

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

VLIV PODMÍNEK VSTŘIKOVÁNÍ
NA VLASTNOSTI VÝSTŘIKŮ Z TERMOPLASTŮ

Kandidátská disertační práce

Ing. Josef K r e b s

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci
fakulta strojní
katedra materiálů a tváření

UNIVERZITNÍ KNHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146114473

VLIV PODMÍNEK VSTŘIKOVÁNÍ

NA VLASTNOSTI VÝSTŘIKŮ Z TERMOPLASTŮ

Kandidátská disertační práce

Autorské právo se řídí směnicemi MŠK pro státní
závěrečné zkoušky č. j. 31 787 62-III/2 ze dne
13. července 1962. Vestník MŠK, část 24 ze dne
31. 8. 1962 § 19 autorského zákona č. 115/53 Sb.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5

Aspirant : Ing. Josef Krebs

Školitel : Doc. Ing. Miroslav Kořínek CSc.

V Liberci v dubnu 1967

u 37 S

Fyzikálně mechanické vlastnosti výstřiků z lineárního polyetylénu jsou závislé na podmínkách vstřikování a na tvaru vlastního výstřiku. Vlastnosti jsou ovlivněny jednak anizotropií, jednak nehomogenitou výstřiku. Anizotropie je důsledkem orientace molekul během vyplňování dutiny vstřikovací formy, nehomogenita má příčinu v nestejných technologických podmínkách v různých místech dutiny.

Přesné určení vlivu jednotlivých technologických faktorů, jako je vstřikovací teplota, vstřikovací tlak aj., na vlastnosti výstřiku je ztíženo tím, že faktory jsou závislé navzájem a změnou jednoho se mění současně i hodnota druhého.

K docílení maximálně stejnorodých výstřiků je nutné volit jejich tloušťku co největší a vstřikovací teplotu co nejvyšší. Stejně i teplota vstřikovací formy má být co nejvyšší. Příznivě se uplatňuje i velký průřez ústí vtoku.

K hodnocení vlastností finálních výstřiků je vhodná pevnost ve stříhu, která je přesnější než stanovení horní meze kluzu. Metoda umožňuje měřit také homogenitu výstřiku. Dobrou reprodukovatelností se vyznačovalo i stanovení hustoty a měření tvrdosti. Naproti tomu spolehlivé hodnocení stupně orientace molekul zůstává otevřeným problémem,

Mezi pevností ve stříhu a horní mezí kluzu a podobně mezi pevností ve stříhu a tvrdostí existuje přímá závislost. Proto na základě znalosti hodnot jedné vlastnosti je možno odhadnout hodnotu druhé.

Poděkování

Je mou milou povinností poděkovat Doc. Ing. Miroslavu Kořínkovi CSc za metodické vedení práce, za cenné připomínky k vlastnímu obsahu a za příznivé podmínky k experimentální práci. Zároveň děkuji Dr. Ing. Dietrichu Northmannovi z Technické university v Drážďanech za přátelské konsultace, které se uskutečnily na základě spolupráce mezi Institutem pro technologii zpracování dřeva a plastických hmot na Technické universitě v Drážďanech a strojní fakultou Vysoké školy strojní a textilní v Liberci.

Děk patří také Ing. Kovaříkovi CSc z Výzkumného ústavu gumárenské a plastikařské technologie v Gottwaldově a Ing. Vláčilovi z n.p. Plastimat v Liberci, kteří mi umožnili provést technologické zkoušky na svých pracovištích. Za připomínky týkající se technického názvosloví z oboru zpracování plastických hmot děkuji s. J. Fajglovi z n.p. Plastimat v Liberci, za korekturu rukopisu upřímně děkuji své manželce.

Většinu experimentálních prací provedli posluchači naší vysoké školy, fotografie zhotovila s. H. Peřtová, obrázky kreslil s. J. Pozner, čistopis napsala s. M. Šimková. Také jin touto cestou děkuji.

Ing. Josef Krebs

Ich erfülle meine liebe Pflicht, Herrn Doz. Ing. Miroslav Kořinek CSc für die methodische Leitung sowie für die wertvollen Ratschläge zu eigentlichem Inhalt meiner Arbeit und für die zur experimentellen Arbeit nötigst günstigen Bedingungen zu danken. Denselben Dank bin ich verpflichtet Herrn Dr.-Ing. Dietrich Northmann von der Technischen Universität in Dresden, der mir durch freundliche Konsultationen, die auf Grund der Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Holz- und Plastechnik an der TU Dresden und der Technischen Hochschule für Maschinenbau und Textilwesen in Liberec zustande gekommen sind, behilflich gewesen ist.

Ich äussere weiterhin meinen innigen Dank Herrn Ing. Kovářík CSc vom Forschungsinstitut für Gummi- und Plastechnologie in Gottwaldov und Herrn Ing. Vlášil vom VEB Plastimat in Liberec. Beide haben mir ermöglicht, technologische Prüfungen an ihren Arbeitsstätten zu verwirklichen.

Für die Bemerkungen, die die technische Nomenklatur aus dem Gebiete der Verarbeitungstechnologie der Plaste betreffen, einen recht schönen Dank Herrn J. Fajgl vom VEB Plastimat in Liberec. Für die Korrektur der Handschrift danke ich meiner lieben Frau.

Die meisten experimentellen Arbeiten wurden von den Hörern unserer Hochschule durchgeführt. Die Photosaufnahmen verfertigte H. Peřtová, Zeichnungen sind von J. Fozner, die Reinschrift dieser Arbeit verfertigte M. Šimková. Auch diesen Mitarbeitern danke ich recht herzlich.

Ing. Josef Krebs

Obsah

	str.
1. Úvod	9
2. Cíl práce	14
3. Přehled dosavadních poznatků a rozbor problému	15
3.1. Technologické faktory ovlivňující vlastnosti výstřiků	15
3.2. Plnění dutiny formy při vstřikování	17
3.3. Orientace molekul a její souvislost s mechanickými vlastnostmi výstřiků	19
3.4. Vliv různých faktorů na orientaci molekul a na vlastnosti výstřiků	22
3.4.1. Vliv vstřikovací hmoty na orientaci molekul a na vlastnosti výstřiků	22
3.4.1.1. Vliv viskozity taveniny	22
3.4.1.2. Vliv relaxace napětí	25
3.4.1.3. Vliv krystalizace	27
3.4.2. Vliv podmínek zpracování na orientaci molekul a na vlastnosti výstřiků	30
3.4.2.1. Vliv vstřikovací teploty	30
3.4.2.2. Vliv vstřikovacího tlaku	31
3.4.2.3. Vliv doby plnění dutiny	32
3.4.2.4. Vliv doby dotlačování	33
3.4.2.5. Vliv teploty vstřikovací formy	34
3.4.3. Vliv faktorů souvisejících s konstrukcí vstřikovací formy a funkcí vstřikovacího lisu na orientaci molekul a na vlastnosti výstřiků	34
3.4.3.1. Vliv tloušťky výstřiku	34
3.4.3.2. Vliv průřezu ústí vtoku	35
3.4.3.3. Vliv konstrukce vtokového kanálu	35

	str.
3.4.3.4. Vliv tvaru dutiny vstřikovací formy	36
3.4.4. Vliv přídatných prutů na vlastnosti výstřiku	36
3.5. Anizotropie a nestejnorodost výstřiku	37
3.6. Teoretické řešení vstřikovacího procesu	39
3.6.1. Ochlazování taveniny během doby plnění	40
3.6.2. Rozdělení vnitřního tlaku v dutině vstřikovací formy jednoduchého tvaru během procesu plnění	44
3.6.3. Pohyb molekul v dutině formy během toku	50
3.6.4. Závěry z teoretického řešení	51
3.7. Souhrn literárních a teoretických poznatků	52
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	57
4.1. Volba druhu plastické hmoty	57
4.2. Volba zkušební metody	58
4.3. Popis zvolených zkušebních metod	64
4.3.1. Horní mez kluzu a tažnost normalizovaných zkušebních těles	64
4.3.2. Horní mez kluzu a tažnost měřená na mikrotělesech	65
4.3.3. Mez pevnosti ve střihu	66
4.3.4. Měření tvrdosti kuličkou	68
4.3.5. Měření mikrotvrdosti	69
4.3.6. Stanovení hustoty	70
4.3.7. Penetrometrická měření	71
4.3.8. Rentgenografická měření	72
4.3.9. Měření délky a váhy	73
4.3.10. Stanovení fluidity	73
4.3.11. Měření smrštění za tepla	73
4.3.12. Smrštění výstřiků	73
4.4. Volba základních výstřiků a volba zkušebních těles	74

