro nabíhavá skla).

- a) Iontová barviva - Ni, Co, Fe, Cr
- b) Molekulární barviva - S, Se, C
- c) Koloidní barviva - Au, Ag, Cu

Kaliva

Kaliva neboli přísady produkující krystalické, kapénkové či emulzní zakalení. Sklo ztrácí svoji průhlednost (transparentnost) a průsvitnost (podle intenzity kaliva).

- a) Krystalické – sloučeniny fluoru, Opál
- b) Kapénkové – sloučeniny fosforečnanu, Opalín (mléčné sklo)
- c) Plynné – jemné rozptýlené bublinky, Alabastr

Čeřiva

Jsou látky uvolňující chemickou reakcí – rozkladem, při vysokých teplotách velké množství plyných bublin. Tato reakce, tzv. „bubling“, způsobuje strhávání menších bublin, které se spojí do větších celků a postupují k hladině skloviny. Výsledkem celého procesu je homogenizace skloviny s odstraněním nežádoucích bublinek.

Čeřicí látky: Sírany, oxidovadla, amoniaky, arzény, ledky, halogenidy, dusičnany

Urychlovače tavení

Jak napovídá označení, jedná se o sloučeniny urychlující proces tavení. Zrychlují chemické reakce, zlepšují rozpustnost SiO_2 a usnadňují vaznost reaktivních surovin.

Nejvíce používané urychlovače tavení jsou fluoridy, chloridy, sírany, sirníky, voda (o obsahu 2% -4%).

Střepe

Střepe - recyklovaný materiál stejného chemického složení jako je používaná sklovina. Maximální spotřeba střepeže je do 80% (obalové sklo, lahvové sklo) a minimální podíl střepe do 30% (optická skla), [36, 43, 41, 51]

4.2. Materiálové složení skla určeného k utavení (zvláknění)

Výběr skelného materiálu k testování byl určen na základě několika důležitých kritérií, jako je např. snadná tavitelnost, velikost materiálu a obsah přídatných složek, [52].

Materiály k natavení

a) Olovnaté sklo

- Střep z odlivky (sklenice)
- Sklo s obsahem 24% Pb
- Teplota tavení 900°C
- Dodavatel – Vlastimil Křišťan, brusírna skla, Světlá nad Sázavou

b) Sklářské vypalovací barvy

- Skleněný prach
- Obsah tavidla, kaliv, pojiva, stabilizátorů
- Teplota tavení 560°C
- Dodavatel – Viva Decor, Ferro barvy (využívané firmou Crystalex CZ s.r.o., Nový Bor)

c) Keramické nízkotavné barvy

- Glazurový prach
- Teplota tavení 800°C
- Dodavatel - Viva Decor, Ferro barvy (využívané firmou Crystalex CZ s.r.o, Nový Bor)

4.3. Hrubost tavného materiálu

Následuje jednoduchý výčet rozměrových vlastností daného materiálu.

- a) Prachové částčky – prachy velikostně odpovídající sklářským a keramickým barvám (glazury), obr. 28a
- b) Jemná střepáž – střepy o velikosti cca 4x2x2 mm, obr.28b
- c) Prachová střepáž (drť) – střepy prachové o maximální velikosti 1x1x1 mm, obr. 28c



Obr. 28.: a) prach, b) jemná střepáž, c) prachová střepáž

4.4. Výběr tavícího odporového média

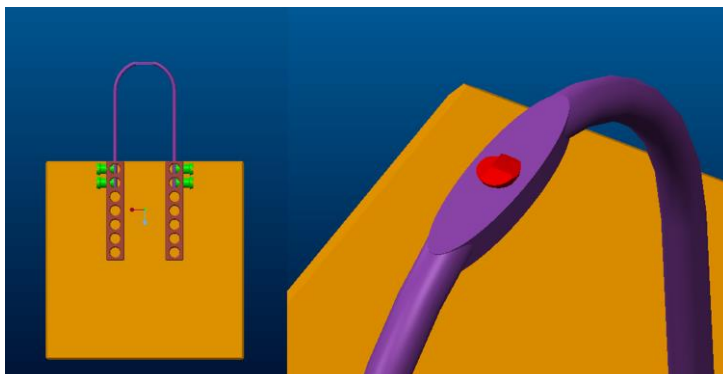
Výběr tavícího odporového média proběhl na základě určitých kritérií, jako jsou koroze materiálu v závislosti na sklovině, měrný odpor, maximální teplota použití aj.

4.4.1. Odporový kanthalový drát

Kanthalový drát o průměru 2 mm bylo nutné přizpůsobit kvůli snazšímu umístění skelného materiálu na jeho povrch před tavením (obr. 29). Úpravy spočívaly ve zploštění průřezu drátu ve středové části smyčky (tvar U, délka 160 mm) s následnou deformací na plošku o rozměru cca 3 mm vytvořením důlku o průměru cca 1mm a hloubce cca 0,5 mm). Ploška zajišťovala tuhý materiál proti pohybu, kdežto důlek centralizoval natavenou sklovinu do určitého bodu, [53].

Tyto úpravy se však potýkaly s problémy spojenými s pevností materiálu. Narušením vlákně textury materiálu (zploštění pomocí kladiva) se drát v této oblasti stal křehčím. Při zvýšené síle použité pro tvarování smyčky došlo k celkové deformaci a následnému prasknutí v oblasti plošky. Pro zhotovení důlku bylo nutné vytvořit razidlo, které mělo zakulacený konec hřebu o průměru cca 1 mm. Přes narušenou texturu kanthalu (změknutí, zkřehnutí) nebylo snadné jamku vyrobít (smekání hřebu při ražení, proražení materiálu, uštípnutí boční části plošky).

Kanthalový drát byl využit při testování jak v neizolovaném, tak v izolovaném prostředí o rozdílných průměrových hodnotách (obr. 30).



Obr. 29: Model úpravy kanthalového drátu

Údaje o použitém materiálu typu A:

Dodavatelé: ELCHEMCo spol. s r. o.

GES – ELECTRONICS a.s. (ges.praha@ges.cz)

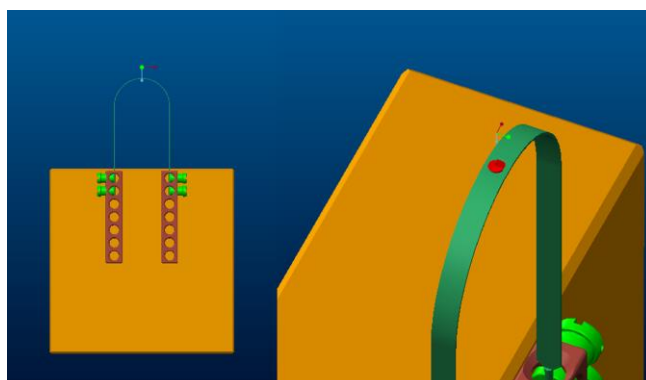
Název materiálu:	Kanthal typu A
Průměr drátu:	2,0 mm
Složení materiálu:	Fe70 Cr 24 Al 5,5 Co 0,7
Měrný elektrický odpor:	0,46 [Ω m]
Teplotní součinitel odporu:	+32 - 63 10^{-6} (49) [K^{-1}]
Maximální pracovní teplota:	1200 (1300) [$^{\circ}C$]



Obr. 30: Kanthalový drát o průměru a) 1,2 mm, b) 1,5 mm, c) 2,0 mm

4.4.2. Odporový kanthalový pásek

Kanthalový pásek bylo také nutné tvarově přizpůsobit (viz obr. 31) zejména ve středové oblasti (vytvoření důlku) pro centralizaci natavené skloviny a ztvarování materiálu do podoby smyčky (tvar U, délka 160mm). Zhotovení jamky o požadovaných rozměrech (průměr cca 1 mm, hloubka cca 0,5 mm) ve středové části smyčky nebylo tak problematické jako v předešlém případě (drát kruhového průřezu). Styková plocha mezi sklem (drť, jemná střepáž) a páskem je předem dána výrobcem (šířka) tudíž nedochází narušení textury samotného materiálu (zkřehnutí), [54].



Obr. 31: Model úpravy kanthalového pásku

Údaje o použitém materiálu typu D:

Dodavatelé: NADETA, s r. o. (obchod@nedeta.cz)

Název materiálu: Kanthal typu D

Šířka: 3,0 mm

Tloušťka: 0,3 mm

Složení materiálu: Fe73,2 Cr22 Al4,8 Co

Měrný elektrický odpor: 1,63 [Ω /m]

Teplotní součinitel odporu: +32 - 63 10^{-6} (49) [K $^{-1}$]

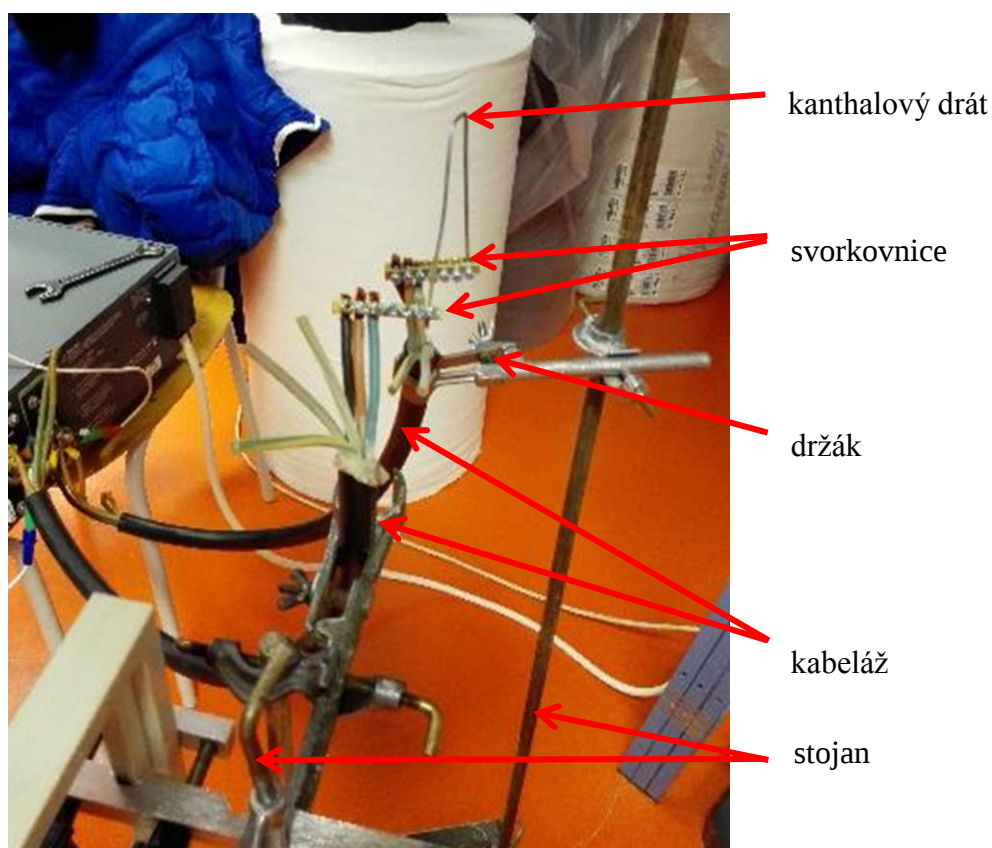
Maximální pracovní teplota: 1300 [°C]

Obchodní názvy: FeCrAl 135, ResistOhm®, 135®

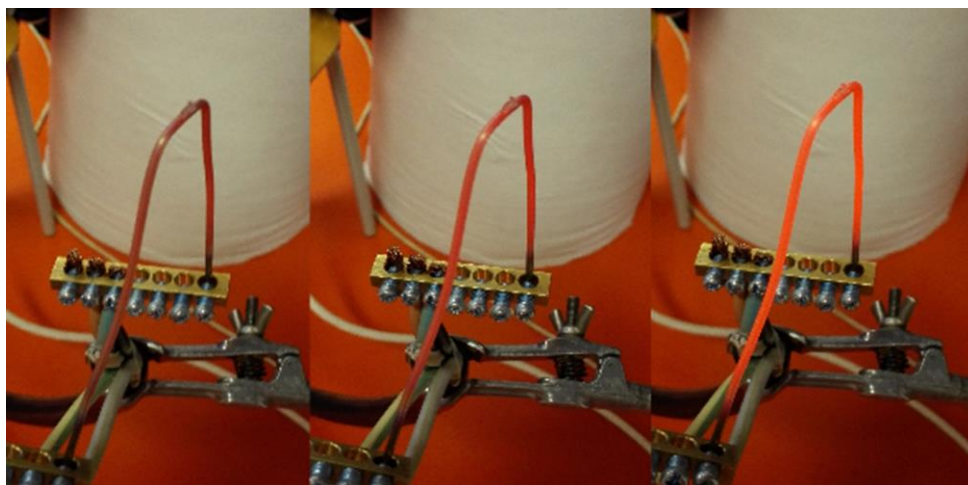
Výrobce: Shanghai Tankii Alloy Material Co., Ltd.

4.5. Počátky testování

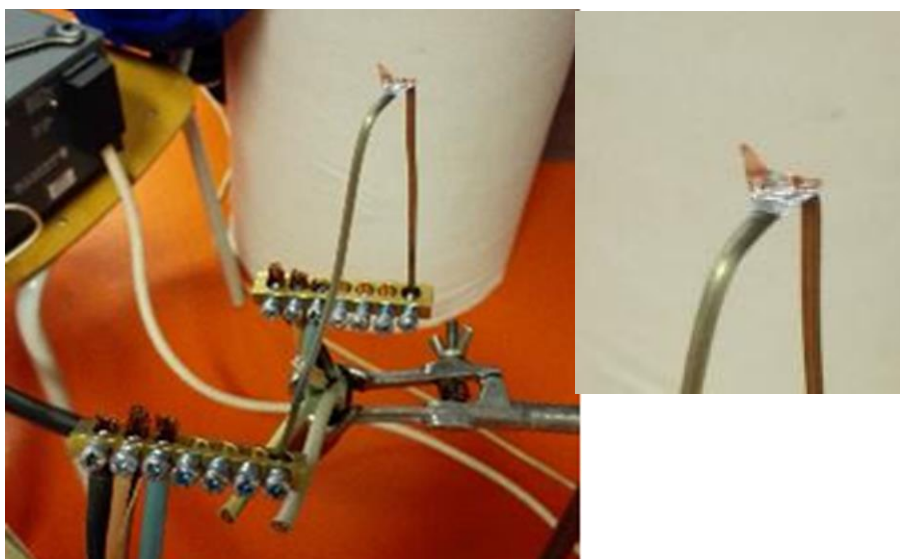
Základem testování bylo nejprve stanovit teplotní chování kanthalu (drát, pásek) při průchodu elektrickým proudem (obr. 32, 33, 34). Druhotný pokus v podobě úmyslné izolace obvodových prvků proti teplotnímu žáru bylo zajištěno pomocí Ytongových desek (obr. 44) přizpůsobených svorkovým spojmám a kabeláži. Pro přesné stanovení teploty kanthalového testovacího prvku bylo použito Pyrometrické drátkové měřidlo.