	str.
4.5. Způsob zhotovení zkušebních výstřiků s technologické podmínky při vstřikování	76
4.5.1. Zkušební těleso pro tahovou zkoušku	76
4.5.2. Kotouč o průměru 160 mm	81
4.5.3. Pravoúhlá deska 120x120x2 mm	83
4.5.4. Provozní výstřiky	84
4.6. Výsledky experimentálních měření	85
4.6.1. Výsledky měření na zkušebním tělese pro tahovou zkoušku	85
4.6.1.1. Zjištění vztahu mezi technologickými faktory	85
4.6.1.2. Závislost smřetení a rozměrů výstřiků na technologických faktorech	87
4.6.1.3. Závislost váhy a hustoty zkušebních těles na podmínkách vstřikování	91
4.6.1.4. Závislost horní meze kluzu a tažnosti na podmínkách vstřikování	94
4.6.1.5. Hodnocení homogenity zkušebních těles	97
4.6.1.6. Zhodnocení výsledků měření na tělesech pro tahovou zkoušku	101
4.6.2. Výsledky měření na kotoučích	103
4.6.2.1. Zjištění vztahu mezi technologickými faktory	103
4.6.2.2. Měření horní meze kluzu a meze pevnosti ve střihu na kotoučích	107
4.6.2.3. Vztah mezi horní mezí kluzu a mezí pevnosti ve střihu	112
4.6.2.4. Závislost horní meze kluzu na poloměru a úhlu odebrání mikrotělesa	113
4.6.2.5. Závislost tažnosti mikrotěles na poloměru a na úhlu odebrání tělesa	117
4.6.2.6. Zhodnocení výsledků měření na kotoučích	119
4.6.3. Výsledky měření na deskách 120x120x2 mm	121
4.6.3.1. Stanovení meze pevnosti ve střihu	121
4.6.3.2. Stanovení homogenity desek	124
4.6.3.3. Průběh plošného rozložení meze pevnosti ve střihu	125

	str.
4.6.3.4. Vztah mezi pevností ve stříhu a horní mezí kluzu	127
4.6.3.5. Měření tvrdosti	128
4.6.3.6. Závislost mezi tvrdostí a mezí pevnosti ve stříhu	130
4.6.3.7. Stanovení mikrotvrdosti, měření na penetrometru a určení hustoty	130
4.6.3.8. Zhodnocení výsledků měření na deskách	133
4.6.4. Výsledky měření na výrobcích z provozu	134
5. SOUHRN VÝSLEDKŮ A JEJICH VÝZNAM PRO PRAXI	136
6. PŘÍLOHY	147
7.1. Seznam symbolů	162
7.2. Seznam literatury a použitých preměn	166

1. ÚVOD

Termoplasty, podobně jako jiné druhy plastických hmot, jsou ve stále větší míře používány jako konstrukční materiály pro výrobu nejrůznějších technických předmětů. Plní tak úlohu jiných dříve používaných materiálů, například ocelí a kovových litin. K tomu, aby se mohly plastické hmoty uplatňovat ještě ve větším měřítku na součásti vystavené mechanickému namáhání, dosud není k dispozici dostatek technických podkladů o jejich vlastnostech.

Mezi kovy a plastickými hmotami je totiž důležitý rozdíl: Fyzikálně mechanické vlastnosti kovů, právě tak jako vliv různých technologií na změnu těchto vlastností, jsou konstruktérům dobře známy. Kovy jsou materiály poměrně stejnorodé. Naproti tomu nestejnorodost výrobků z plastických hmot je velkou překážkou při konstrukčních výpočtech. Rovněž vliv technologií na vlastnosti finálních výrobků není ve většině případů dostatečně objasněn.

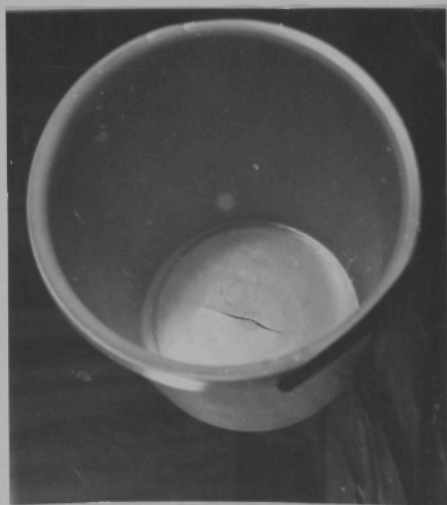
Vlastnosti výrobků z plastických hmot nezávisí totiž jenom na druhu hmoty a na tvaru předmětu, nýbrž také na technologickém režimu při zpracování. Druh technologie a technologické podmínky hrají tak důležitou úlohu proto, že ovlivňují velikost vnitřní nestejnorodosti a anizotropie výrobků. Tyto jevy vystupují do popředí hlavně u předmětů vyráběných vetřikováním.

Z těchto důvodů jsou pevnostní výpočty při konstrukci výrobků stále značně problematické, což může vést k selhání funkce výrobků v praxi. V mnohých případech dochází dokonce

i k samovolnému prasknutí výstřiků vlivem vnitřního pnutí. Přes řadu zkušeností není dosud možno takové případy poškození vyloučit. Na obr. 1 a 2 jsou výstřiky, které jsou vyráběny již po řadu let a přece se ve výrobním podniku čas od času objeví zmetky.



Obr.1. Uryvadlo se samovolnou prasklinou ve dně



Obr.2. Kbelík se stejnou vadou

Příčina nespolehlivosti konstrukčních výpočtů spočívá v tom, že plastické hmoty jsou velmi citlivé k podmínkám zpracování. Proto se mohou hodnoty vlastností jednoho výrobku velmi lišit od hodnot výrobku jiného, i když bylo v obou případech použito stejného druhu hmoty. Klasický příklad takové citlivosti ke zpracovatelským podmínkám je zřejmý z tab. 1, kde je uvedena mez pevnosti v tahu polyamidu-6 pro různé polotovary [38] :

Tab.1. Mez pevnosti v tahu různých polotovarů z polyamidu-6

Druh polotovaru	Mez pevnost ¹ v tahu [kp/cm ²]
Vytlačené pásy za sucha	650
Vytlačené pásy po kondicionaci na vzduchu	480
Pásy orientované, za sucha	3000
Pásy orientované, po kondicionaci na vzduchu	2000
Blokový polymér za sucha	750
Vlákna orientovaná, po kondicionaci na vzduchu	6000

Podobnou závislost je možno nalézt prakticky u všech druhů plastických hmot. Změny mechanických vlastností jsou však ovlivňovány nejen různými technologiemi, ale také měnicími se podmínkami zpracování u jedné technologie.

V poslední době byla provedena řada pokusů, které měly objasnit závislost vlastností zkušebních těles na technologických podmínkách. Pokusy byly prováděny s použitím normalizovaných zkušebních těles. Výsledky, takto získané, jsou sice velmi denné pro výrobce plastických hmot, avšak pro konstruk-

těry finálních výrobků je jejich použitelnost omezena. Tvar výrobku totiž přímo ovlivňuje technologické podmínky při zpracování, např. vstřikovací tlak, vstřikovací rychlost apod., a tím také nepřímo ovlivňuje i fyzikálněmechanické vlastnosti výrobku. Proto na základě hodnot vlastností, které byly stanoveny na normalizovaných zkušebních tělesech, je možno jen s určitým přiblížením usuzovat na vlastnosti konečného předmětu ze stejné hmoty.

Situace je navíc komplikována tím, že dosud není k dispozici objektivní metoda, která by umožňovala kvantitativní měření vlastností finálního výrobku. Výstřiky bývají většinou zkoušeny ze podmínek, které se blíží namáhání při praktických aplikacích. Např. Schmitt [45] popisuje následující zkušební postupy: Tři transportní bedny se složí na sebe a tento stoh musí snést po dobu tří hodin zatížení 800 kp aniž by došlo k vybočení. Síla 650 kp nesmí vyvolat po dobu sedmi dnů zhroucení stohu. K podobnému účelu jsou používány pádové zkoušky. Přepravka se naplní polyetylénovými lahvemi, které obsahují vodu s pískem, jejichž váha odpovídá váze naplněných skleněných lahví. Přepravky musí vydržet čtyřnásobný pád z výše tří metrů. Podobným způsobem se zkouší pevnost držadel atd.

Všechny tyto zkoušky založené vysloveně na empirickém základě, jsou pro praktické aplikace velmi cenné. Poskytují však buď jen pozitivní nebo negativní výsledek, to znamená, že zkoušený výrobek podmínky zkoušky buď vydrží nebo nevydrží. Z výsledků se dá jen nepřímo soudit na vhodnost technologických podmínek při zpracování. Ty jsou považovány za vyhovující, když zkoušku přečká určité množství zkoušených

výrobků, např. více než 50%. Takové metody umožňují jen ve velmi omezeném rozsahu kvantitativní vyhodnocení vlivu technologie na změnu vlastností finálního výrobku. Kromě toho nespolehlivost empirických zkoušek spočívá v tom, že zkušební podmínky nemusí odpovídat způsobu namáhání v praxi, kde potom může být výsledek zcela jiný.

Jak je zřejmé, v současné době existuje ještě mnoho nevyřešených problémů týkajících se vlastností výstřiků z termoplastů. Tato práce si vytkla za cíl přispět k objasnění alespoň některých z nich.

2. CÍL PRÁCE

Hlavní úkoly, které mají být v práci řešeny, je možno shrnout do následujících bodů :

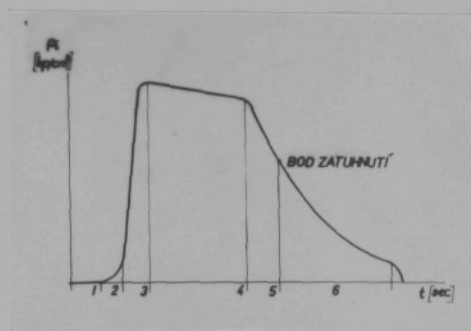
- 2.1. Na základě zvolených nebo vypracovaných zkušebních metod prověřit vliv různých technologických podmínek vstřikování na změnu vlastností výstřiků.
- 2.2. Zvláštní pozornost věnovat závislosti jednotlivých technologických parametrů vstřikování mezi sebou navzájem.
- 2.3. Při hodnocení fyzikálně mechanických vlastností výstřiků sledovat stejnorodost výrobků.
- 2.4. Stanovit vliv technologických podmínek zpracování na stejnorodost výstřiků a určit, kterými vlivy je tato ovlivňována.
- 2.5. Navrhnout nejvhodnější způsob hodnocení vlastností finálních výrobků.

3. PŘEHLED DOSAVALNÍCH POZNATKŮ A ROZBOR PROBLÉMU

3.1. Technologické faktory ovlivňující vlastnosti výstřiků

Princip vstřikování termoplastů je dostatečně znám. K dispozici však nejsou téměř žádné teoretické podklady, s jejichž pomocí by bylo možno předpovědět vlastnosti finálního výstřiku.

Northmann [34], Bernhardt [10] a jiní autoři uvádějí, že některé vlastnosti výstřiků jsou určovány termodynamickými veličinami, které přísluší polyméru v okamžiku zatuhnutí ústí vtoku. Typický průběh tlaku v dutině vstřikovací formy P_i v závislosti na čase je na obr. 3.



Obr.3. Závislost vnitřního tlaku P_i na vstřikovacím čase t

Nejdůležitější bod na křivce, bod zatuhnutí, odpovídá okamžiku, kdy tavenina hmoty zatuhne v ústí vtoku, takže dále nemůže do dutiny ani přitékat ani z ní vytékat. V bodě zatuhnutí přísluší tavenině určitá hodnota teploty, měrného tlaku a měrného objemu. Konečný objem polyméru v dutině vstřikovací formy je určen teplotou a tlakem taveniny v bodě zatuhnutí.

Poloha tohoto bodu na křivce není konstantní, ale závisí na technologických podmínkách: Hodnota tlaku v bodě zatuhnutí stoupá při zvyšující se vstřikovací teplotě, při zvyšujícím se vnějším vstřikovacím tlaku a při prodlužující se době dotlačování. Při stoupající teplotě vstřikovací formy naopak klesá.

Zvýšení tlaku v bodě zatuhnutí při konstantní teplotě v tomto bodě má za následek zvětšení váhy a rozměrů výstřiků a zmenšení jejich smrštění. Hustota výstřiků je tlakem a teplotou v bodě zatuhnutí ovlivňována jen nepatrně.

Rozměry a váha výstřiků jsou tedy určovány veličinami stavové rovnice. Mechanické vlastnosti výstřiků jsou však závislé na jiných vlivech.

Podle Orthmanna [36] je hodnota vlastnosti výstřiku obsahujícího vnitřní prnutí složena ze dvou částí, to jest ze základní hodnoty vlastnosti W_0 , která odpovídá vlastnosti tělesa bez vnitřního prnutí, a z druhé složky, která představuje vliv vnitřních prnutí vyvolaných technologickým procesem. Vztah je možno psát do tvaru:

$$W_s = W_0 + f(I) \quad (1)$$

kde značí:

W_s - hodnotu vlastnosti tělesa s vnitřním prnutím

W_0 - základní hodnota vlastnosti, tj. vlastnost tělesa prostého prnutí

I - vlastnost vyjadřující vliv vnitřního prnutí na změnu základní vlastnosti W_0

f - funkční vztah mezi vlastnostmi W a I

Z teorie plasticity vyplývá, že během jakéhokoliv plastického tváření vznikají ve tvářeném tělese přídavná prnutí,

která v něm mohou zůstat jako vnitřní pnutí. Tato pnutí, vznikající jako důsledek tvářecích sil, představují pouze jeden druh pnutí.

Další druh pnutí je vyvoláván ochlazováním horké taveniny polyméru ve studené vstřikovací formě. Po ochlazení jsou v povrchových vrstvách výstřiku přítomna tlaková pnutí, ve vnitřních vrstvách tahová. Tato pnutí popisuje Högberg [19]. Naproti tomu Knappe [24] tvrdí, že povrchové vrstvy výstřiku obsahují jen tahová pnutí. Malý význam tlakových pnutí v povrchových vrstvách potvrzují také Orthmann a Schmitt [37].

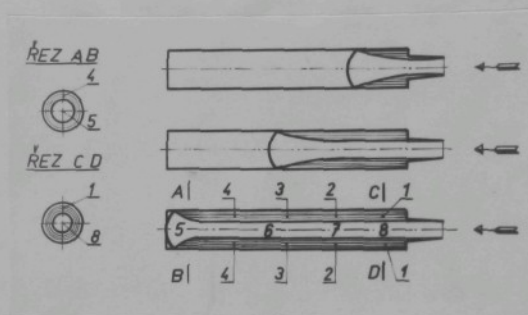
Z těchto posledních tvrzení vyplývá, že rozhodující vliv na změnu mechanických vlastností výstřiků mají tahová pnutí v povrchových vrstvách, která jsou výsledkem přeskupování a orientace molekul do směru toku.

Aby bylo možno lépe pochopit pnutí vyvolaná orientací molekul, je účelné popsat vyplňování dutiny vstřikovací formy taveninou plastické hmoty.

3.2. Plnění dutiny formy při vstřikování

Roztavený polymér je vtlačován pístem z tavicí komory do dutiny vstřikovací formy. Vlastní plnění dutiny probíhá velmi komplikovaným způsobem. Schönborn [46] jej popisuje zjednodušeně takto: Uvažovaná dutina formy má tvar kruhového kanálu. Tavenina do ní vstupuje v ose na jednom konci kanálu a jakmile je vtlačena do dutiny, ihned zaplní celý její průřez. Na stěně formy velmi rychle tuhne. Tato ztuhlá vrstva plní úlohu tepelného izolátoru. Další hmota je do dutiny vtlačována pouze partlemi kolem osy kanálu. Na čelo proudu se

tavenina rozlévá opět do celého průřezu kanálu a celý pochod se neustále opakuje. Schematicky je toto znázorněno na obr. 4.



Obr. 4. Schematické znázornění vyplňování dutiny formy taveninou plastické hmoty při vstříkávání

Z obr. 4 je zřejmé, že stěny výstřiku v bezprostřední blízkosti ústí vtoku jsou tvořeny hmotou, která do dutiny formy vstoupila jako první. Dále od ústí je uložena hmota, která byla do dutiny vtlačena později. Protože se však ve středních partiích dutiny nachází ještě proudící tavenina, je průřez výstřiku v každém místě tvořen alespoň dvěma či více vrstvami hmoty. Např. bezprostřední okolí ústí vtoku se skládá z vrstev 1 a 8.

Hmota, která ztuhne na stěně vstříkací formy, se nemůže pohybovat. Prouděním taveniny v plastickém středu kanálu vznikají na stykové ploše mezi vrstvami tekoucí a nehybné hmoty smyková napětí, jejichž výsledkem je orientace molekul. To je vlastní příčinou změny mechanických vlastností výstřiků, protože stupeň orientace molekul a hodnoty mechanických vlastností jsou na sobě závislé.

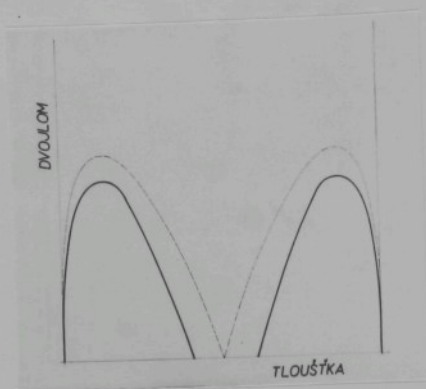
3.3. Orientace molekul a její souvislost s mechanickými vlastnostmi výstřiků

Vliv podmínek vstřikování na stupeň orientace molekul byl podrobně studován Ballmanem a Toorem [3]. Pokusy byly prováděny s čirým polystyrénem, protože tento materiál umožňuje snadné hodnocení orientace sledováním dvojzlomu v polarizovaném světle. Dvojzlom byl měřen na vstřikovaných plochých tyčích o průřezu 25 x cca 2 mm a 25 x cca 4 mm, a to jak v podélném, tak v příčném směru.

Výsledný stupeň orientace je ovlivňován dvěma protichůdnými procesy:

- a) Tečením taveniny polyméru v dutěné vstřikovací formy, které orientaci způsobuje.
- b) Následující relaxací napětí, která proběhne po skončení plnicího procesu a která původní stupeň orientace snižuje.

Kdyby tečení hmoty probíhalo za izotermických podmínek, byla by smyková napětí na stěně formy největší. U neizotermického toku je však tavenina na stěně vstřikovací formy ihned ochlazená a ztuhne. Tato tenoučká vrstva není podle Ballmana orientována. Z toho vyplývá, že smyková napětí a tomu odpovídající orientace, tedy i dvojzlom, musí procházet maximem, které leží mezi povrchem výstřiku a jeho středem, protože tam jsou smyková napětí nejmenší případně až rovna nule. Tyto poměry jsou znázorněny na obr. 5, kde značí:
----- původně vzniklý dvojzlom účinný orientaci molekul a
———— výsledný dvojzlom po relaxaci napětí.