Obr. 32: Prvotní tavení skelného materiálu v neizolovaném prostředí



Obr. 33: Žhavení kanthalového drátu typu A, při procesu natavování skleněného střepu z Pb skla



Obr. 34: Detail střepu z Pb skla při procesu natavování

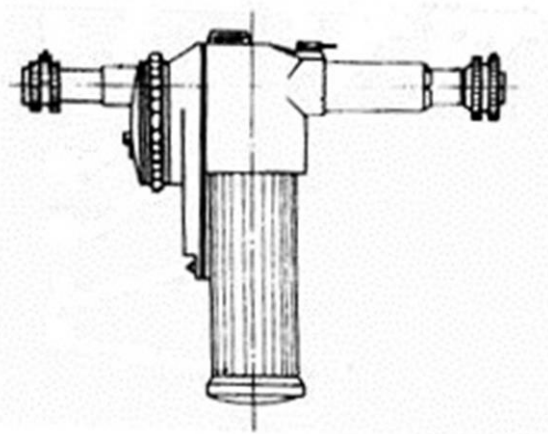
4.5.1. Optický pyrometr - PYROMET

Optický bezdotykový pyrometr značky Metra n.p. slouží k měření teploty daného tělesa o vlnové délce $\lambda = 0,65\text{mm}$ (obr. 35 - 40). Postup měření spočívá v optickém porovnání systému měřeného objektu se září pyrometrického měřicího vlákna pyrometrické žárovky, [55]

Pyrometrické zařízení principem připomíná dalekohled s výsuvným objektivem vytvářející obraz měřeného tělesa v rovině vlákna žárovky. Díky výsuvnému okuláru je možné doostřit vlákno žárovky vůči testovanému pozadí. Měřicí zařízení také obsahuje

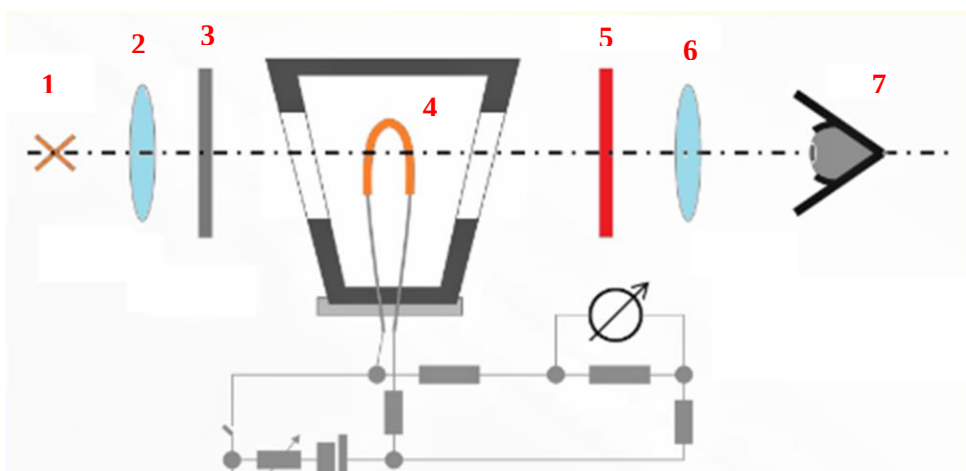


Obr. 35: Drátkový pyrometr značky Metra n. p.



Obr. 36: Schématický nákres pyrometru

červený filtr, kterým vymezujeme vlnovou délku záření nad $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Filtr je nutné manuálně aktivovat. Pro zvýšení měřicího rozsahu se mezi objektiv a žárovku vsadí šedý filtr s tím, že je nutné jeho manuální aktivování. Schématický popis optického pyrometru, znázorněn na obr. 37, se skládá z pyrometrické žárovky žhavené proudem, 3V baterie přes otočný reostat ručně aktivovanou tlačítkem. V paralelním zapojení je k žárovce připojen magnetoelektrický přístroj obsahující teplotní stupnici. Stanovení teploty zkoumaného tělesa je závislé na regulaci odporu detekujícím přístrojem tak, aby se konec smyčky vlákna žárovky svou září splýnul se září měřeného objektu (obr. 41).

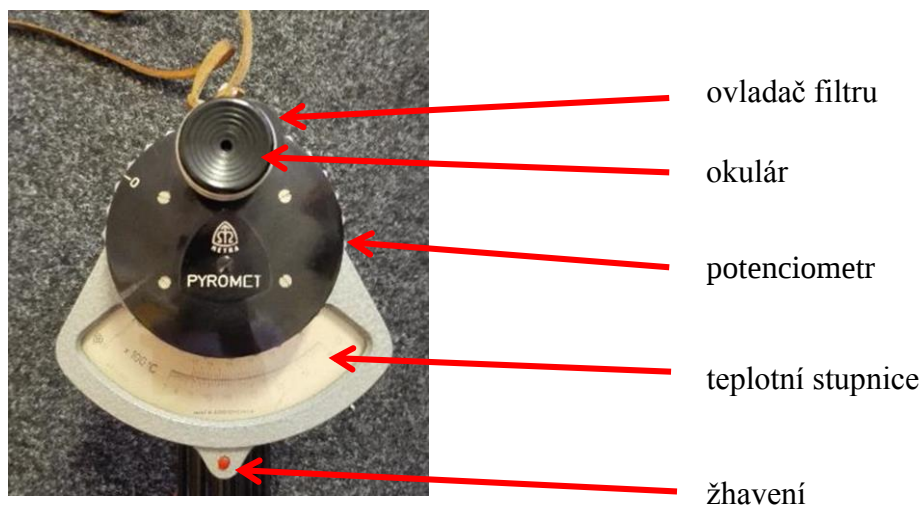


Obr. 37: Schéma optického pyrometru

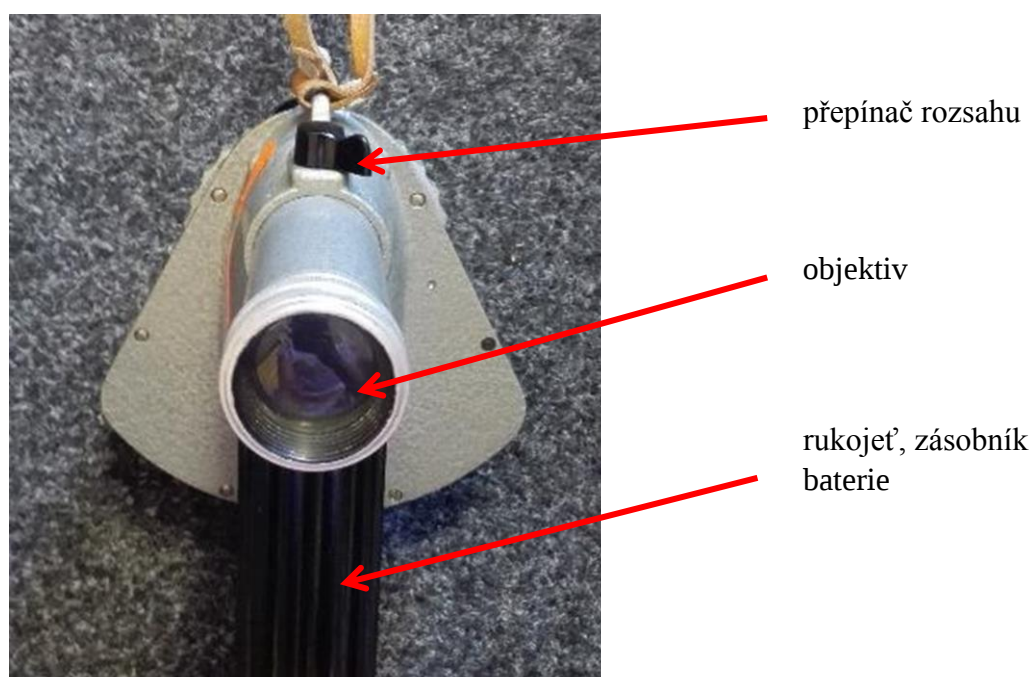
1 zářič, 2 objektiv, 3 šedý filtr, 4 žhavicí lanko, žárovka, 5 červený filtr, 6 okulár, 7 oko pozorovatele



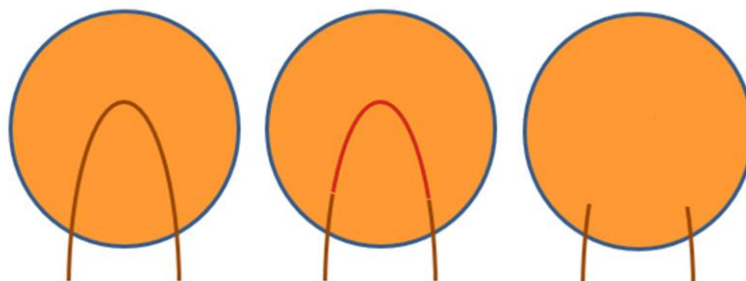
Obr. 38: Optický pyrometr Metra



Obr. 39: Optický pyrometr Metra



Obr. 40: Optický pyrometr Metra, detail zadní části z pohledu pozorovatele



Obr. 41: Detekce teploty zářivého tělesa vůči žhavenému vláknu žárovky.

- Žárovka v chladném stavu oproti žhavému zkoumanému objektu.
- Vlákno nažhaveno na vyšší teplotu oproti zkoumanému materiálu.
- Žárovka s odpovídající teplotou rovnající se zkoumanému materiálu v pozadí.

Teplotní rozpětí optického pyrometru se pohybuje v rozsahu (700 - 1 500) °C s chybou $\pm 22^\circ\text{C}$ a v rozsahu (1 200 - 2 300) °C s chybou $\pm 35^\circ\text{C}$. Při měření do 900 °C záření červeného filtru vzniká doplňková chyba, tzv. nemonochromaticnost, kdy hodnoty mohou dosahovat maximálně $\pm 20^\circ\text{C}$. Stupnice pyrometru pro záření dokonale černého tělesa vykazuje emisivitu $A_1 = 1$. Reálná tělesa vyzařují méně energie, tudíž bude jejich naměřená teplota vždy nižší než skutečná. Vzhledem k této skutečnosti je nutné použít korekční tabulky včetně grafu pro výpočet korekce. V tabulce 9 je uveden příklad látek společně s emisivitou A_1 .

Tabulka 9: Hodnoty emisivity A_1 pro $l = 0,65\text{mm}$

Materiál	Neoxidovaný povrch		Hladký povrch obsahující kysličník
	Tuhý	Tekutý	
uhlík	0,93	-	-
železo	0,35	0,37	0,63 – 0,98
ocel	0,35	0,37	0,8
porcelán	-	-	0,25 – 0,5
šamot	0,6	-	-
kanthal	0,8		0,7 – 0,8

Emisivita zkoumaného materiálu A_1 (tab. 9) a naměřená hodnota teploty dána pyrometrem jsou porovnány v grafu na obr. 42, který udává potřebnou korekci pro adekvátní výsledek, [55]. Tyto korekce připočteme k naměřené teplotě a tím získáme adekvátní výsledky měření.

I přes korekce však může docházet u pyrometrů k chybám způsobeným absorbcí záření, v závislosti na okolním prostředí, jako je např. CO_2 , páry H_2O a sklo, absorbující tepelné záření. Výstupní údaje z měření pak budou kvůli tomuto působení nižší.

Postup měření optickým pyrometrem

Ovládání měřicího zařízení (obr. 38 - 40) je velice snadné. Měřicí vzdálenost od detekovaného tělesa se pohybuje v rozmezí (1 – 3) m. Držením červeného tlačítka dochází ke žhavení žárovky, které lze pozorovat okulárem. Teplota vlákna je nastavována otáčením potenciometru, dokud vrchol žhaveného drátku nesplyne s pozadím zářiče. Povytažení okuláru umožňuje zaostření žhaveného drátku, zatímco povytažení objektivu doostřuje měřený předmět v pozadí. Přepínač rozsahu aktivuje funkci šedého filtru pro adekvátnost měření vzhledem k nadměrnému ohřátí zkoumaného předmětu (stupnice do 1500 °C nestačí), kde stupnicová škála je větší (do 3500 °C). Změřená hodnota ve

stupnicích Celsia se vypočte ze stupnice umístěné na těle pyrometru. Polohovatelné kolečko v blízkosti okuláru umožňuje vyřazení červeného filtru (pro toto měření byl filtr ponechán aktivní, protože se měření nacházelo v červené části spektra).

Pro adekvátní vyhodnocení bylo třeba provést korekci na skutečnou barvu vyzařujícího tělesa (stupnice pyrometrická byla kalibrována pro standardní černé těleso).

Výhody optického pyrometru

- rychlost měření
- měření objektů statických
- snadná manipulace s přístrojem
- jednoduchá skladnost měřicího zařízení
- měření teploty v obtížně dostupných místech
- bezproblémové měření velmi vysokých teplot (1500 °C)
- detekovaný objekt není po dobu měření teplotně ovlivněn
- měření probíhá bez kontaminace a mechanických účinků detekovaného objektu

Nevýhody optického pyrometru

- měřený objekt pro teploměr opticky viditelný
- měří se pouze povrchová teplota materiálů a je nutné brát v úvahu jejich emisivitu

Využití optického pyrometru v praxi

- Sklářský a keramický průmysl - tavení sklářského kmene, tvarování kalíškoviny, lisování čoček
- Strojírenský průmysl - tavení kovů, teploty kokyl a ingorů

4.6. Vliv okolního prostředí na tavbu skleněného preparátu

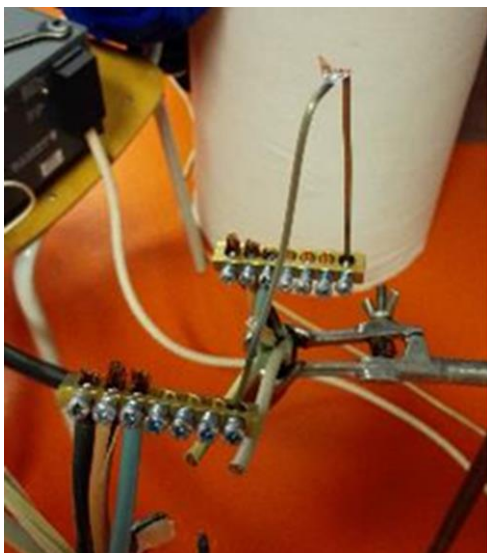
Prostředí, ve kterém bylo testování prováděno, úzce souvisí s vyskytujícími se nežádoucí procesy při samotném tavení skelného materiálu – zvláknění, kolísání teplot, znečištění proudem částic aj.

Prostředí dělíme

- Neizolované prostředí - nijak vyhrazené (bez omezení), s cirkulací vzduchu, kolísání teplot, znečištění, atd.
- Izolované prostředí - omezené, bez vlivu nežádoucích aspektů

4.6.1. Tavení skla v neizolovaném (volném) prostředí

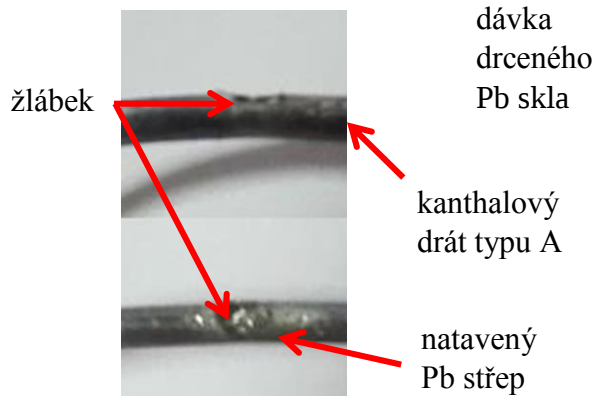
Snahy o natavení dávky skelné drtě či jemné střepáže pomocí kant. drátu typu A byly značně ovlivněny okolním prostředím (obr. 33, 43 - 47). Vzhledem k nechráněnému prostoru v oblasti přechodu skla do podoby skloviny jsou tepelné ztráty natolik značné, že i při 1100 °C sklovina vykazovala minimální plastické defekty, viz obr. 45 a 46 (vysoká viskozita, vysoké povrchové napětí). Při zvýšení teploty na tavícím médiu nad 1250 °C byly projevy skloviny daleko přijatelnější (viz tab. 10).