Obr.5. Rozložení dvojlomu ve výstřiku tvaru desky

Po vyplnění dutiny formy nastupuje relaxace napětí, která původně vzniklou orientací molekul snižuje. Stupeň relaxace napětí závisí na teplotě hmoty v jednotlivých místech. Protože je uprostřed výstřiku teplota relativně nejvyšší, musí výsledná orientace i dvojlom být v tomto místě nejmenší nebo rovný nule.

Absolutní hodnoty dvojlomu závisejí na vstřikovacích podmínkách. Orientace se obvykle snižuje:

- a) jestliže se teplota vstřikovací formy zvyšuje,
- b) jestliže se vstřikovací teplota zvyšuje,
- c) jestliže se tloušťka výstřiku zvětšuje.

Tyto závěry však neplatí zcela obecně, protože míra vlivu jednoho faktoru je závislá také na velikosti faktoru druhého. Např. vliv vstřikovací teploty se u různě tlustých vý-

stříků poněkud liší.

K podobným závěrům dospěl také Krebs [25] .

Závislost orientace na podmínkách zpracování studovali na polystyrénových výstřicích Lapšin a Kozlov [31] . Z jejich pokusů vyplývá, že orientace se zmenšuje zvýšením vstřikovací teploty, snížením vstřikovacího tlaku a zvýšením teploty vstřikovací formy. Orientace také klesá zvětšováním tloušťky výstřiků a je ovlivněna i délkou a průřezem vtokového kanálu. V případě malého průřezu kanálu orientace klesá, protože vstřikovací tlak může na taveninu v dutině působit jen krátkou dobu.

Z polystyrénových výstřiků byly na mikrotomu zhotoveny tenké vrstvy, u kterých bylo stanoveno smrštění za tepla. Podle výsledků těchto pokusů je orientace soustředěna pouze v povrchových vrstvách, jejichž tloušťka činila několik desetin milimetru.

Autoři dále studovali smrštění za tepla zkušebních mikrotěles vyříznutých z různých míst výstřiku. Hodnoty smrštění závisely na vzdálenosti od místa ústí vtoku. Největší byly v jeho blízkosti. Temperování výstřiků při 77 °C hodnoty smrštění neovlivnilo.

Souvislostí mezi mechanickými vlastnostmi výstřiku a smrštěním za tepla jako mírou orientace se zabýval Orthmann [35;36] . Vliv orientace na rázovou houževnatost byl studován na styren-akrylnitrilovém kopolyméru. Hodnotám smrštění mezi 60 - 0 % odpovídala rázová houževnatost v rozmezí 29 až 5 kpcn/cm².

Na základě takto získaných zkušeností Orthmann prohlašuje, že se hodnoty vlastností zkušebních těles z tohoto materiálu

mohou podle zpracovatelských podmínek mezi sebou lišit až o několik set procent. Proto je nutné, aby kromě hodnot mechanických vlastností byly současně udávány i hodnoty smrštění za tepla stanovené na stejných zkušebních tělesech, neboť jinak údaj samotné materiálové vlastnosti bez údaje vnitřního pnutí je bezcenný.

Poznámka: Smrštění za tepla se stanoví při teplotě o 20 °C vyšší než je odpovídající tepelná odolnost podle Vicata měřená v glykolu.

3.4. Vliv různých faktorů na orientaci molekul a na vlastnosti výstřiků

Orientace molekul i následující relaxace napětí závisí na mnoha faktorech. Tyto mohou být rozděleny do čtyř hlavních skupin:

- 3.4.1. Faktory, které souvisejí s vlastnostmi vstříkovací hmoty.
- 3.4.2. Faktory vyjadřující vliv technologických podmínek.
- 3.4.3. Faktory, které jsou spojeny s konstrukcí vstříkovací formy a funkcí vstříkovacího lisu.
- 3.4.4. Do čtvrté skupiny možno zařadit faktory, které vyvolávají ve výstřiku přídavná pnutí jinými způsoby.

3.4.1. Vliv vstříkovací hmoty na orientaci molekul a na vlastnosti výstřiků

3.4.1.1. Vliv viskozity taveniny

Vlastní příčina orientace molekul spočívá ve smykových napětích vznikajících v pohybující se tavenině. Velikost

těchto napětí souvisí s viskozitou taveniny polyméru.

Bartěněv [6;7] uvádí pro viskozitu polymerní taveniny následující vztah:

$$\eta = C \cdot \eta_1(T) \cdot \eta_2(\tau) \cdot \eta_3(M) \quad (2)$$

Tento vztah je vyjádřením pravidla logaritmické aditivnosti viskozity, neboť může být psán ve tvaru:

$$\log \eta = \log C + \log \eta_1(T) + \log \eta_2(\tau) + \log \eta_3(M) \quad (3)$$

kde znamenají:

η - viskozitu taveniny polyméru

C - konstantu charakterizující strukturu polyméru

T - teplotu

τ - smykové napětí

M - střední molekulovou váhu polyméru

První člen pravé strany rovnice (3) předpokládá vliv struktury hmoty na hodnotu viskozity, druhý vliv teploty, třetí smykového napětí a poslední vliv molekulové váhy.

Pro závislost viskozity na teplotě platí vztah:

$$\eta_1(T) = A \cdot e^{\frac{E}{RT}} \quad (4)$$

kde značí:

A - konstantu, která má rozměr viskozity

E - aktivací energie polymerního toku, která je pro daný polymer konstantou

R - Boltzmannovu konstantu

Vliv smykového napětí na tok polymerních tavenin je poměrně komplikovaný. Zvyšování smykového napětí vyvolává větší přírůstek smykové rychlosti než u newtonských kapalin.

Pro tok polymérních tavenin se používá "mocninového zákona", který bývá podle Carloye [21] psán ve tvaru:

$$\frac{dv}{dx} = \Phi \cdot \tau^n \quad (5)$$

kde je:

v - smyková rychlost taveniny v bodě x

x - vzdálenost bodu od osy kanálu kolmo ke směru rychlosti

Φ - fluidita, která je u newtonských kapalin rovna $\Phi = \frac{1}{\eta}$

τ - smykové napětí

n - exponent v mocninovém zákoně, který je měřítkem nenewtonského chování taveniny

Pro závislost viskozity na smykovém napětí platí u lineárních polymérů vztah:

$$\eta_2(\tau) = \eta_0 \cdot e^{-\alpha \cdot \tau} \quad (6)$$

V rovnici (6) značí:

α - konstantu, která závisí na molekulové váze polyméru a na jeho struktuře

η_0 - viskozitu při zvolených základních podmínkách zhoušky

e - základ přirozených logaritmů

Z rovnice (6) vyplývá, že viskozita tavenin lineárních polymérů klesá se zvyšujícím se smykovým napětím podle exponenciální křivky.

Vliv molekulové váhy polymérů na viskozitu taveniny vyjadřuje vztah:

$$\eta_3(M) = M^\beta \quad (7)$$

kde β je konstanta, která je např. u lineárních polymérů rovna 3,4 až 3,5.

Výsledný vztah, který zahrnuje všechny sledované veličiny, má tvar:

$$\eta = K \cdot M^{\beta} \exp\left(\frac{E}{RT} - \alpha \cdot T\right) \quad (8)$$

Do konstanty K byly zahrnuty všechny konstantní hodnoty z předcházejících vzorců.

Na základě rovnice (8) je možno učinit tyto závěry:

1. Stupeň orientace molekul je tím vyšší, čím je větší molekulová váha polyméru. V případě polyolefinů se orientace zvyšuje se zmenšující se tavným indexem.
2. Orientace klesá se zvyšující se vstřikovací teplotou.
3. Má klesat i se zvyšujícím se vstřikovacím tlakem, který snižuje viskozitu taveniny.

3.4.1.2. Vliv relaxace napětí

Po ukončení toku taveniny se molekuly nacházejí v napřímeném, orientovaném stavu, který je však termodynamicky nestabilní. Proto se molekuly snaží přejít do rovnovážného stavu. Tento děj je provázen relaxací napětí.

Vztah popisující průběh relaxace napětí se získá na základě analýzy Maxwellova modelu, pro který platí následující tenzorová rovnice:

$$\dot{S} + \frac{2}{3} \cdot \dot{S} = 2\eta \cdot \dot{N} \quad (9)$$

V rovnici (9) znamená:

$\dot{S}$ - deviator tenzoru napětí

$\dot{S} = \frac{dS}{dt}$ - změnu deviatoru tenzoru napětí s časem

$\dot{N} = \frac{dN}{dt}$ - změnu deviatoru tenzoru deformace s časem

G - modul pružnosti ve smyku

Doplněním této obecné rovnice (9) se obdrží:

$$\tau + \frac{\eta}{G} \cdot \frac{d\tau}{dt} = \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} \quad (10)$$

kde γ je zkos.

Jakmile se deformace v určitém čase zastaví, tzn. když tavenina vyplní celou dutinu vstříkovací formy, platí:

$$\frac{d\gamma}{dt} = 0 \quad (11)$$

takže:
$$\frac{\tau}{\eta} + \frac{1}{G} \cdot \frac{d\tau}{dt} = 0$$

(12)

a po separaci proměnných:

$$\int_{\tau_0}^{\tau} \frac{d\tau}{\tau} = -\frac{G}{\eta} \int_0^t dt \quad (13)$$

se integrací získá konečný tvar:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-\frac{G}{\eta} \cdot t} \quad (14)$$

Relaxace napětí v závislosti na čase tedy probíhá podle exponenciální křivky. Poměr

$$\frac{\eta}{G} = t_{rel} \quad (15)$$

je označován jako relaxační doba. Při neměnné teplotě je t_{rel} konstantou a představuje potom materiálovou konstantu určenou hodnotami η a G.

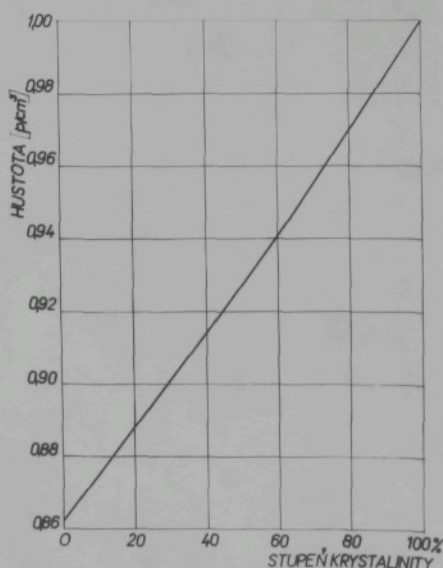
Při vyplňování dutiny vstříkovací formy ovšem teplota hmoty není konstantní, ale v určitém bodě vstříku je funkcí

času. Proto v tomto případě není relaxační doba konstantou, ale závisí také na čase. Její změna je ovlivněna jak změnou viskozity, tak změnou modulu pružnosti, které jsou v daném místě funkcí teploty. Protože se viskozita s klesající teplotou mání rychleji než modul pružnosti ve smyku, relaxační doba se při poklesu teploty zvětšuje a relaxace napětí probíhá pomaleji.

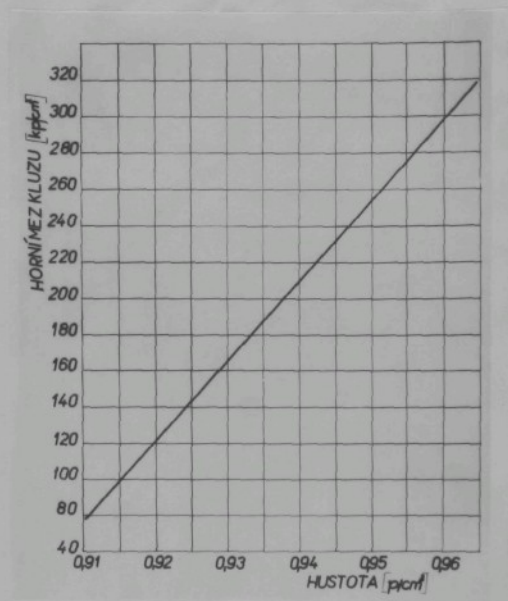
Bylo prokázáno, že i stoupající tlak, který působí na taveninu v dutině vstříkovací formy během dotlačování, způsobuje zpomalení relaxačního procesu v důsledku snížení pohyblivosti molekul [29] .

3.4.1.3. Vliv krystalizace

Fyzikálně mechanické vlastnosti krystalizujících polymerů jsou velmi závislé na stupni krystalinity, jak je zřejmé z obr. 6 a 7 [30;50;51;52] .

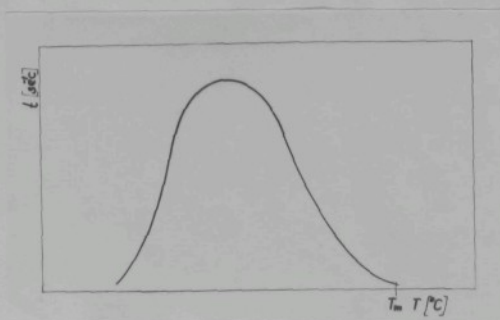


Obr.6. Závislost hustoty polyetylénu na stupni krystalinity



Obr. 7. Závislost horní meze kluzu polyetylenu na jeho hustotě

Pro krystalizaci plastických hmot platí analogické zákony jako pro krystalizaci kovů, tj. v prvním stadiu se tvoří krystalické zárodky, z nichž vyrůstají krystality. Rychlost krystalizace závisí na teplotě, jak je patrné z obr. 8 [11] :



Obr. 8. Obecná závislost krystalizační rychlosti na teplotě T

Polymér začíná krystalizovat až pod oblastí tání T_m . Rychlost krystalizace se s klesající teplotou zvyšuje až k maximu, odkud nastává opět pokles v důsledku snížené pohyblivosti molekul. Prudkým ochlazením je možno krystalizační rychlost zpomalit a získat výrobek s nízkým stupněm krystalinity. Tato termodynamicky nestabilní struktura během doby nebo při zvýšené teplotě ovšem může přejít ve strukturu stabilní.

Při vstřikování přichází tavenina polyméru o vysoké teplotě do bezprostředního styku s chladnou formou. Povrchové vrstvy taveniny jsou zprůdka ochlazeny, a proto je jejich stupeň krystalinity nízký. Vnitřní vrstvy jsou však povrchovými vrstvami tepelně izolovány, takže mají pro krystalizaci lepší podmínky. Důsledkem je nestejný stupeň krystalinity v průřezu vstříku.

Je možné předpokládat, že k nehomogenitě z hlediska krystalinity dochází i ve směru podélné osy vstříku. To vyplývá z následující úvahy: Plnění dutiny vstřikovací formy vyžaduje jistý čas, přibližně několik desetin vteřiny. Tavenina v blízkosti ústí vtoku je ochlazována relativně nejdelší dobu a tloušťka ztuhlé povrchové vrstvy by zde měla být největší. Avšak v těchto místech tavenina teče nejrychleji, což chladnutí naopak zpomaluje. Tavenina na samém konci dutiny chladne nejkratší dobu. Z toho vyplývá, že tloušťka ztuhlé vrstvy prochází maximem, které leží mezi ústím vtoku a okrajem vstříku.

Jiná nestejnouměrnost krystalinity může vznikat tím, že chladičí vodní kanály nebývají zcela správně ve vstřikovací formě rozmístěny. Některé části dutiny formy jsou proto

ochlazovány intenzivněji než druhé. Dosažení úplně stejné teploty ve všech místech dutiny formy je ovšem nejen z praktického, ale i z čistě teoretického hlediska složitý problém.

Na nerovnoměrné rozdělení hustoty v příčném směru výstřiku poukázal Stockmair [50] u polyetylenu a Boukal [12] u polypropylenu. Stockmair [50] a Krebs [28] pozorovali nestejně rozložení hustoty také v podélném směru polyetylenových výstřiků : největší hustota byla nalezena v blízkosti ústí vtoku.

Je možno předpokládat, že krystalizace ovlivní i stupeň orientace molekul. S krystalizací je totiž spojen určitý pohyb molekul, který napomáhá snížení orientace molekul. Vliv orientace molekul na mechanické vlastnosti výstřiků se tedy krystalizací zmenšuje. Vzrůst hustoty ovšem vyvolává současně zvýšení mechanických vlastností, takže konečná hodnota vlastností je výsledkem obou pochodů.

3.4.2. Vliv podmínek zpracování na orientaci molekul a na vlastnosti výstřiků

Podmínky zpracování mají tak velký význam proto, že mohou být měněny u všech moderních vstřikovacích lisů v širokých mezích. Tím je dána i možnost značně ovlivňovat fyzikálně mechanické vlastnosti finálního výstřiku.

Nejdůležitější vlivy jsou:

3.4.2.1. Vliv vstřikovací teploty

Zvyšování vstřikovací teploty má za následek snížení

viskozity taveniny. Při nízké viskozitě vznikají v tavenině během toku jen malá smyková napětí a dochází jen k nízkému stupni orientace molekul. Protože se relaxační doba zmenšuje s poklesem viskozity, relaxace napětí dosahuje vysokého stupně. Teoreticky by ovšem snížení viskozity mohlo způsobit i výsledek zcela opačný, neboť při nízké viskozitě se zvyšuje rychlost tečení taveniny v dutině formy a to by mohlo vést k větší orientaci.

Praktické pokusy však ukazují, že převládá první děj a že zvýšení vstříkovací teploty způsobuje pokles orientace molekul, což se projevuje nízkými hodnotami mechanických vlastností výstřiků. Toto potvrdili Kvjetkovskaja [29], Just [22], Stockmair [51] a jiní. Abranov [1] pozoroval, že vliv vstříkovací teploty na změnu mechanických vlastností nebyl u všech druhů polyetylénu stejný.