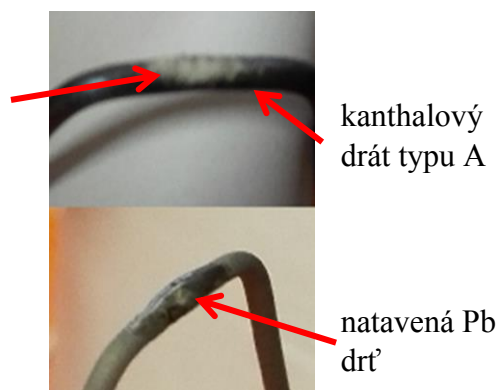
Obr. 43: Natavení střepu z Pb skla,
první test



Obr. 44: Snímání termokamerovým
systémem v neizolovaném prostředí



Obr. 45: Zkušební nátav Pb střepu

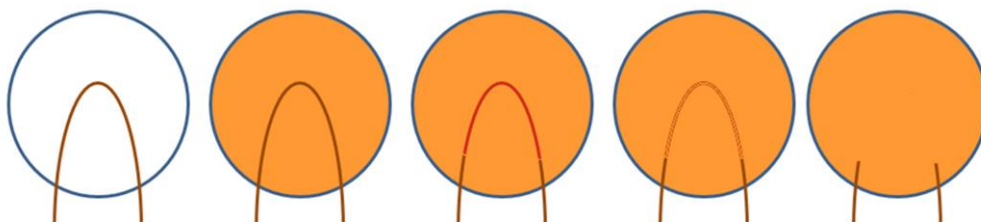


Obr. 46: Zkušební nátav Pb střepáže, drť

Po vrypu pinzetou do natavené dávky (kapky) se vlastnosti materiálu změnily do viskózní podoby tuhého medu (tab. 6, obr. 46). Odtažením nástroje z místa sklovité kapky došlo k narušení povrchového napětí a byla jasně viditelná „vlasová stopa“ (krátké skelné vlákno cca 200 mm). Rozdíly v rychlosti natavení skla (ze stavu tuhého v téměř „tekutý“) prachové částice vypovídaly rychlejší stavový přechod oproti střepu. Nátav drtě po vychladnutí (viz obr. 46) obsahoval drobné bublinky vlivem uspořádanosti jemných částic (tuhý stav) s obsahem vzduchu v meziprostorových částech. Tuhý, dříve natavený střep (stav tekutý) neobsahoval defekty – bublinky, v závislosti na materiálové celistvosti střepu (jeden kus skla).

Tabulka 10: Záznam naměřených hodnot pyrometrem při detekci teploty kant. drátku

Proud [A]	50	55	60	65
Teplota [°C]	1 050	1 200	1 250	1 320
Škála zbarvení	Oranžovo - červená	Světle oranžová	žluta	Bílá

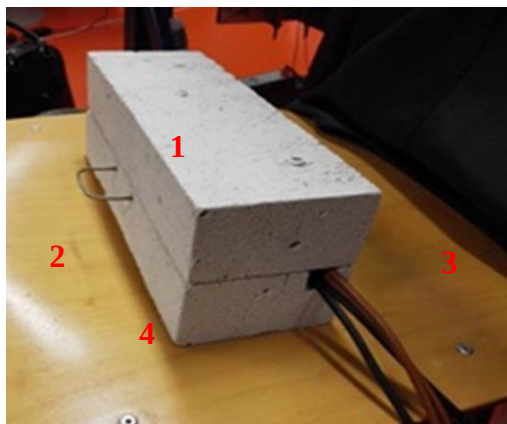


Obr. 47: Detekce teploty zářivého tělesa vůči žhavenému vláknu žárovky.

- Žhavicí vlákno v chladném stavu proti nijak tepelně zatíženému pozadí (bez zkoumaného objektu).
- Žárovka v chladném stavu oproti žhavému zkoumanému objektu.
- Žárovka s nižší teplotou oproti zkoumanému materiálu (cca 900 °C).
- Vlákno nažhaveno na vyšší teplotu oproti zkoumanému materiálu (cca 1200 °C).
- Žárovka s odpovídající teplotou rovnající se zkoumanému materiálu v pozadí (cca 1320 °C).

Problematika projevující při testování ve změně uchycení indukčního média

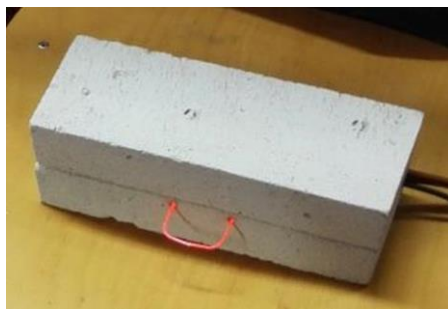
Chování kanthalového drátku (obr. 48) při zvyšování proudového napětí vykazovalo tepelné spektrální změny. Zaznamenaná data popisují barevné změny materiálu (obr. 49), teplotu, hodnotu proudu, hodnotu napětí a pevnostní změny (optické) jsou uvedena v tabulce 10.



Obr. 48: Změna uchycení odporového drátu typu A pomocí ytongových bloků

1. Ytongová izolace
2. Kanthalový drát (tvarovaný)
3. Kabeláž
4. Podkladová deska

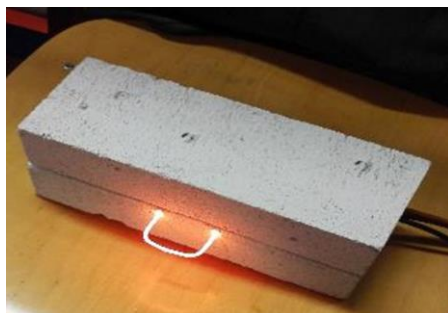
Vzhledem k vyskytlým problémům v oblasti spoje drátku, svorek a přivedeného napětí bylo nutné Ytongovou izolaci upravit. Kvůli přívodu elektrické energie se teplota v okolí svorek a drátu zvýšila natolik, že došlo nejen ke spečení přírodní kabeláže, ale i k výboji doprovázeného destrukcí odporové smyčky (obr. 49 - 5 a obr. 52). Chlazení problematické oblasti (svorky, drát, přírodní kabeláž) bylo řešeno v kolmém ustavení jednoho z Ytongových kamenů (obr. 50), tj. volným sálavým přechodem do okolního prostředí.



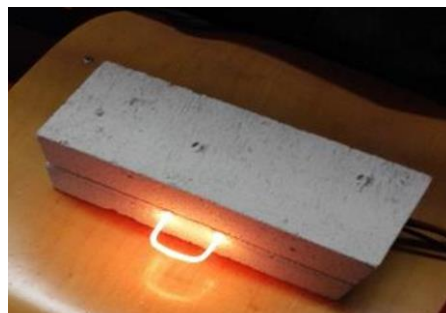
Obr. 49 - 1 : Žhavení kant. drátku 950 °C



Obr. 49 - 2: Žhavení kant. drátku 1000 °C



Obr. 49 - 3: Žhavení kant. drátku 1050 °C



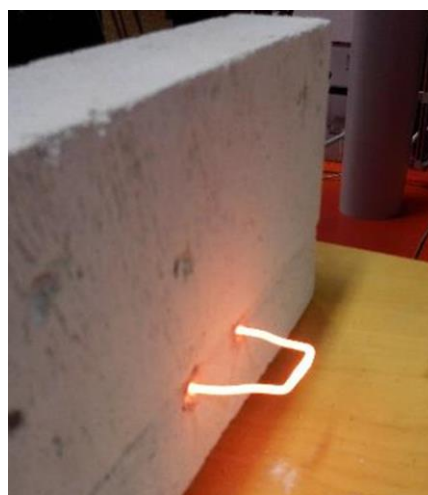
Obr. 49 - 4 : Žhavení kant. drátku 1250 °C



Obr. 49 - 5: Destrukce kanthalové smyčky při dosažené teplotě 1320 °C



Obr. 50: Volné chlazení zadní části testovacího zařízení



Obr. 51: Žhavení kanthalového drátku 1250 °C



Obr. 52: Destrukce kanthalového drátu

4.6.1.1. Záznamy termokamerou

Záznamy pořízené termokamerou VarioCAM, InfraTec GmbH (obr. 53, 54) dokazovaly, že materiály malých rozměrů jako je kanthalový drát, nelze takto snímat. Pořízená data zpracována softwarem IRBIS 3 Professional vykresluje pouze teplotní pole vyskytující se kolem měřeného prvku, nikoliv data o měřeném prvku (obr. 55, 56). Pro porovnání uvádím fotografie pořízené klasickým fotoaparátem a termokamerou v totožném čase i proudovém napětí, viz tabulka 11. Snímek fotoaparátem byl pořízen z jiného úhlu pohledu (pohled z vrchu na objekt), kdežto snímek z termokamery byl proveden čelně na celý objekt pro detailní vykreslení tepelného spektra.

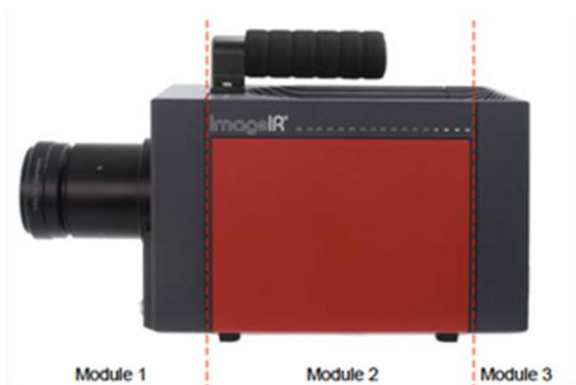
Vysokorychlostní termokamerové zařízení Infra Tec GmbH

Chlazená stacionární vysokorychlostní termokamera InfraTec je určena zejména pro vědecké a vývojové účely. Přednosti snímacího stroje jsou rychlost, rozlišení bolometru, rozmanité spektrální rozsahy a vysoká citlivost senzoru. Rozlišení bolometru se pohybuje až (1280 x 1024) pixelů, rychlost v řádku až 12 690 Hz, spektrální rozsahy jsou od 2,0 μm až 10,2 μm s teplotní citlivostí < 20 mK. Vyhodnocovací software dodávaný firmou InfraTec - IRBIS 3, [56].

Základní popis termokamery

Systém celého zařízení výrobce rozděluje do tří částí (modulů) viz obr. 53 a 54.

Modul 1	Modul 2	Modul 3
Rozhraní pro objektivy	Integrovaný chlazený detektor	Integrované datové rozhraní
Motorické kolečko clony	Elektronika pro detekci	Rozhraní pro sériovou linku
Motorické kolečko pro spektrální filtry	Převodník analog – digital	Rozhraní pro trigger
Motorická uzávěrka	Elektronika termokamery	Signalizace satusu
Rozhraní pro motorické objektivy	Integrovaná napájecí blok	Přípojka k napájení
Měření teploty optomechanických komponent	Mechanické rozhraní	Tlačítko napájení
	Řízení teplotních spádů kamery	



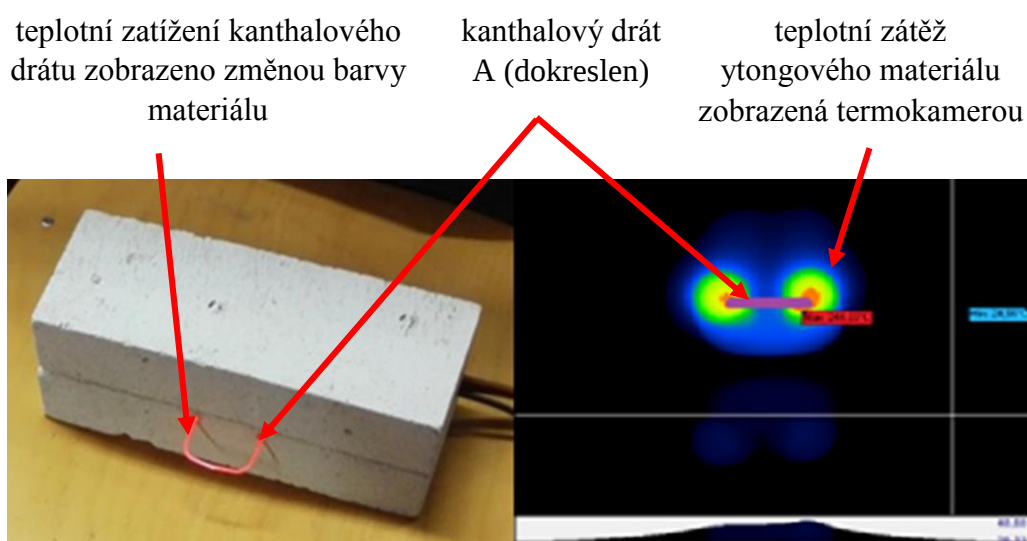
Obr. 53: Termokamerové zařízení Infra Tec



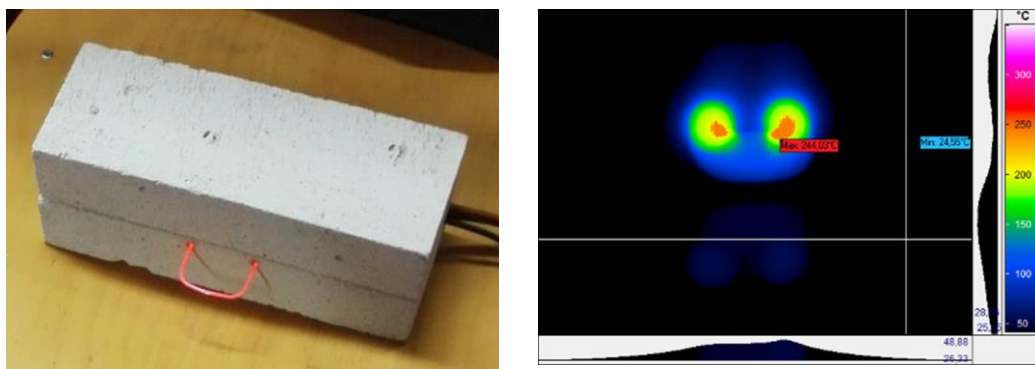
Obr. 54: Kompletní sestava termokamerového zařízení připravená pro

Teplotní detekce pomocí termokamerového zařízení

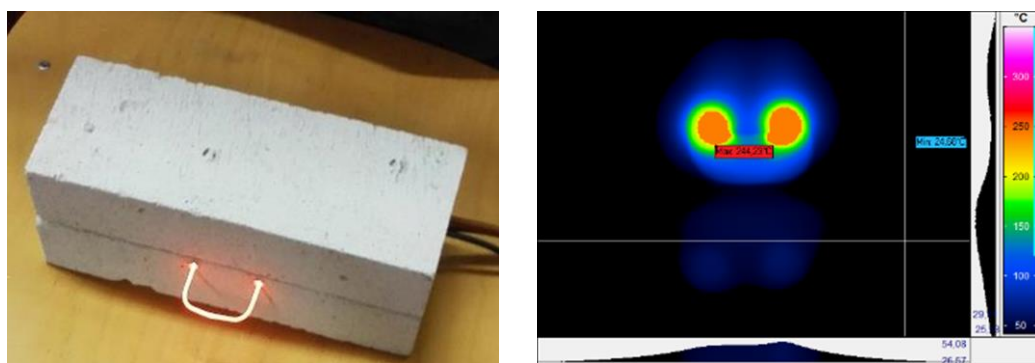
Termokamerový záznam jasně potvrzuje, že bezdotykové měření drobných předmětů tímto zařízením je zavádějící, viz obr 55, 56. Komplikace nastávají zejména při přesné lokalizaci testovaného předmětu po zahřátí. Vzhledem k tomu, že předmět je malých rozměrů a nastavení kamerového systému vyžaduje určitou vzdálenost vzhledem k adekvátnímu pořízenému záznamu (vliv tepelného vyzařování), zanikají dělicí plochy mezi drátkem a izolačním materiálem. Dochází tedy k tepelnému (barevnému) splynutí viz obrazový záznam (obr. 55).



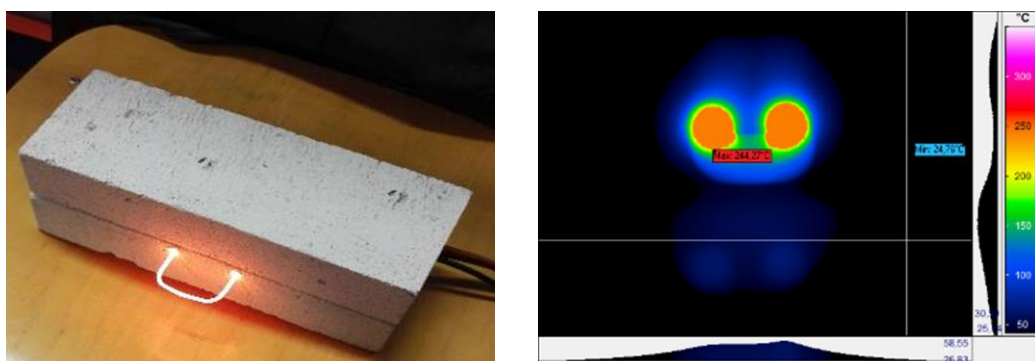
Obr. 55: Zkreslená data pořízena termokamerovým záznamem



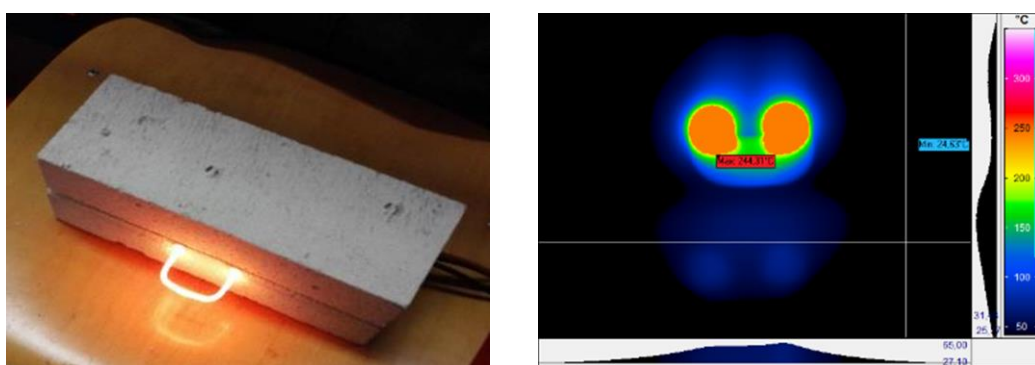
Obr. 56 - 1: Porovnání záznamů z fotoaparátu a termokamery



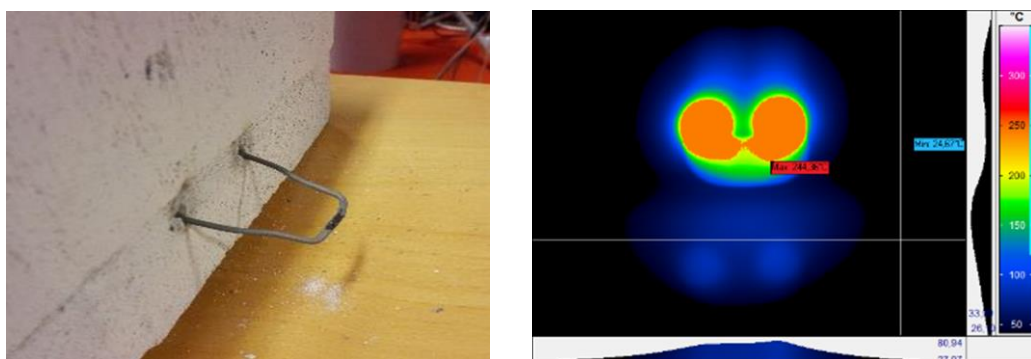
Obr. 56 - 2: Porovnání záznamů z fotoaparátu a termokamery



Obr. 56 - 3: Porovnání záznamů z fotoaparátu a termokamery



Obr. 56 - 4: Porovnání záznamů z fotoaparátu a termokamery



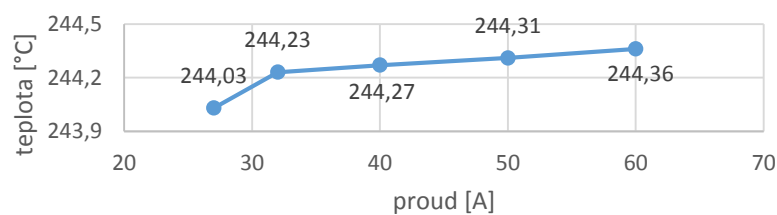
Obr. 56 -5: Porovnání záznamů z fotoaparátu a termokamery

Tabulka 11: Naměřené hodnoty při testování s termokamerou a pyrometrem

Číslo bodu	Proud [A]	Napětí [V]	Teplotní maximum [C°]	Kód záznamu [h-min-v]	Předpokládané teploty materiálu [°C]
1	5	27	244,03	112230	950
2	7,5	32	244,23	112434	1000
3	9	40	244,27	112510	1050
4	12	50	244,31	112534	1250
5	14	60	244,36	112610	1320
6	15	65	-	-	-

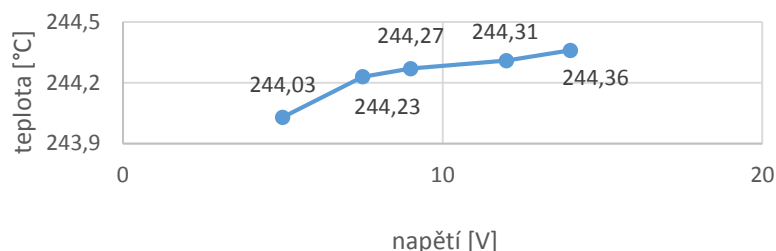
Graf 1: Měření teploty odporového drátu v neizolovaném prostředí se závislostí na napětí

Měření teploty odporového drátu v
neizolovaném prostředí se závislostí na
proudu



Graf 2: Měření teploty odporového drátu v neizolovaném prostředí se závislostí na proudu

Měření teploty odporového drátu v neizolovaném prostředí se závislostí na napětí



4.6.1.2. Vyhodnocení testování v neizolovaném prostředí

Na základě prvotního testování bylo zjištěno (pyrometr, vpich), že nechráněné okolí kanthalového drátu úzce souvisí s teplotními požadavky na natavení skleněné dávky. Spektrální (optická detekce člověkem, optický pyrometr) hodnoty odporového materiálu vykazovaly reálné teploty pro požadované tavení. Styková plocha mezi kovovým materiálem a dávkou skla projevila zvýšený viskozitní pokles, tj. změknutí (viskozita medu). Povrch nataveného materiálu (obal kapky) viskozitně neodpovídal stykové ploše. Vliv nechráněného okolního prostředí (proudění chladného vzduchu, kolísání teplot) zchladil povrchovou část kapky natolik, že ji lze nazvat jako krustu (vysoké povrchové napětí). Detekce látky pro reálný popis byl iniciován vrypem pinzety do nátavu s následným odtahem předmětu od vrypové části. Po překonání povrchového napětí krusty, tavenina ulpěla na špičce pinzety tedy, projevila vlastní možnost tažení (vznik skelného vlákna).

Pro zajímavost je zde uveden grafický výpis hodnot naměřených termokamerovým systémem, který je z výše uvedených důvodů již dále nevyužíván. Tento výpis zobrazoval údaje (ytongu) o proudu, napětí a teplotách které bylo možné při testování detekovat (graf 1, 2).

4.6.2 Tavení skla v izolovaném prostředí (laboratorní komora)

Testovaný materiál (skelná drť, jemná střepáž) v prostorách laboratorní komory (obr. 57) se při procesu tavení projevoval daleko lépe než ve volném prostředí. Teplota pro natavení dávky klesla v závislosti na minimalizaci proudění vzduchu, které podněcovalo

zvýšení viskozity i povrchového napětí (vznik krusty na natavené dávce). Přechodová hodnota detekována zakulacením střepu nastala již při 950 °C. Při narušení povrchu pinzetou při 970 °C byl materiál již daleko tvárnější a připomínal svou konzistencí měkký želatinový rosol, či marmeláda. Naproti tomu při předešlému testování, popsaném výše, připomínal spíše tuhý med. Projevy skloviny odtažením nástroje po vpichu byly totožné jako v předešlém případě. Vlasová stopa ovšem vykazovala prodloužení o cca 150 mm). Pro tavení dávky skla v prostředí laboratorní komory byla upřednostněna jemná střepáž z důvodu eliminace bublinek a kompaktnosti materiálu v tuhém i kapalném stavu.



Obr. 57: Izolované laboratorní prostředí

Příprava komponentů pro testování v izolovaném prostředí

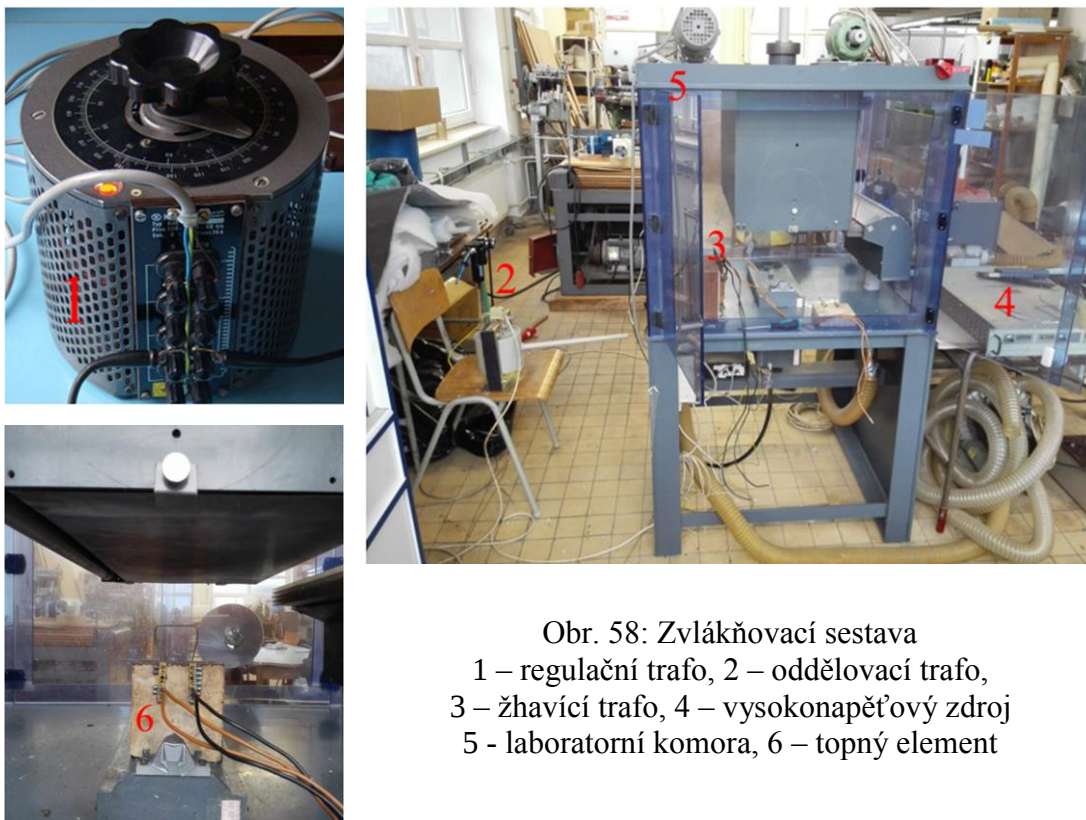
Izolované prostředí bylo zajištěno laboratorním boxem, tzv. „labem“, z plastového průhledného materiálu, dříve využívaného pro zvlákňování polymerních látek ve vysokém napětí. Komora obsahuje dva hlavní vstupy – přední a zadní dvířka, malé boční vstupy pro průchod textilního materiálu, odsávání, regulátor teploty a vestavěnou uzemněnou elektrodu. Při průchodu vysokého elektrického napětí dochází v prostorách „labu“ k bezkontaktnímu proudění ionizovaných částic, tzv. iontového větru, který ovlivňuje teplotní klima i hodnoty elektrického napětí. Vnitřní vybavení laboratorního boxu zahrnovalo transformátor (3 – 10) V připojeného pomocí katody na vysoké napětí, voltmetr a ampérmetr AVOMET II - METRA Blansko [57], deskový kolektor (anoda)

vestavěný ve stropní části boxu, nosný přípravek (cihla), odporový drát nebo páska pro natavení dávky skleněného preparátu, černá čtvrtka sloužící jako záchytný materiál pro vytvořená vlákna (obr. 58, 59, 60).

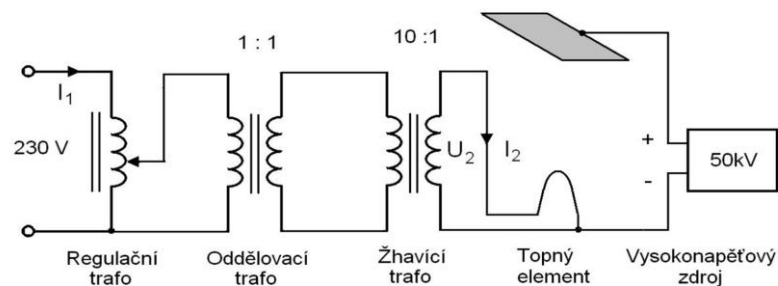
Iontový vítr

Iontový vítr neboli elektrický vítr (obr. 61) vzniká spojením elektrostatických sil s korónovými výboji nacházející se mezi katodou a anodou, tj. mezi elektrodou a kolektorem. Korónové výboje jsou hnány vzduchem (částičky prachu, bakterií, pylu, virů, kouře atd.) laboratorní komorou. Vytvoření korónového výboje (obr. 62) na špičkách i na ostrých hranách vodiče (vodičů) vystavěných vysokému elektrickému napětí výrazně snižuje hodnoty elektrické energie, tj. hodnoty proudu (viz grafy 5 -7). Proudové údaje korón pohybují mezi (10^{-6} - 10^{-5}) A. Projev korónového výboje lze popsat jako slabě světélkující záření viditelného spektra s maximálním akustickým projevem v podobě jemného šustění, sršení či šumění, [58]

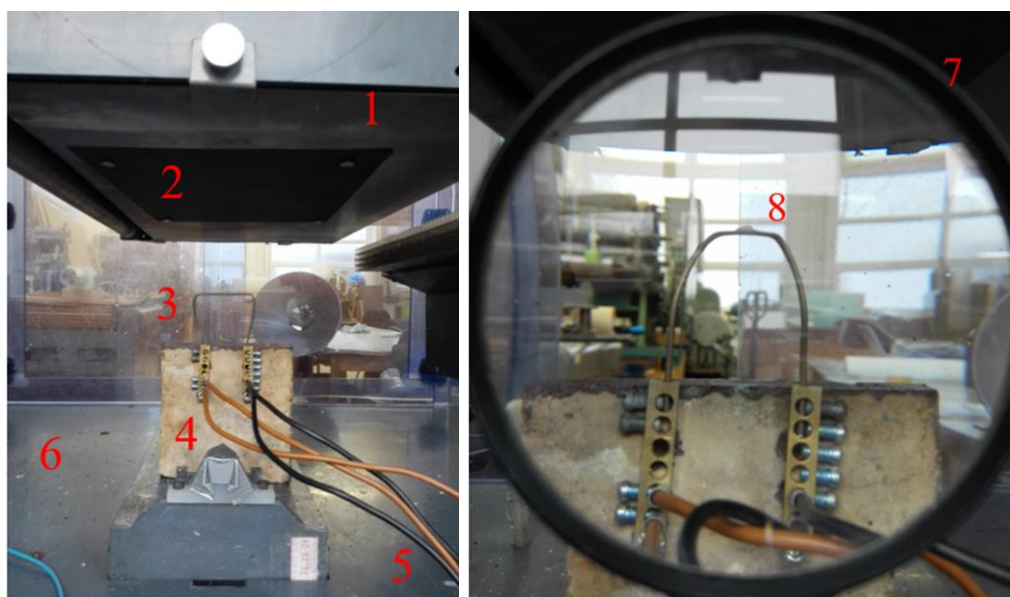
Problematiku těchto nežádoucích projevů (korón) řeší firma Elmarco u svých elektropsinnerů (defekt - opalování hran u plastových konstrukčních dílů), [59, 60].