3.4.2.2. Vliv vstříkovacího tlaku

Zvyšování vstříkovacího tlaku způsobuje vzrůst rychlosti tečení taveniny v dutině vstříkovací formy. Jak vyplývá z mocninového zákona, je zvýšení rychlosti větší než odpovídá lineární úměrnosti. Zvýšená rychlost je příčinou vyššího stupně orientace molekul. Na druhé straně má však zvýšená rychlost za následek snížení viskozity, což příznivě ovlivňuje relaxaci napětí. Vnitřní tlak nemá ve všech místech dutiny vstříkovací formy stejnou hodnotu. Nejvyšší je v bezprostřední blízkosti ústí vtoku a postupně k okrajům se snižuje. V různých místech dutiny proto existují rozdílné podmínky jak pro vznik orientace molekul, tak pro relaxaci napětí.

Vše, co by dosud řečeno o vlivu tlaku, platí pro vlastní plnění dutiny formy. Ale tlak ovlivňuje poměry v dutině ještě během doby dotlačování. Příliš vysoký tlak znesnadňuje pohyb molekul, který je nejdůležitějším předpokladem pro relaxaci napětí. S tím souvisí i zhoršení podmínek pro průběh relaxace.

Na základě těchto úvah lze očekávat, že zvyčováním vstřikovacího tlaku bude mít za následek vzrůst mechanických vlastností výstřiku. Toto potvrzuje Abramov [1] a Mamedov [32].

3.4.2.3. Vliv doby plnění dutiny

Rychlost plnění dutiny vstřikovací formy a s tím spojená doba plnění sice nejsou samostatné technologické veličiny, protože závisí na jiných faktorech, např. na vstřikovacím tlaku a vstřikovací teplotě, ale přesto je nutné analyzovat jejich vliv na orientaci molekul a na vlastnosti výstřiků.

Čím je rychlost plnění větší, tím jsou molekuly ve směru toku více orientovány a tím je i vyšší stupeň vytvořené orientace. Pomalé chladnutí hmoty v důsledku rychlého tečení naopak orientaci snižuje. V literárních údajích převládá názor, že první děj má větší význam než druhý. Souvisí to bezpochyby i s tím, že doba plnění je velmi krátká a činí jen několik desetin vteřiny. Staub [49] zjistil, že doba plnění výstřiku z lineárního polyetylenu o rozměrech asi 50x225x2 mm činila 0,35 vteřiny. Podobně uvádí Seyfahrt [43], že doba plnění u polystyrénové kruhové desky o průměru 140 mm a tloušťce 2 mm byla 0,44 vteřiny.

Mareškov [32] tvrdí, že prodloužení doby plnění způsobuje snížení mechanických vlastností výstřiku. Vzdůst mechanických vlastností zvyšováním vstřikovacího tlaku přičítá hlavně vlivu zvýšené rychlosti plnění a následující fixace orientované struktury nikoliv vlivu vlastního vstřikovacího tlaku.

3.4.2.4. Vliv doby dotlačování

Ochlazováním taveniny v dutině formy se zmenšuje její objem a do uvolněného prostoru je vtlačována další hmota. Tavenina v dutině vstřikovací formy tuhne od stěn a od okraje výstřiku. To znamená, že hmota vtlačená do dutiny během dotlačování zůstává v blízkosti ústí vtoku. V těchto místech se však nachází také hmota, která vtekla do dutiny jako první a která má již nízkou teplotu. Čím je doba dotlačování delší, tím je rozdíl teplot obou hmot větší a tím větší jsou i srykování napětí ve hmotě. Tím vzniká i větší orientace molekul, která dosahuje maxima v blízkosti ústí vtoku. Velikost prnutí závisí i na délce doby dotlačování. Orientace je největší tehdy, když vstřikovací tlak působí až do bodu zatuhnutí ústí vtoku.

Prodloužení doby dotlačování tedy zvyšuje orientaci molekul i mechanické vlastnosti výstřiku, a to až k určité maximální hodnotě odpovídající bodu zatuhnutí. Dále zůstávají na konstantní výši, protože vstřikovací tlak nemůže působit na hmotu v dutině formy [19;29] .

3.4.2.5. Vliv teploty vstřikovací formy

Čím je teplota vstřikovací formy vyšší, tím se tavenina pomaleji ochlazuje. Tloušťka orientované povrchové vrstvy je tedy malá. Kromě toho relaxace napětí může proběhnout ve velkém měřítku. Vliv orientace molekul na mechanické vlastnosti výstřiku se tedy snižuje.

U krystalizujících plastických hmot se při vyšší teplotě vstřikovací formy zvyšuje stupeň krystalinity, což vede ke zvyšování mechanických vlastností [24] .

3.4.3 Vliv faktorů souvisejících s konstrukcí vstřikovací formy a funkcí vstřikovacího lisu na orientaci molekul a na vlastnosti výstřiku

Také faktory, které jsou spojeny s konstrukcí vstřikovací formy a s funkcí vstřikovacího lisu, velmi podstatně ovlivňují stupeň orientace molekul a tedy i mechanické vlastnosti výstřiku. Nejdůležitější jsou tyto vlivy :

3.4.3.1. Vliv tloušťky výstřiku

Jak již bylo uvedeno je orientace molekul soustředěna v poměrně tenké vrstvě při porýchu výstřiku. Ve vrstvách dostatečně vzdálených od povrchu je orientace rovna nule. Tloušťka orientované vrstvy závisí hlavně na podmínkách ochlazování, tedy nikoliv přímo na tloušťce výstřiku. Z těchto důvodů lze předpokládat, že poměr orientovaných vrstev k celkovému objemu výstřiku je u tlustých výstřiků menší než u tenkých.

U tlustostěnných výtřiků má tedy orientace molekul relativně menší vliv na mechanické vlastnosti, které jsou tudíž nižší.

Míro to lze očekávat, že u tlustého výrobku je rychlost proudění taveniny menší než u tenkého. Rovněž to má za následek nižší stupeň orientace.

Tyto úvahy byly experimentálně potvrzeny Mamedovem a Kanaevcem [33], Krebsem a Velikovskou [26].

3.4.3.2. Vliv průřezu ústí vtoku

Vytékání taveniny z ústí vtoku o malém průřezu, např. o průměru 1 mm, je velmi chaotické a tavenina vytváří po výstupu nepravidelnou spirálu. Čím je průřez větší, tím je výtok rovnoměrnější a plynulejší.

Chaotické tečení zhoršuje podmínky pro vznik orientované struktury. To vysvětluje, proč výtřiky vstříkované bodovým ústím vtoku vykazují nízké smrštění ze tepla i nízké hodnoty mechanických vlastností [1;32].

Malý průřez ústí vtoku ovlivňuje také rychlost plnění dutiny vstřikovací formy. Tato se snižuje, čemuž odpovídá i nižší stupeň orientace molekul [25]. Mimo to malé ústí vtoku rychle zatuhne, takže doba dotlačování je krátká a důsledkem je rovněž snížení orientace molekul.

3.4.3.3. Vliv konstrukce vtokového kanálu

Konstrukce vtokového kanálu také ovlivňuje podmínky plnění dutiny formy. Úzký a dlouhý vtokový kanál vyvolává velké ztráty tlaku, takže tavenina je do dutiny vstříkována nízkým

tlakem a výsledkem je malá orientace molekul.

3.4.3.4. Vliv tvaru dutiny vstříkovací formy

Dutina vstříkovací formy má být konstruována tak, aby tloušťka výstřiku byla podle možností všude stejná. Jestliže tento požadavek není splněn, mění se podmínky plnění od jednoho místa dutiny k druhému. Důsledkem je rozdílný stupeň orientace molekul v různých místech výstřiku. Takový výstřik je velmi nestejnorodý a mnohdy nelze spolehlivě určit místo s nejvyššími mechanickými vlastnostmi.

Velká nestejnorodost vzniká v místech studených spojů. Tento problém však leží mimo rámec této práce.

3.4.4. Vliv přídavných pnutí na vlastnosti výstřiku

Jestliže se tavenina během ochlazování v dutině formy nemůže volně smršťovat, vznikají ve výstřiku další přídavná pnutí. Bývá to často způsobeno např. kovovými záložky, ale i vlastním tvarem výstřiku. Ku příkladu u zkušebního tělesa pro stanovení pevnosti v tahu, zvaného "oemčka", se střední část nemůže volně smršťovat, protože to tvar nedovolí. Tak vznikají ve zúžené části tělesa přídavná pnutí, která jsou ochlazením fixována. V uvedeném případě jsou vyvolaná pnutí rozdělena po celém průřezu tělesa rovnoměrně.

Jiná přídavná pnutí mohou být vyvolána vyhazovači. Jestliže je výstřik vyhazován z dutiny ještě částečně plastický, mohou být některé jeho části namáhány vyhazovači nad mez kluzu. Při tom dochází k plastickému přetváření těchto částí.

Přetvoření zůstává ve výstřiku po ochlazení přítomno jako vnitřní pnutí. Tato pnutí nejsou v průřezu výstřiku konstantní a mohou to být jak pnutí tahová, tak tlaková [25] .

3.5. Anizotropie a nestejnoročnost výstřiku

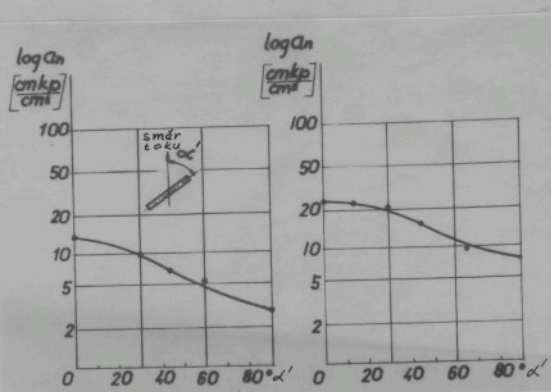
Vnitřní struktura výstřiku neodpovídá termodynamické rovnováze, protože uspořádání molekul do tvaru s minimální volnou energií není během vytřikování dostatek času. Výsledkem je nestejnomořnost vlastností v různých místech výstřiku.