Obr. 58: Zvlákňovací sestava
1 – regulační trafo, 2 – oddělovací trafo,
3 – žhavicí trafo, 4 – vysokonapěťový zdroj
5 - laboratorní komora, 6 – topný element

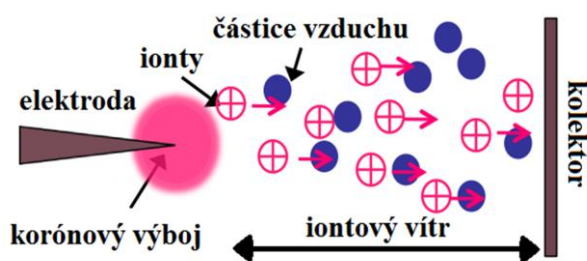


Obr. 59: Elektrické zapojení

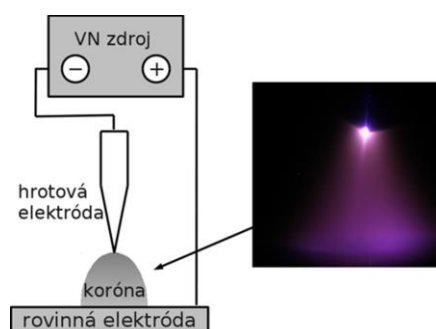


Obr. 60: Zvlákňovací sestava

1 – kolektor (anoda), 2 – záchytný materiál, 3 – odporový drát,
4 – cihla, 5 – vodiče, 6 – dno komory. 7 – lupa, 8 – skleněná dávka



Obr. 61: Schématické zobrazení vzniku iontového větru [61]



Obr. 62: Schématické zapojení a zobrazení nežádoucího korónového výboje [59]

4.6.2.1. Podmínky tavení skelného materiálu v izolovaném prostředí

Tavení skelného materiálu spočívá ve snaze o vytvoření adekvátní skloviny, tedy tekutiny o požadované viskozitě, povrchovém napětí i teplotě. Průběh testování probíhá ve třech fázích se třemi podobami tavného materiálu a se dvěma druhy odporového tavného média. Vzhledem k velké kapacitě pořízených datových záznamů (grafy, fotografie) je v této diplomové práci uveden pouze stručný výpis výsledků. Důležité poznatky z laboratorních testů, jako jsou např. projevy Taylorových kuželů, jsou v práci samostatně rozebrány.

Testovací fáze

- a) Zvýšení teploty odporového tělesa na hraniční hodnotu 1250°C se záznamem hodnot přeměny skla ve sklovinu
- b) Postupné zvyšování teploty odporového tělesa společně s vysokým napětím
- c) Zvýšení teploty odporového tělesa na teplotu přeměny tuhé látky v kapalnou (sklovinu) s rázovou aktivací vysokého napětí

Materiálové složení skla určeného k utavení (zvláknění) - Viz kapitola 4.2.

- a) Olovnaté sklo
- b) Sklářské vypalovací barvy
- c) Keramické vypalovací barvy

Výběr tavicího odporového média - Viz kapitola 4.4.

- a) Odporový drát
- b) Odporový pásek

4.6.2.2. Tabulkové záznamy pořízené při testování v izolovaném prostředí

Pro snazší přehlednost a orientaci v pořízených datech při testování bylo využito bodového výpisu informací ve formě tabulek. Tabulky obsahují určité aspekty, kterými jsou viskozita, povrchové napětí, teplota nebo projev Taylorových kuželů, díky nimž je lze mezi sebou porovnávat.

Zvýšení teploty odporového tělesa na hraniční hodnotu 1250°C se záznamem hodnot přeměny skla ve sklovinu

Tyto zkoušky byly provedeny v izolovaném prostředí bez působení vysokého napětí ve snaze porozumět procesu přeměny skla ve sklovinu (tab. 12).

Tabulka 12: Stručný popis základního testování v izolovaném prostředí

Odporové médium	Materiálové složení	Poznámky	Přechodové teploty [°C]
Kruhový průřez	Keramické bary	Projev doprovodných plynů	Cca 600 °C
		Rychlé odpaření dávky keramického prachu	Cca 850°C
		Bez sklovité hladiny	
	Sklářské vypalovací barvy	Nízká teplota nátavu	Cca 700°C
		Minimum doprovodných plynů	
		Dobrá sklovitá hladina bez obsahu bublinek	
		Dobré rozlití skloviny	
	Olovnaté sklo, jemná drť	Střední hodnota tavení	Cca 1000 °C
		Bez doprovodných plynů	
		Sklovitá hladina s vysokým obsahem bublinek	
		Nižší rozlití skloviny	
	Olovnaté sklo, střep	Vyšší hodnota tavení	1100 °C i více
		Bez doprovodných plynů	
		Hladina skloviny bez bublinek	
		Nižší rozlití skloviny	
Obdélníkový průřez	Keramické bary	Rychlé odpaření dávky keramického prachu	Cca 700 °C
		Projev doprovodných plynů	Cca 600°C
		Bez sklovité hladiny	
	Sklářské vypalovací barvy	Nízká teplota nátavu	Cca 600°C
		Minimum doprovodných plynů	
		Dobrá sklovitá hladina bez obsahu bublinek	
		Dobré rozlití skloviny	
	Olovnaté sklo, jemná drť	Střední hodnota tavení	Cca 9000 °C
		Bez doprovodných plynů	
		Sklovitá hladina s vysokým obsahem bublinek	
		Nižší rozlití skloviny	
	Olovnaté sklo, střep	Vyšší hodnota tavení	1000 °C
		Bez doprovodných plynů	
		Hladina skloviny bez bublinek	
		Nižší rozlití skloviny	

Postupné zvyšování teploty odporového tělesa společně s vysokým napětím

Při tomto procesu bylo nutné navyšovat hodnoty dodávaného proudu, vlivem působení vysokého napětí, které značně ovlivňuje tavící teplotu odporového média (tab. 13).

Sklářské vypalovací barvy se zde projevily jako jediný možný materiál, který byl schopen při teplotě 700 °C a 46 kV vysokého napětí vykazovat pozitivní změny (nižší viskozita, střední povrchové napětí, dobré rozlití skloviny, minimální obsah doprovodných plynů, slabý projev Taylorových kuželů).

Tabulka 13: Popis základního testování v izolovaném prostředí s doprovodným stoupáním vysokého napětí

Odporové médium	Materiálové složení	Poznámky	Přechodové teploty [°C]	Hodnoty vysokého napětí [kV]
Kruhový průřez	Keramické bary	Netestováno vzhledem k nežádoucím projevům		
	Sklářské vypalovací barvy	Nízká teplota nátavu	Cca 700°C	Do 46 kV
		Minimum doprovodných plynů		
		Dobrá sklovitá hladina bez obsahu bublinek		
		Dobré rozlití skloviny		
		Slabý projev Taylorových kuželů	2-3	
		Nízká hodnota viskozity	Měkký med	
		Dlouhý proces natavování způsobuje zapouzdření povrchu skloviny		
		Střední hodnota povrchového napětí		
	Olovnaté sklo, jemná drť	Střední hodnota tavení	Cca 1000 °C	Do 50 kV
		Bez doprovodných plynů		
		Sklovitá hladina s vysokým obsahem bublinek		
		Nižší rozlití skloviny		
		Bez projevu Taylorových kuželů		
		Střední hodnota viskozity		
		Vysoké povrchové napětí		
	Olovnaté sklo, střep	Vyšší hodnota tavení	1100 °C i více	Do 57 kV
		Bez doprovodných plynů		
		Hladina skloviny bez bublinek		
		Dobré rozlití skloviny		

Zvýšení teploty odporového tělesa na teplotu přeměny tuhé látky v kapalnou (sklovinu) s rázovou aktivací vysokého napětí

Testování probíhalo v postupném zvyšování teploty pro adekvátní natavení materiálu s následným sepnutím vysokého napětí o požadované hodnotě (tab. 14).

Tabulka 14: Popis základního testování v izolovaném prostředí s rázovou aktivací vysokého napětí

Odporové médium	Materiálové složení	Poznámky	Přechodové teploty [°C]	Hodnoty vysokého napětí [kV]
Kruhový průřez	Keramické bary	Netestováno vzhledem k nežádoucím projevům		
	Sklářské vypalovací barvy	Nízká teplota nátavu	Cca 700°C	Do 46 kV
		Minimum doprovodných plynů		
		Dobrá sklovitá hladina bez obsahu bublinek		
		Dobré rozlité skloviny		
		Nedochází ke stažení natavené skloviny		
		Dobrý projev Taylorových kuželů	3-7	
		Možnost projevu Taylor. kuželů vlivem úniku plynů (puchýře s kuželi)		
		Nízká hodnota viskozity	Měkký med	
		Nízká hodnota povrchového napětí		
	Olovnaté sklo, jemná drť	Střední hodnota tavení	Cca 1000 °C	Do 50 kV
		Bez doprovodných plynů		
		Sklovitá hladina s vysokým obsahem bublinek		
		Nižší rozlité skloviny		
		Bez projevu Taylorových kuželů		
		Střední hodnota viskozity		
		Vysoké povrchové napětí		
	Olovnaté sklo, střep	Vyšší hodnota tavení	1100 °C i více	Do 57 kV
		Bez doprovodných plynů		
		Hladina skloviny bez bublinek		
		Dobré rozlité skloviny		

4.6.2.3. Zhodnocení tabulkových záznamů

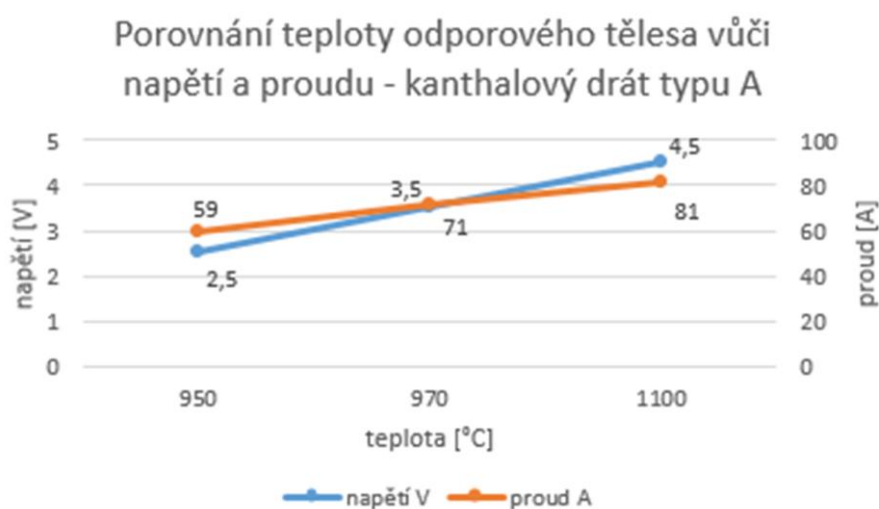
Informace nacházející se v tabulce 14, jasně vypovídají o nejlepších možných výsledcích dosažených v celém procesu testování (minimální teplota nátavu, dobré rozlité skloviny, maximální projev Taylorových kuželů). Testovací fáze s rázovou aktivací vysokého napětí obsahující produkt určený pro tavbu v podobě sklářské vypalovací barvy je jasnou volbou pro nadcházející podrobnější testování.

4.6.2.4. Grafické záznamy doprovázející testovací fáze

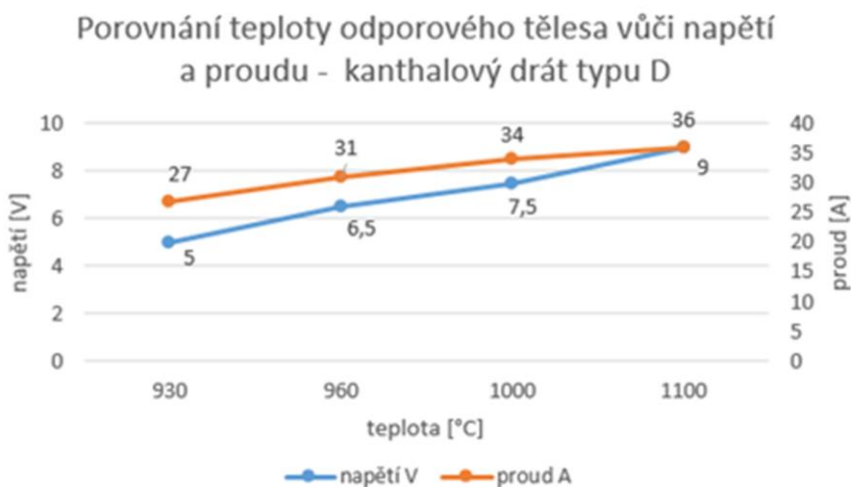
Grafický výpis dat (proud, napětí, teplota) umožňuje snazší porovnání záznamů rozdílných testovacích fází s ohledem na použité odporové médium (kanthal typu A a D).

Zvýšení teploty odporového tělesa na hraniční hodnotu 1250°C se záznamem hodnot přeměny skla ve sklovinu

Záznamy hodnot vyjádřených v grafech 3, 4 spadají do počátečního testování ve snaze porozumět samotnému procesu natavování (Pb drť, střep) odporovým médiem (drát, pásek). Porovnáním dat, viz tabulka 15 (napětí, proud, teplota) odporových prvků (typ A, typ D) lze říci, že vyhřátí kanthalu D na požadovanou teplotu 110 °C je snazší a rychlejší nežli u kanthalu A. Velikost natavové plochy, průřez materiálu i jeho měrný odpor nelze zanedbat.