Nestejnomořnost vlastností se projevuje jednak jako anizotropie, jednak jako nestejnoročnost čili nehomogenita vlastností.

a) Anizotropie vlastností je důsledkem orientace molekul.

Orientace zvyšuje hodnoty mechanických vlastností tehdy, když je zkušební těleso namáháno tak, že lom vzniká kolmo ke směru orientace molekul.

Anizotropie mechanických vlastností byla pozorována Orthmannem [38] u polystyrénu. Výsledky na obr. 9a a 9b ukazují, že náchylnost k anizotropii není u všech druhů plastických hmot stejná. Kopolymér vykazoval menší sklon k anizotropii.



Obr. 9a

Obr. 9b

Závislost rázové houževnatosti a_n na směru odebrání zkušebního tělesa α'
 pro: 9a - normální polystyrén
 9b - kopolymér styren-akrylonitril

Také Horsley a Lee [20] našli, že vrubová houževnatost výstřiků z houževnatého polystyrénu je ve směru tečení hmoty asi trojnásobná než ve směru kolném. Mez pevnosti v ohybu byla ve směru toku asi o 50 % vyšší. K podobným závěrům dospěli také Mamedov a Kanavec [32].

Anizotropii zkušebních těles zkoumal rentgenograficky Boukal [12].

- b) Nestejnorodost čili nehomogenita vlastností představuje také rozdělení vlastností ve výstřiku, kdy jejich hodnota závisí na souřadnicích x, y, z , tedy např. :

$$\sqrt{p_x}(x,y,z) \neq \text{konst.} \quad (16)$$

kde znamená:

$\sqrt{p_x}$ - měřenou vlastnost, např. horní mez kluzu ve směru osy x

x, y, z , - souřadnice systému.

Nestejnorodost vlastností může vznikat jak napříč výstřikem, tak i v jeho podélném směru. V obou případech spočívají příčiny v rozdílných podmínkách zpracování, které se mění od místa k místu.

Nestejnorodost byla zjištěna Krebsem a Velikovskou [26] u polypropylénu, z něhož byly vystříknuty pásy o rozměrech 2x30x500 mm a z těch byla vyříznuta mikrotělesa pro tahovou zkoušku orientovaná ve směru toku, ale v různé vzdálenosti od místa ústí vtoku. Mez pevnosti v tahu a tažnost těles jsou uvedeny v tab. 2.

Tab.2. Závislost meze pevnosti v tahu a tažnosti polypropylenových mikrotěles na vzdálenosti od ústí vtoku

Vzdálenost od ústí [mm]	Mez pevnosti v tahu [kp/cm ²]	Tažnost [%]
9	302	160
259	261	333
359	227	373

3.6. Teoretické řešení vstřikovacího procesu

I když jsou vnější technologické podmínky při vstřikování konstantní, podmínky uvnitř dutiny vstřikovací formy se od jednoho místa k druhému navzájem liší. Důsledkem toho je, že ani fyzikálně mechanické vlastnosti výstřiku nemohou být ve všech místech shodné.

Nestejnost vlastností má příčinu jednak v ochlazování taveniny, jednak v poklesu vnitřního tlaku v dutině vstřikovací formy. Ochlazování probíhá především v příčném směru

výstřiku, to je od jeho povrchu ke středu, ale také ve směru podélném, to je od místa ústí vtoku k okraji výstřiku. K poklesu vnitřního tlaku v podélném směru výstřiku dochází vlivem tlakových ztrát. Změna tlaku je důležitá proto, že tlak ovlivňuje jak vznik orientace molekul, tak i relaxaci napětí.

V teoretickém rozboru je třeba prošetřit následující problémy :

- 1) Přesvědčit se, zda ochlazování povrchových vrstev během plnění dutiny vstříkovací formy je z hlediska objemu výstřiku zanedbatelné a nebo je nutno brát je v úvahu.
- 2) Odvodit rozdělení vnitřního tlaku v dutině vstříkovací formy jednoduchého tvaru během doby plnění.
- 3) Objasnit pojem "směr tečení taveniny" na základě odvození směru pohybu molekul při zaplňování dutiny jednoduchého tvaru.

3.6.1. Ochlazování taveniny během doby plnění

Ochlazování taveniny během plnění dutiny vstříkovací formy ovlivňuje tloušťku orientovaných vrstev. Aby bylo možné zhodnotit, do jaké míry se ochlazování uplatní při vzniku orientace molekul, je nutné znát rychlost ochlazování.

Ochlazování taveniny v dutině vstříkovací formy je nestacionární děj. V tomto případě pro ochlazování nekonečné desky platí vztah (17) [48]:

$$\frac{Q_w}{Q_a} = \frac{4}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 F_0} \left(1 - \frac{1}{3} e^{-9\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 F_0} + \frac{1}{5} e^{-25\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 F_0} - \dots \right) \quad (17)$$

V rovnici (17) znamenají:

Q_m - rozdíl teplot mezi povrchem a středem desky po čase t

Q_a - rozdíl teplot vstříknuté taveniny a stěny dutiny formy na počátku ochlazování

e - základ přirozených logaritmů

Fo - Fourierovo číslo

Jestliže je Fourierovo číslo větší než 0,2, blíží se výraz v závorkách jedné a rovnici (17) je možno dále zjednodušit. Při ochlazování polymérní taveniny v kovové formě je tato podmínka dobře splněna, protože teplota povrchové vrstvy výstřiku se prakticky okamžitě rovná teplotě povrchu dutiny formy, takže Fourierovo číslo je mnohem větší než 0,2.

Rovnice (17) pak přejde do tvaru :

$$\frac{Q_m}{Q_a} = \frac{4}{\pi} \cdot e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot Fo} \quad (18)$$

Fourierovo číslo je dáno vztahem :

$$Fo = \frac{a \cdot t}{h^2} \quad (19)$$

kde je :

t - čas

h - tloušťka desky. V uvažovaném případě je deska ochlazována z obou stran, a proto musí být do rovnice dosazeno pouze $h/2$.

a - teplotní vodivost, která je dána vztahem :

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (20)$$

při čemž :

λ - tepelná vodivost

ρ - hustota

c_p - měrné teplo

Po dosazení a úpravě rovnice (17) se získá výraz pro čas potřebný k ochlazení desky o tloušťce h :

$$t = \frac{4}{\pi^2} \left(\frac{L}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{a} \cdot \ln \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q_0}{Q_{\infty}} \right) \quad (21)$$

Pomocí rovnice (21) je možné vypočítat teoretickou tloušťku ztuhlé povrchové vrstvy výstřiku, která se vytvoří ochlazením taveniny během doby plnění dutiny vstřikovací formy. Hodnota teplotní vodivosti a byla převzata z údajů P. Seyfahra [43]. Teplotní vodivost pro nejdůležitější druhy plastických hmot a pro rozmezí teplot 20 až 200 °C je v tabulce 3

Tab.3. Hodnota teplotní vodivosti a .

Druh hmoty	PEV	PEN	PS	PA
$a \cdot 10^4 \text{ [cm}^2/\text{sec]}$	7,86	7,29	7,58	9,44

Význam zkratk :

PEV - rozvětvený polyetylén

PEN - lineární polyetylén

PS - normální polystyrén

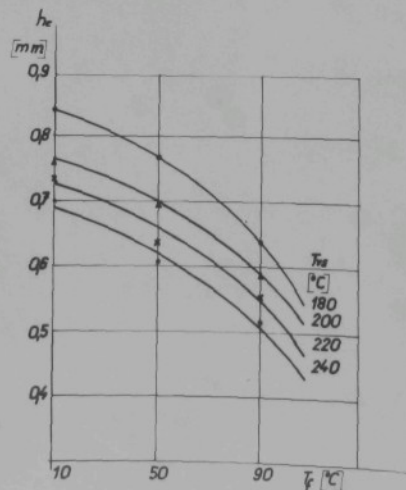
PA - polyamid

Tloušťka ztuhlé vrstvy ve výstřiku z lineárního polyetylénu byla vypočítána pro následující zvolené podmínky :

a) Doba plnění 0,5 vteřiny. Tento údaj sice může záviset na tloušťce výstřiku, ale předpokládá se, že u tlustých výstřiků se ztráty tlaku v dutině vstřikovací formy zmenšují, takže za jednotku času proteče dutinou větší množství

- taveniny a celková doba plnění zůstane přibližně stejná. Zvolená doba se opírá o údaje v literatuře [43;49] .
- b) Teplota vstřikovací formy : 10, 50 a 90 °C; vstřikovací teplota v rozmezí 180 až 240 °C. Teplotní vodivost byla považována za konstantní v celé této oblasti.
- c) Nejnižší teplota taveniny, při které může být tavenina lineárního polyetylénu ještě tvářena byla zvolena 140 °C.
- d) Předpokládá se, že se tavenina nepohybuje.