Graf 3: Tavení Pb drtě a střepu



Graf 4: Tavení Pb drtě a střepu

Tabulka 15: Porovnání hodnot podle typu odporového média

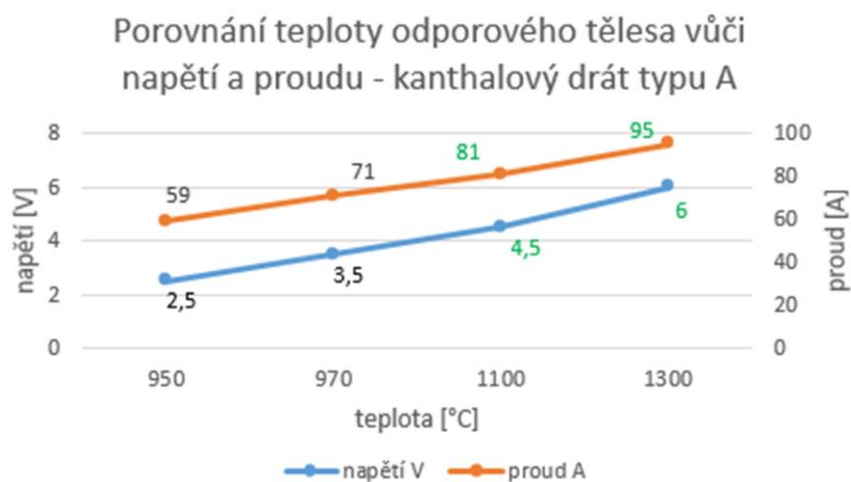
Typ média	Napětí [V]	Proud [A]	Teplota [°C]
Typ A	2,5 – 4,5	59 – 81	950 - 110
Typ D	5 - 9	27 - 36	930 – 110

Postupné zvyšování teploty odporového tělesa společně s vysokým napětím

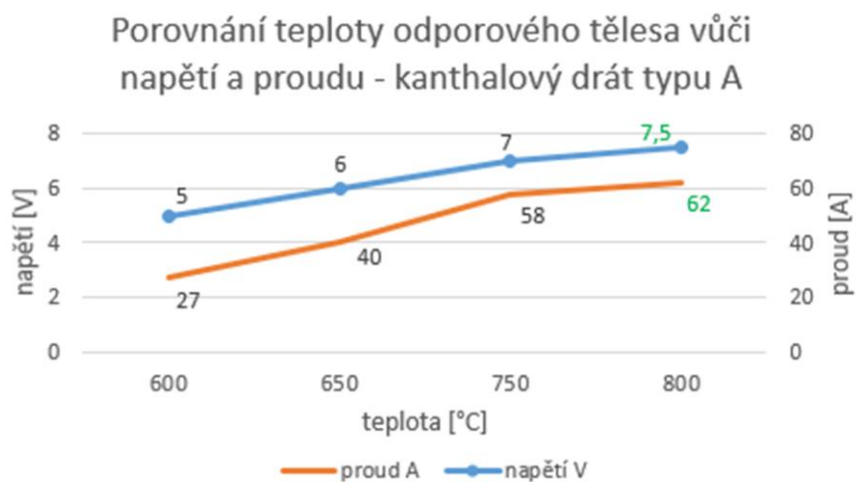
Tento postup natavování byl prováděn pouze experimentální metodou bez hodnotových záznamů (napětí, proud, teplota) vzhledem k orientačnímu stanovení určitých poměrů a reakcí celého zařízení i taveniny (projev vysokého napětí, poklesy teplot odporového média, kritické stavy odporového média., aj). Je nutné podotknout, že při uvedení vysokého napětí do provozu, docházelo k rapidnímu snížení proudových hodnot tudíž i teplot na odporovém médiu.

Zvýšení teploty odporového tělesa na teplotu přeměny tuhé látky v kapalnou (sklovinu), s rázovou aktivací vysokého napětí

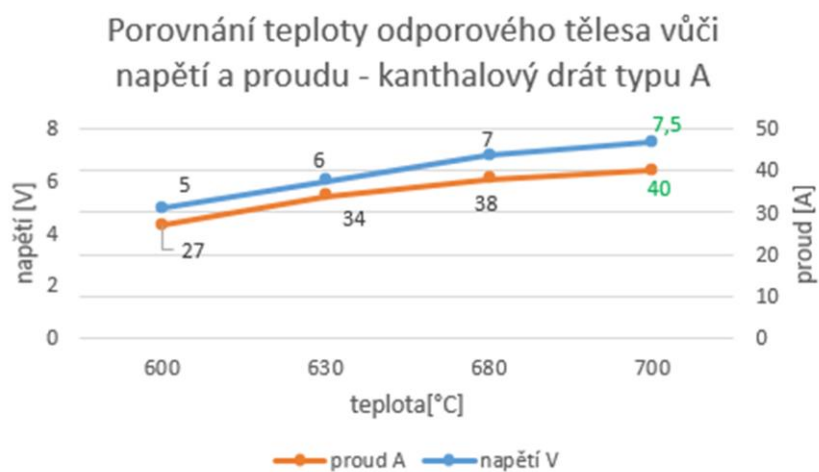
Hodnoty vyznačené zelenou barvou poukazují na změnu elektrického pole připojením vysokého napětí. Testování provedené na kanthalu typu D vykazovalo defekty při působení vysokého napětí (propálení materiálu v místě kolmém na jeho délku), proto zde není uvedeno.



Graf 5: Tavení Pb drtě a střepu



Graf 6: Tavení sklářské vypalovací barvy



Graf 7: Tavení keramické nízkotavné barvy

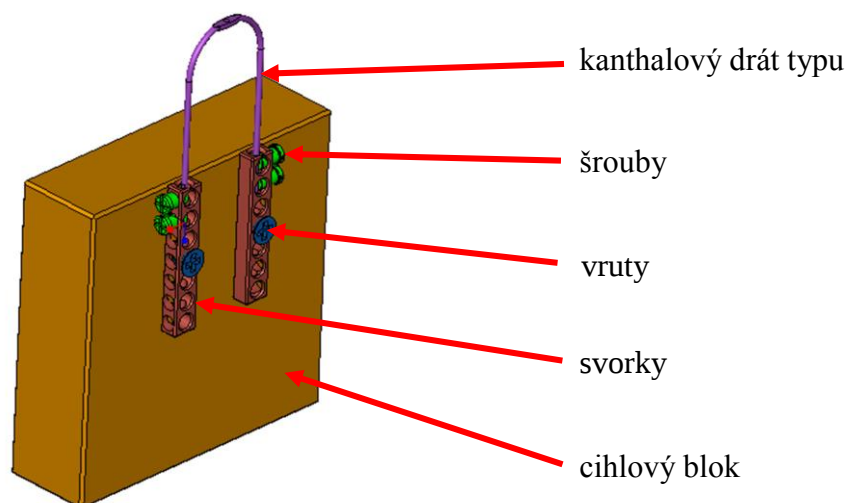
4.6.2.5. Zhodnocení grafických záznamů

Z grafických záznamů (graf 4) je patrné, že kanthalový drát typu D vykazuje daleko nižší hodnoty (proud, napětí, teplota) při natavení skleněného materiálu (Pb drť, střep), oproti kanthalu typu A (graf 3). Příčiny rozdílných hodnot testovaných odporových smyček, jasně poukazují na rozdíly stykových ploch (velikost, tvar) se sklem při jeho přeměně. Nelze opomenout zvýšené narušení vlákenné textury drátu A (úpravy profilu, styková plocha), které mohlo vést k narušení energetických toků.

Porovnáním dat věnovaných rázové aktivaci (grafy 5, 6, 7) vysokého napětí natavené skelné dávky (Pb drť, střep, sklářská vypalovací barva, keramická vypalovací barvy) s využitím odporového média typu A bylo zajímavější, klíčové. Bodový výpis projevů testovaných látek lze pak nalézt v tabulce 14: Popis základního testování v izolovaném prostředí s rázovou aktivací vysokého napětí. Na základě pořízených záznamů a dějů (proces tavby, nízká teplota tavení, nízká viskozita, nízké povrchové napětí, Taylorovi kužely) se sklářské vypalovací barvy osvědčily jako použitelné pro elektrostatické zvláknění, (graf 6).

5. Konstrukční řešení

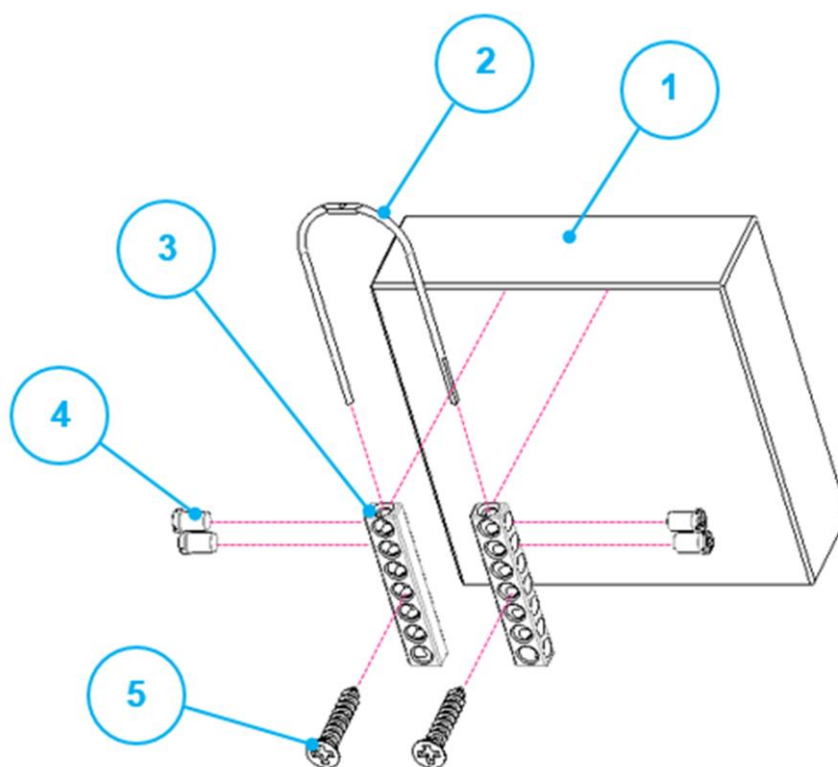
Konstrukční řešení pro primární výzkum (obr. 63 a 64, tab. 14) bylo sestaveno na základě informací pořízených v rámci prvotního testování (kapitola 4. Praktická část – testování). Podmínky určující tento výběr obsahovaly izolované prostředí, adekvátní teplotu (nátav skloviny 700 °C) a rázové spuštění vysokého napětí (46 kV).



Obr. 63: Prvky vyskytující se v konstrukčním řešení

Tabulka 16: Kusovník sestavy

ODK	OZNAČENÍ	POLOTOVAR	TYP SOUČÁSTI	MN.
	VÝKRES	MATERIÁL	POZNÁMKA	JED.
1	CIHLOVÝ BLOK	30x100x100		1
			ANAPET	KS
2	KANTHALOVÝ DRÁT	Ø2x160		1
			GES ELECTRONICS	KS
3	SVORKA	8x11x50		2
			GM ELECTRONIC	KS
4	ŠROUB		M5x10	4
			GM ELECTRONIC	KS
5	VRUT		M5x20, DIN 9048	2
			KOVOINOX	KS



Obr. 64: Výkresová dokumentace

6. Inovační záměry pro vytváření skleněných nití pomocí elektrostatického pole

Nástiny uvedených varianty se opírají nejen o poznatky ze sběru informací zaměřených na skleněné a polymerní filamenty, ale i o vlastní informace získané při testování.

Rozdělení variant zvláknění podle druhu emitoru

a) Jehlový emitor

- Varianta 1: Tažení filamentu pomocí žáruvzdorné výtlačnice zakončené kapilárním emitorem
- Varianta 2: Zvláknění pomocí sady kapilár

b) Plošný emitor

- Varianta 3: Tažení filamentů pomocí platinového roštu
- Varianta 4: Tažení skleněných vláken z volné hladiny

6.1.1. Varianta 1: Tažení filamentu pomocí žáruvzdorné výtlačnice zakončené kapilárním emitorem

Tažení skleněného vlákna pomocí žáruvzdorné výtlačnice částečně odpovídá technologii tažení skleněných tabulí zvanou Fourcault podle belgického inženýra Emila Fourcaulta, který tuto technologii uvedl již v roce 1919, [62].

Hlavní funkcí výtlačnice je nejen směřování toku skloviny do požadovaných míst, ale také chrání sklovinu proti chladnutí (obr. 65, 66). Díky vlastnostem žáruvzdorného, žárupevného materiálu celého tělesa, výtlačnice odolává koroznímu vlivu skloviny.



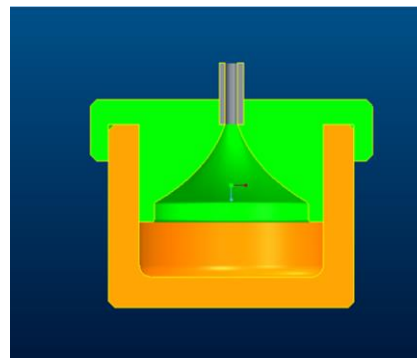
Obr. 65: Kruhová píčka s výtlačnicí ze žáruvzdorného a žárupevného materiálu

- a) boční pohled na píčku, b) sklopený pohled na píčku s kapilárním výstupem,
c) řez celou sestavou

Jednou z možných variant výtlačného tělesa je její vnitřní vyhřívání pomocí odporových těles regulujících viskozitu skloviny před výtokem z kapiláry. Použití kapiláry jako emitoru bylo navrženo v závislosti na předešlých kladných výsledcích elektrospinningu pro polymerní tekutiny.

Obr 66: Komponenty nacházející se v tomto modelu:

- Pícka z šamotového materiálu
- Speciálně profilovaná výtlačnice z žárupevného a žáruvzdorného materiálu
- Platinová kapilára



Možnosti přehřevu

Např. superkanthalové smyčky obepínající šamotovou pícku s teplotní rozpětím přehřevu se pohybují až do 1900 °C [63]. Dále je možné využít odporové dráty nacházející se uvnitř výtlačnice - kanthal typu A použitelný do 1200 °C.

Výhody varianty číslo 1

- Nízké náklady na materiál
- Minimální použití Pt, pouze pro výstupní kapilárku
- Tvarová variabilnost pro pícku i výtlačnici
- Jednoduchá výměna

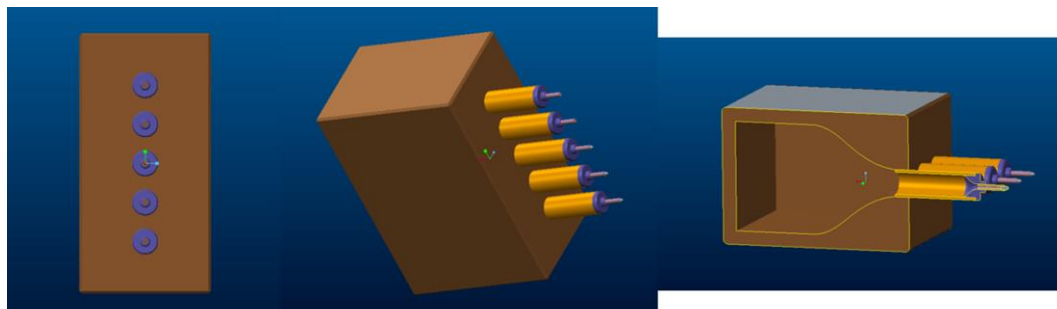
Nevýhody varianty číslo 1

- Výměna celé vrchní části (výtlačnice, Pt kapilárka)
- Nízká výrobní produktivita

6.1.2. Varianta 2: Zvlákňování pomocí sady kapilár

Tato varianta se shoduje v mnoha bodech elektrostatického zvlákňování polymerních tekutin, které již byly řešeny výzkumným týmem Technické Univerzity v Liberci (Fakulta textilní, Katedra netkaných textilií a nanovlákných materiálů) D. Lukáš, O. Jersák, F. Sanetrník a kol. Další inspirací pro sestavení zvlákňovacího kapilárního zařízení byla Firma 4spin vyrábějící rozmanité podoby zvlákňovacích emitorů E1, E5, E6, [35].

Z obrázku 67, lze rozpoznat soustavu lineárně vsazených kapilár s nástavci do pecního prostoru. Nástavec pro kapiláru umožňuje úpravu viskozity před jejím výstupem (chlazení, přehřev, zachování stejných podmínek jako v pecním prostoru). Modifikace pecního lože je úmyslně profilováno z důvodu zorientování toku skloviny (navádění, náhon).

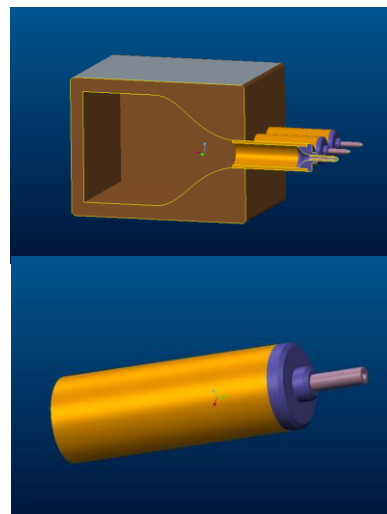


Obr. 67: Zvlákňování pomocí sady kapilár

- a) vrchní pohled na píčku s kapilárami, b) sklopený pohled na píčku s kapilárními výstupy, c) řez celou kapilární sestavou

Obr. 68: Komponenty nacházející se v tomto modelu

- Píčka z šamotového materiálu, profilovaná výtlačnice z žárupevného a žáruvzdorného materiálu
- Nástavce pro kapiláry, kov nebo žárupevný a žáruvzdorný materiál
- Profilované koncovky s náběhem z kovu nebo žárupevného a žáruvzdorného materiálu
- Platinová kapilára
- Dávky skloviny v podobě Taylorova kuželu



Možnosti přehřevu

Přehřevy lze řešit stejným způsobem, jako je tomu u varianty 1: Tažení filamentu pomocí žáruvzdorné výtlačnice zakončené kapilárním emitorem.

Výhody varianty 2

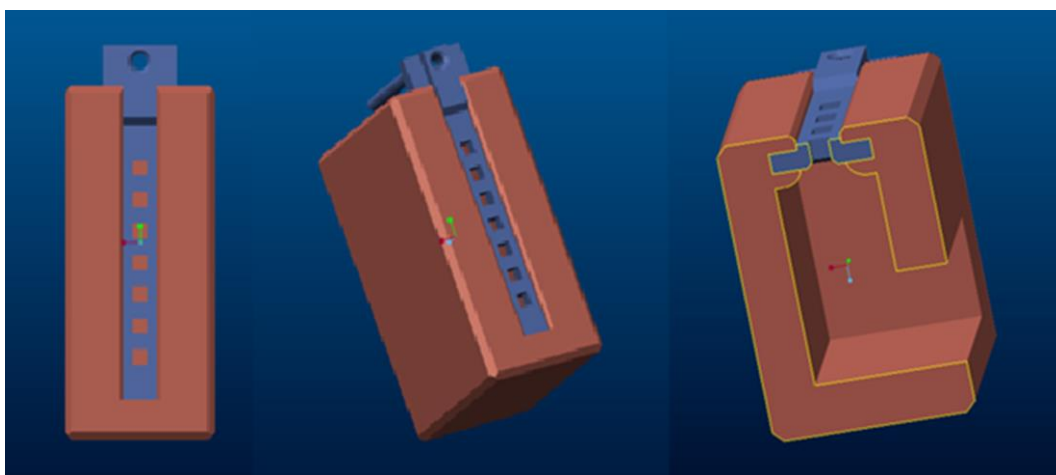
- Regulace teploty v nástavci (možnost přehřevu)
- Snadná výměna Pt kapilár i jiných komponentů
- Méně častá výměna Pt kapilár (větší délkový rozměr)
- Vyšší produktivita zařízení
- Vyšší variabilita náhradních dílů

Nevýhody varianty 2

- Střžení pořizovací náklady na celé zařízení
- Kontrola koroze kapilár z důvodu dostatečného napětí mezi elektrodami
- Vyšší procento vzniku korón

6.1.3. Varianta č. 3: Tažení filamentů pomocí platinového roštu

Zvlákňování prostřednictvím „platinového roštu“ viz obr. 69 i 70, spočívá modifikaci stávajícího zařízení využívající firmou SAINT-GOBAIN ADFORS CZ s.r.o. (bývalý Vertex) [8, 26], viz mechanické tažení ovšem opačným směrem (zdola nahoru oproti gravitačnímu). Nové řešení se zakládá na dvojím využití platinového roštu iniciujícím změny hodnot viskozity s povrchovým napětím. Výchřevnost platinového tělesa je proudově regulovatelná.

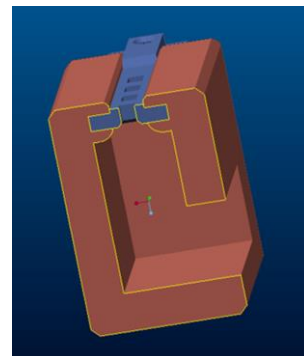


Obr. č. 69: Tažení filamentů pomocí platinového roštu

- a) vrchní pohled na píčku s Pt roštem, b) sklopený pohled na píčku s Pt roštem, c) řez celou sestavou

Obr. 70: Komponenty nacházející se v tomto modelu:

- Píčka z šamotového materiálu s profilovanou vtokovou částí
- Platinový rošt



Výhody varianty číslo 3

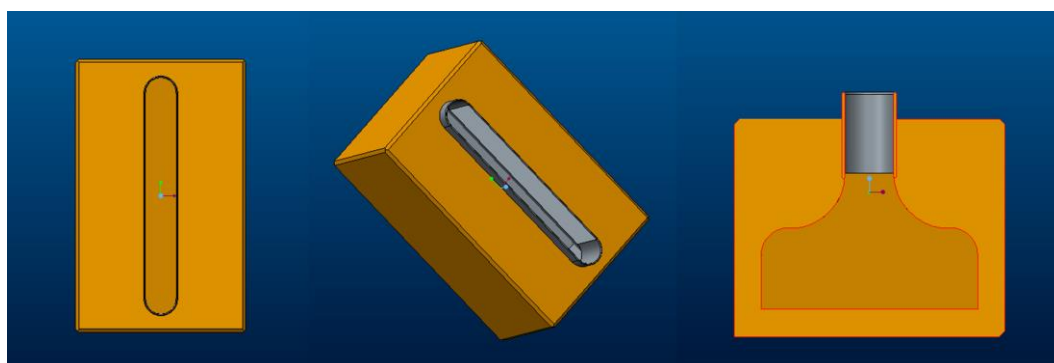
- Regulace viskozity
- Regulace povrchového napětí
- Zónová působení na sklovinu
- Snadná výměna roštu
- Vlastní vyhřívání nátokový prostor
- Tažení z hladiny

Nevýhody varianty číslo 3

- Cenová náročnost na Pt rošt
- Připojení Pt roštu k elektrickému obvodu

6.1.4. Varianta č. 4: Tažení skleněných vláken z volné hladiny

Principem řešení jsou skelná vlákna tvořící se na površích Taylorových kuželů vystupujících z volné hladiny (obr. 71, 72) roztavené skloviny iniciovaných elektrostatickým polem. Konstrukce pícky obsahuje modifikaci pecního lože tak, aby docházelo k adekvátnímu směřování toku skloviny ve směru zvláknování, včetně samotného dávkování do požadovaných prostor výtoku.



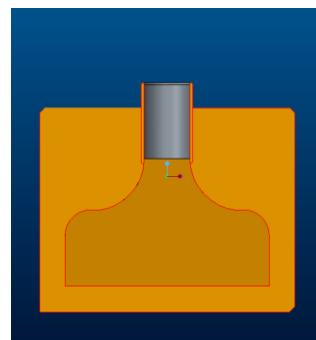
Obr. 71: Tažení skleněných vláken z volné hladiny

b) vrchní pohled na pícku, b) sklopený pohled na pícku, c) řez celou sestavou

Aktivační těleso (emitor) nabývá podoby výtokového opláštění nebo samostatného tělesa vyskytujícího se uvnitř pícky (oblast výtoku).

Obr. 72: Komponenty nacházející se v tomto modelu

- Pícka z šamotového materiálu s profilovanou vtokovou částí
- Platinové opláštění



Výhody varianty číslo 4

- Levný a snáze vyměnitelný žáruvzdorný, žárupevný materiál
- Snadné dávkování skloviny
- Rovnoměrné dávkování skloviny s mírným tlakem
- Cirkulace skloviny
- Vyšší tvorba Taylorových kuželů vlivem bezbariérových částí (volná hladina)

Nevýhody varianty číslo 4

- Nižší teploty skloviny na výtoku
- Snížená regulace viskozity (oblast výtoku)
- Minimální vliv na úpravu povrchového napětí (oblast výtoku)

6.2. Zhodnocení inovačních záměrů

Výsledné zhodnocení inovačních záměrů bylo sestaveno na základě jednoduchého bodového výpisu, viz tabulka 17. První místo obdržela varianta číslo 3 s 29 body, ostatní varianty pak měly jednotné hodnocení, a to 25 bodů.

Tažení filamentů pomocí platinového roštu obsahuje maximální hodnoty hlavních kritérií, tj. možnosti teplotní regulace ovlivňující viskozitní tok skelného materiálu (skloviny) a vysoký počet vznikajících Taylorových kuželů doprovázející vysoké hodnoty produktivity vláken.

Tabulka 17: Srovnávací tabulka variant zvlákňování

Požadavky	Varianty zvlákňování				
	Váhový ukazatel	Výtlačnice zakončená kapilárním emitorem	Zvlákňování pomocí sady kapilár	Platinový rošt	Volná hladina
Regulace viskozity	5	●	●	●	
Bez regulace viskozity	1				●
Nízký počet Taylor. kuželů	1	●			
Střední počet Taylor. kuželů	3		●		
Vysoký počet Taylor. kuželů	5			●	●
Regulace teploty	5	●	●	●	
Bez regulace teploty	3				●
Nízká produktivita vlákna	1	●			
Střední produktivita vlákna	3		●		
Vysoká produktivita vlákna	5			●	●
Střední zástavbové prostory	3	●	●	●	●
Nízké náklady na výměnu komponentů	5	●		●	●
Střední náklady na výměnu komponentů	3		●		
Nízké pořizovací náklady	5	●			
Střední pořizovací náklady	3		●		●
Vysoké pořizovací náklady	1			●	
Celkový součet bodů		25	25	29	25
Hodnocení		2	2	1	2

Závěr

Cílem diplomové práce bylo zjistit, zda lze vytvořit skleněné filamenty pomocí technologie elektrospinningu vzhledem ke shodujícím se aspektům s polymerním materiálem. Jelikož údaje o přesném chemickém složení skleněných testovacích vzorků nebylo výrobcí dodáno z důvodu výrobního tajemství, odstoupilo se od matematických výpočtů a přešlo se rovnou k experimentům.

Naplnění cílů diplomové práce

- Zmapování současného stavu zvláknovacích technologií v oblasti skla.

Úvodem diplomové práce bylo podrobné zmapování současného stavu zvláknujících technologií z oblasti sklářské výroby a to jak pro vlákna konečná (staple), tak nekonečná (rajón).

- Kritické zhodnocení stávajícího stavu procesu skelného zvláknění.

Zhodnocení stávajících zvláknujících technologií bylo provedeno bodovým výpisem vybraných kritérií (průměry vlákna, rozměrová stabilita vlákna, možnost zpracování vlákna, aj) s adekvátním váhovým hodnocením. Metoda mechanického zvláknění za pomoci platinovo – rhodiové pícky získala první místo (maximální počet kladných vlastností).

- Zmapování zvláknující technologie polymeru pomocí elektrostatické energie.

Podrobné zmapování elektrostatického procesu vytváření polymerních vláken bylo pro tuto práci klíčové z důvodu pochopení této technologie a využití získaných informací v oblasti skleněného zvláknění.

- Sestavení základních vlastností obou materiálů určujících jejich možnosti zvláknění pomocí elektrospinningu.

Hloubková studie vlastností obou materiálů (sklo – sklovina, polymer) vykazovala několik problémů v oblasti matematických výpočtů zaměřených na hodnoty viskozity a povrchového napětí. Jelikož je získání přesného chemického složení určitých látek (olovnaté sklo, keramické nízkotavné barvy, sklářské vypalovací barvy atd.) obtížné, veškeré zkoumání probíhalo experimentálně v laboratořích. Testy prokázaly, že natavená sklovina sklářské vypalovací barvy jako jediná prokázala schopnost zvláknění (nízká teplota tavení, nízká viskozita skloviny a povrchového napětí, tvorba Taylorových kuželů za použití vysokého napětí). Podrobným zkoumáním sběrného materiálu na černou čtvrtku pod mikroskopem nebyl po procesu tažení zjištěn žádný výskyt skleněných nití,

pouze tmavší lesklý flek o průměru 60 mm. Flek lze přisoudit mastným plynům vznikajícím při tavbě - vypařování sklářské vypalovací barvy.

- Návrh několika vlastních inovačních návrhů včetně návrhu pro stávající zvláknovací zařízení.

Inovační záměry (čtyři druhy variant) pro vytváření skleněných nití pomocí elektrostatického pole byly zpracovány na základě získaných informací z oblasti polymerního vlákenní či oblasti sklářství, tak i v průběhu experimentálního testování.

- Zhodnocení vlastních inovačních návrhů.

Ze všech testovaných variant byla vybrána varianta 3: Tažení filamentů pomocí platinového roštu, která byla vyhodnocena dle určitých předpokladů, kritérií jako nejefektivnější. Oblasti hodnocení primárně zahrnovaly možnosti teplotní regulace ovlivňující viskozitní tok skelného materiálu a vysoký počet vznikajících Taylorových kuželů doprovázející vysoké hodnoty vlákenné produktivity.

- Konstrukční realizace vybrané varianty inovovaného návrhu.

Vzhledem k tomu, že veškeré testování probíhalo v prvotní fázi celého výzkumu, tj. na základní úrovni, realizace konstrukčního řešení spočívala v sestavení experimentálního zařízení (kap. 5. Konstrukční řešení). Testovací zařízení bylo používáno při nátažových zkouškách a postupně vylepšováno do stávající podoby. Cihlový blok mající funkci základny obsahuje jeden pár vrutů fixující upínací svorky ke své ploše. Šrouby ve svorkách přidržují odporové médium (tvarovaná kanthalová smyčka kruhového průřezu) ve vertikální poloze a propojují ho s vodiči pro průchod elektrického proudu pro zahřívání a natavení dávky skleněného preparátu.

- Technicko – ekonomické zhodnocení realizované varianty.

Technicko – ekonomické zhodnocení vybrané varianty, tj. varianty 3, nebylo možné v rámci této diplomové práce provést, jelikož se základní výzkum opíral pouze o důkazy možnosti zvláknění skelného materiálu za působení elektrostatické energie.

Pohled do budoucnosti skelného zvláknění pomocí elektrospinningu.

Vyřešením problémů spjatých s hodnotami viskozity a povrchového napětí, elektrostatické zvláknění by bylo převratným objevem ve sklářském odvětví. Vysoká produktivita filamentů v řádu nano by měla své využití nejen ve sklářském průmyslu, textilním, ale i automobilovém či šperkařském. Skloviny s příměsí barevných pigmentů

nebo kovových částic určené pro zvláknění by v konečné podobě nano vytvářely designové a optické efekty.

Seznam použité literatury a podkladů

- [1] Balsamaria [online], [cit 2. 3. 2016] <<https://traveltoeat.com/egyptian-and-persian-glass-getty-villa-pacific-palisades-california/>>
- [2] Benátské sklo[online], [cit 2. 3. 2016] <<http://www.zemesveta.cz/archiv/rocnik-2007/benatky-10-2007/521-3/benatske-sklo/>>
- [3] Benátské číše [online], [cit 2. 3. 2016] <http://museovetro.visitmuve.it/it/il-museo/percorsi-e-collezioni/vetro-xix-secolo/>
- [4] Playee A. A: Improvement in treating slafi, US103650 A, 31. květen 1870 (patent)
- [5] Elbers A. D.: Improvement in processes of disintegrating molten scoriaceous substances, US180470 A, 1. srpen 1876 (patent)
- [6] Hammesfahr H. [online],[cit 2. 3. 2016] <https://en.wikipedia.org/wiki/Hermann_Hammesfahr/>
- [7] A Glass Dress [online], [cit 2. 3. 2016], <<http://onthisdayinfashion.com/?p=3348/>>
- [8] Sant Gobain [online], [cit 2. 3. 2016], <http://www.saint-gobain.cz/>
- [9] Stafford E., Harford Ch. G.: Method for spinning glass, US2156 A, 2. květen 1939 (patent)
- [10] Stalego Ch. J.: Method and apparatus for forming and processing continuous filaments, US3357807 A, 12. prosinec 1967 (patent)
- [11] Stalego Ch. J: Method and apparatus for forming glass fibers, US2569699 A, 2. říjen 1951 (patent)
- [12] Rajón [online], [cit 13. 5. 2016], <<http://www.labara.cz/skelne-tkaniny/>>
- [13] Staple [online], [cit 13. 5. 2016], <<http://www.kostkamodelcentrum.cz/obchod.aspx?kategorie=337&polozka=6459&stranka=0&polozek=288/>>
- [14] Rohože, Altima Bohemia, s.r.o. [online], [cit 2. 12. 2015] <<http://www.altimaboheemia.cz/rohoze-ze-sekanych-vlaken.html/>>
- [15] Skleněný roving [online], [cit 2. 12. 2015], <<http://bonego.cz/cs/vyrobky/skleneny-roving/>>
- [16] Skelné tkaniny [online], [cit 13. 5. 2016], <<http://www.wallmocz.cz/?page=nabidka/>>

- [17] Skelná vata [online], [cit 13. 5. 2016], <<http://www.edb.cz/firma-87899-raymond-group-vsetin/>>
- [18] Technofieber, splétané struktury [online], [cit 2. 12. 2015] <<http://www.technofiber.cz/technologie.cz.html/>>
- [19] Skelné tkaniny, Altima Bohemia, s.r.o. [online], [cit 2. 12. 2015] <<http://www.altimaboheemia.cz/rohoze-ze-sekanych-vlaken.html/>>
- [20] Skleněné mikrokuličky [online], [cit 2. 12. 2015] <<http://himfarm.all.biz/cs/sklenene-mikrokulicky-g2017450/>>
- [21] Skleněný granulát [online], [cit 13. 12. 2015] <<http://www.alumetal-technik.com/cz/produkty-granulat-szklany.php/>>
- [22] Russell R. G.: Method and apparatus for producing filaments by centrifugal forces, US3644108 A, 22. únor 1972 (patent)
- [23] Stalego Ch. J.: Method and apparatus for forming and processing continuous filaments, US3357807 A, 12. prosinec 1967 (patent)
- [24] Burgman J. A., Margason L. L.: Method and apparatus for forming hollow glass fibers, US3268313 A, 23. srpen 1966 (patent)
- [25] Burgman J. A., Margason L. L.: Method and apparatus for producing an intermittently hollow glass filament, US3421873, 14. leden 1969 (patent)
- [26] Skelná vlákna, mříže [online], [cit 2. 3. 2016], <<http://www.prumysl.cz/v-litomysli-se-vyrabi-mriz-ze-skelnych-vlaken-pro-zpevneni-asfaltu/>>
- [27] Skelná vata [online], [cit 13. 5. 2016], <http://www.knaufinsulation.cz/skelnava/supafil_loft_045/>
- [28] Isover Domo [online], [cit 13. 5. 2016], <<http://www.stavbaonline.cz/isover-domo.html/>>
- [29] Formhals A.: Process and apparatus for preparing artificial threads, US 1975504 A, 2. říjen 1934 (patent)
- [30] Fyzikální principy tvorby nanovláken, 1. Úvod [online], [cit 10. 5. 2016], <https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/125/course/section/100/1_%C3%9Avod_cz.pdf/>
- [31] Fyzikální principy tvorby nanovláken, 2. Historie [online], [cit 10. 5. 2016], <https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/125/course/section/101/2_Historie%20cz.pdf/>

- [32] Jirsák O., Sanetník F., Lukáš D. a kol.: A method Of nanofiberes production from a polymer solution using electrostatic spinning and a device for carrying out the method, WO2005024101, 17. 03. 2005 (patent)
- [33] Elektrostatické zvlákňování [online], [cit 2. 3. 2016], <http://organonet.med.muni.cz/media/62508/vy_02.pdf>
- [34] Elmarco [online], [cit 1. 1. 2016], <<http://www.elmarco.cz/>>
- [35] 4spin [online], [cit 13. 9. 2015], <www.4spin.info/>
- [36] Růžicková J.: Elektrostatické zvlákňování nanovláken. 1. vydání. Liberec 2004. Technická univerzita v Liberci. 4 s. ISBN 80-7083-867-1
- [37] Rutledge G. C., Warner S. B.: Electrostatic Spinning and Properties of Ultrafine fibers. [online], [cit. 2015-03-01], <<http://www.ntcresearch.org/pdfs/rpts/AnRp02/M01-MD22-A2.pdf>>
- [38] Coaxial Electrospraying, Compound Taylor [online], [cit. 7. 5. 2012], <<http://www.yflow.com/?q=node/3/>>
- [39] Stanovení viskozity roztoků –teoretická část, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze [online], [cit. 23. 4. 2012], <<http://www.vscht.cz/>>
- [40] Stanovení viskozity roztoku [online], [cit 11. 10. 2015], <http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_stanoveni_viskozity_roztoku/teorie.htm>
- [41] Klebsa V., Hotař V.: Silikáty, sklo, žáruvzdorné materiály, Technická univerzita v Liberci, 55-044-05, Liberec 2005
- [42] Sklo, keramika, tvrdé materiály [online], [cit 11. 10. 2015], <<http://www.slideshare.net/kchtul/sklo-keramika-tvrde-materialy/>>]
- [43] Tichý V.: Viskozita závislá na teplotě a druhu skla, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 47s. Vedoucí bakalářské práce Ing. E. Novotná, Ph.D., Paed IGIP
- [44] Špaček J, Pešek K.: Zdobení a zušlechťování skla v huti. SNTL Praha 1971
- [45] Bohuslav M.: Tepelné vlastnosti skel, SNTL Praha 1968
- [46] Výroba chemických vláken I [online], [cit 3. 1. 2016], <http://www.kmi.tul.cz/studijni_materialy/data/2013-10-04/08-12-33.pdf>
- [47] FyzWeb [online], [cit 11. 4. 2016], <<http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=144/>>
- [48] Povrchové napětí [cit 11. 4. 2016], <<http://hgf10.vsb.cz/546/Flotace/webove%20stranky/priklady.htm/>>

- [49] Povrchové napětí [cit 11. 4. 2016],
<<http://www.converter.cz/tabulky/povrchove-napeti.htm/>>
- [50] Laboratorní cvičení 2 [cit 20. 2. 2016],
<http://www.ksr.tul.cz/ksr/podklady/TS_FS_B_Laboratore2.pdf/>
- [51] Technologické disciplíny, Vlastnosti materiálů [online],[cit 12. 10. 2015]
<<http://ads.fmk.utb.cz/Contexts/atelier/Documents/Vlastnosti%20materi%C3%A1l%C5%AF.pdf/>>
- [52] Technologie výroby skla 1 [online], [cit 2. 3. 2016],
<<http://ads.fmk.utb.cz/Contexts/atelier/Documents/Technologie%20v%C3%BDrby%20skla%201.pdf/>>
- [53] Kanthalový dtát typu A [online], [ci 5. 3. 2016], <www.ges.praha@ges.cz>
- [54] Kanthalový dtát typu D [online], [ci 5. 3. 2016], <www.obchod@nedeta.cz>
- [55] Optický pyrometr http [online], [ci 5. 3. 2016],
<www.technotrend.cz/stranky/teorie/teorie3.htm/>
- [56] Termokamera Infra Tec GmbH [online], [ci 5. 3. 2016],
<<http://www.termokamera-infratec.cz/chlazene-termokamery/>>
- [57] Avometr II [online], [ci 5. 3. 2016], <<http://www.else.sk/sk/content/56-du10-avomet-ii/>>
- [58] Iontový vítr, korony [online], [ci 14. 3. 2016], <<http://crystall-air.com/koronovy-vyboj-a-iontovy-vitr/>>
- [59] Výboje, koróny [online], [ci 14. 3. 2016],
<http://www.aldebaran.cz/bulletin/2012_22_pla.php/>
- [60] Regulační trafo [online], [ci 14. 3. 2016],
<<http://user.unob.cz/zaplatilek/ZEL/Tema15.htm/>>
- [61] Iontový vítr [online], [ci 13. 3. 2016],
<http://www3.nd.edu/~sst/research/research_electrohydrodynamics.html/>
- [62] Fourcault [online], [cit 7. 10. 2015],
<<http://www.glassrevue.cz/news.asp@nid=2976&cid=6.html/>>
- [63] Superkanthalové pece [online], [cit 10. 4. 2016],
<<http://referaty.atlas.sk/prirodne-vedy/fyzika-a-astronomia/6079/?print=1/>>

Seznam příloh

Příloha 1: Tabulky

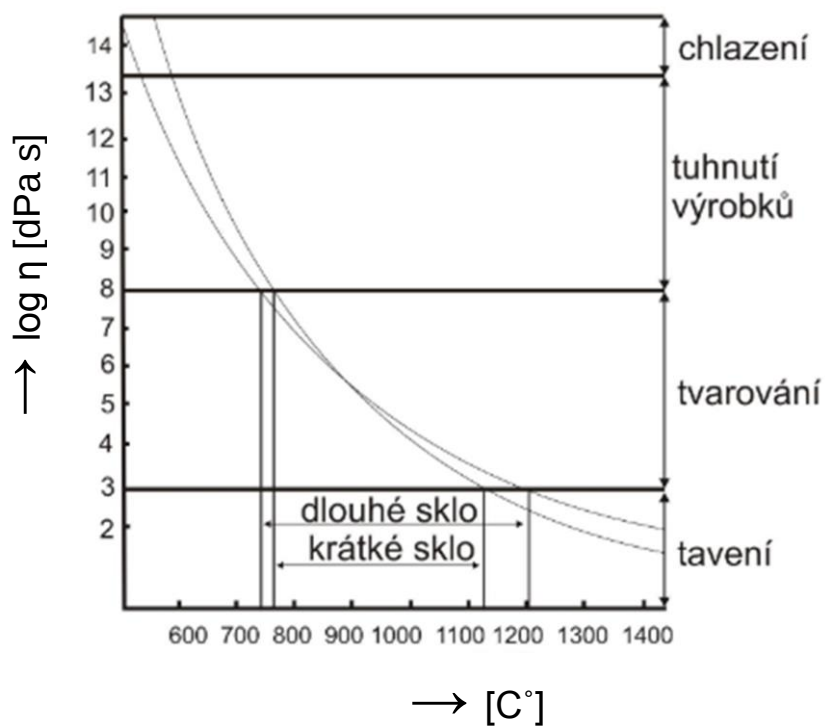
Příloha 2: Obrázky

Příloha 1: Tabulky

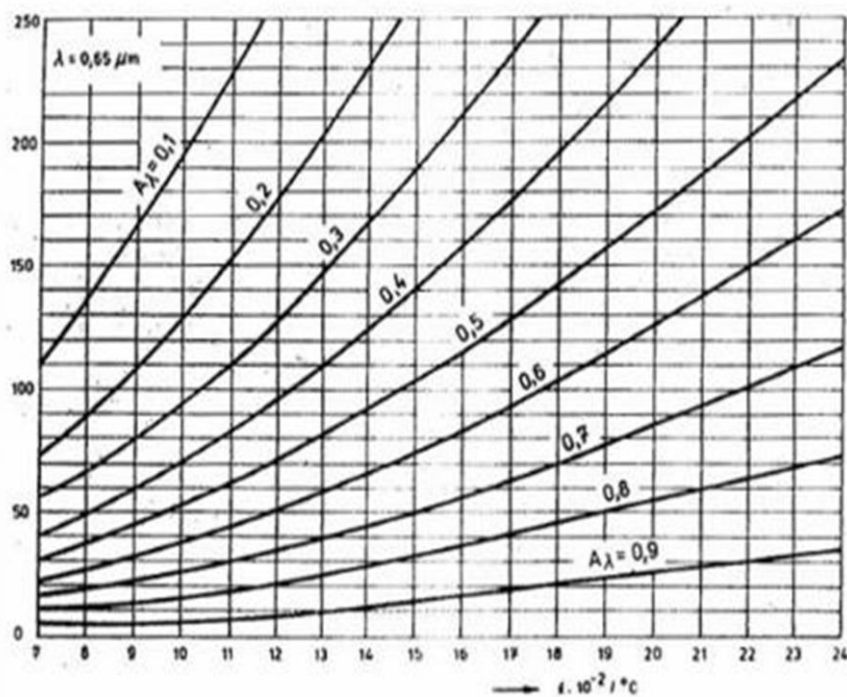
Tabulka 1.: Dělení skleněného materiálu v oblasti jeho využití

Oblast využití, průmysl, odvětví	Základní podoba materiálu	Konečná podoba materiálu (výrobky)	Oblast využití, průmysl, odvětví	Základní podoba materiálu	Konečná podoba materiálu (výrobky)
Stavební průmysl	Vláknité	Vaty Tkaniny Rohože Rovingy Biaxiální, multiaxiální tkaniny	Dekoratívní sklo, umělecké	Vlákná	Vlákná Tapety
				Tabulové	Obkladová skla
				Kusový materiál	Sochy Busty Tavenice Figurky Bižuterní
	Tabulové	Izolační Bezpečnostní Protipožární Antibakteriál Obkladové Absorpční	Užitkové	Běžné	Domácenské Nápojové
				Speciální	Varné
Potravinářský průmysl	Vlákná	Filtry Tkaniny Rohože	Technický průmysl	Vlákná Kusový materiál Vaty	Osvětlovací Laboratorní Průmyslové armatury Optická
	Obalové	Lahvové			
Farmaceutický průmysl	Vlákná Kusový materiál Vaty	Lahvové Laboratorní Pomocné náčiní Filtry	Automobilový průmysl	Tabulové	Antibakteriál Absorbční Bezpečnostní

Příloha 2: Obrázky



Obr. 23: Graf pro krátká a dlouhá skla závislá na viskozitě [44]



Obr. 42: Graf pyrometrických korekcí