Za těchto předpokladů byla vypočítána tloušťka ztuhlé vrstvy h_e , která se vytvoří ve vstřiku ochlazením taveniny ze vstřikovací teploty na teplotu nižší než 140 °C. Závislost tloušťky h_e na teplotě vstřikovací formy a vstřikovací teplotě je na obr. 10. Vypočítaná tloušťka h_e představuje vrstvu v celém vstřiku, t.zn., že u každého porychu je vrstva tlustá $h_e/2$. Tato vrstva má na jednom povrchu teplotu rovnou teplotě vstřikovací formy, na druhém, vnitřním povrchu, teplotu 140 °C.



Obr.10. Závislost tloušťky vrstvy h_e ve vstřiku tvaru desky na teplotě formy T_f a vstřik. teplotě T_{ve}

Vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tab. 31 v příloze 1.

Ve skutečnosti je tloušťka ztuhlé vrstvy menší než bylo vypočítáno, protože se tavenina během ochlazování pohybuje. Uvedené hodnoty tedy představují tloušťku pro nejméně příznivé podmínky.

Z obr. 10 vyplývá, že tloušťka ztuhlé vrstvy je při nízkých teplotách vstřikovací formy a nízké vstřikovací teplotě značná. Vrata h_g se vytváří postupně během celé doby plnění a je tvořena vysoce orientovanými molekulami, protože relaxace molekul v této vrstvě nemohla proběhnout. Celková tloušťka orientované vrstvy je však větší než odpovídá ztuhlé vrstvě a to o tloušťku neodrelaxovaných molekul orientovaných vlivem rychlostního gradientu mezi ztuhlou povrchovou vrstvou a středem výstřiku.

Z teoretického řešení je patrné, že ochlazování taveniny během vstřikování není možno zanedbat, i když proces plnění probíhá velice krátkou dobu.

3.6.2. Rozdělení vnitřního tlaku v dutině vstřikovací formy jednoduchého tvaru během procesu plnění

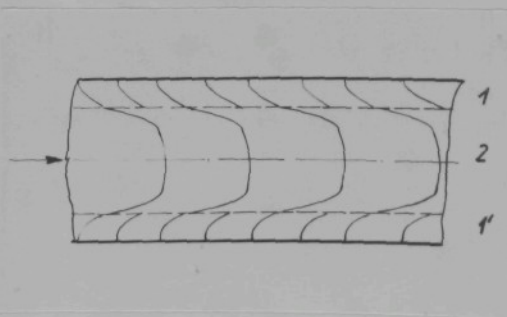
Velikost prutí v důsledku orientace molekul závisí na velikosti smykových napětí. Tato napětí mohou vzniknout jen během toku taveniny, to znamená, že pro vznik orientace je nejdůležitějším obdobím plnění dutiny vstřikovací formy.

Aby bylo možno zhodnotit vliv smykových napětí na orientaci molekul je nutné znát rozložení vnitřního tlaku v dutině vstřikovací formy. Logicky lze usoudit, že tento tlak je nejvyšší v okolí ústí vstupu a na čele proudící taveniny je

nejnižší. Problém rozložení tlaku v dutině vstřikovací formy studovali Ballman a Toor [4] a na základě reologických vztahů odvodili teoretickou rovnici, jejíž numerické řešení je však velmi obtížné a ve většině případů nemožné.

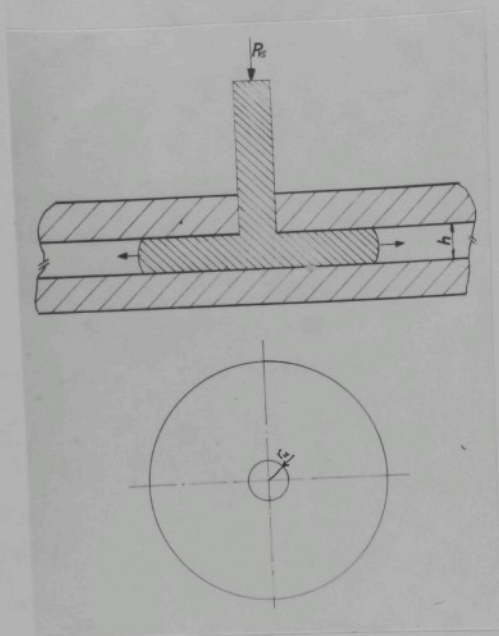
Proto byla v této práci k řešení problému navržena a použita následující hypotéza :

Tavenina polyméru je považována za ideálně plastické těleso. Vlastní pohyb taveniny v dutině formy probíhá tak, že mezi dvěma stuhlými povrchovými vrstvami polyméru 1 a 1' je posouvána střední vrstva 2 ve tvaru desky. Pouze na kluzných plochách se uvažuje přítomnost "lapalného" polyméru, který působí jako mazadlo. Protože jsou molekuly polyméru velmi dlouhé, dochází vlivem pohybu na stykové ploše k jejich orientaci podle obr. 11. Tloušťky povrchových vrstev 1 a 1' i střední vrstvy 2 jsou považovány během celé doby plnění za konstantní.



Obr. 11. Schematické znázornění toku polymerní taveniny v dutině tvaru desky

Za uvedených předpokladů je možno případ řešit s použitím vztahů z teorie plasticity. Plnění dutiny formy může být znázorněno pomocí modelu na obr. 12.

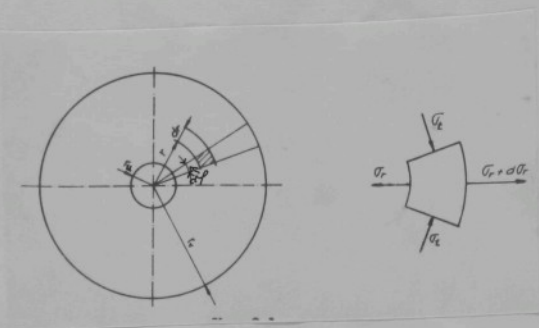


Obr.12. Vypĺňování dutiny kruhové formy taveninou plastické hmoty

Tavenina polyméru představuje plastickou tyč kruhového průřezu a je působením vnějšího tlaku P_v , který odpovídá vstřikovacímu tlaku, vtlačována do dutiny formy o konstantní tloušťce h . Ústí vstoku má poloměr r_u . Protože poříchové vrstvy výstřiku působí jako tepelný izolátor, lze předpokládat, že se střední vrstva pohybuje za izotermických podmínek.

Na základě tohoto modelu je možno určit rozložení napětí v libovolném místě taveniny v dutině vstřikovací formy

[18;40;41]. Napětí se určí z podmínky rovnováhy sil na vytknutém elementu dle obr. 13.



Obr.13. Rozložení sil působících na element vstřikovaného tělesa

Pro rovnováhu sil platí :

$$(\bar{\sigma}_r + d\bar{\sigma}_r)(r + dr)h \cdot d\varphi - \bar{\sigma}_r h \cdot r d\varphi - 2\bar{\sigma}_t \cdot h \cdot dr \sin \frac{d\varphi}{2} = 0 \quad (22)$$

kde je

$\bar{\sigma}_r$ - radiální napětí

$\bar{\sigma}_t$ - tangenciální napětí

h - tloušťka dutiny

φ - úhel

Protože je úhel φ velmi malý, platí :

$$\sin \frac{d\varphi}{2} \approx \frac{d\varphi}{2} \quad (23)$$

Po dosazení do (22) a zanedbání členu $d\bar{\sigma}_r \cdot dr$, jehož hodnota je nepatrná, se úpravou získá :

$$d\bar{\sigma}_r \cdot r + (\bar{\sigma}_r + \bar{\sigma}_t) \cdot dr = 0 \quad (24)$$

Z podmínek při vstřikovacím procesu vyplývá, že $\bar{\sigma}_r < 0$, to znamená, že $\bar{\sigma}_r$ je napětí tlakové a $\bar{\sigma}_t$ je větší než 0 a představuje napětí tahové. Molekuly jsou tedy během vstřikování namáhány v radiálním směru tlakovým a ve směru tangenciálním tahovým napětím.

S ohledem na symetrii tělesa jsou σ_r a σ_t napětí hlavní. Třetí hlavní napětí σ_k ve směru tloušťky desky je možno pro zjednodušení uvažovat rovně nule, tedy $\sigma_k = 0$. Z Treskovy podmínky plasticity platí, že

$$\sigma_t - \sigma_r = \sigma_k \quad (25)$$

kde σ_k je mez kluzu plastického taveniny.

Dosazením do (24) se obdrží :

$$d\sigma_r \cdot r - \sigma_k \cdot dr = 0 \quad (26)$$

Řešením se získá :

$$d\sigma_r = \sigma_k \frac{dr}{r} \quad (27)$$

a konečně

$$\sigma_r = \sigma_k \cdot \ln r + C_0 \quad (28)$$

Hodnota konstanty C_0 se stanoví z okrajových podmínek :

Jestliže nemají vznikat ve vstříčku žádná propadlá místa či dutiny, musí na čele taveniny na poloměru r_v po vyplnění celé dutiny působit ještě určité radiální napětí. Tedy pro $r = r_v$ platí :

$$C_0 = \sigma_{rv} - \sigma_k \cdot \ln r_v \quad (29)$$

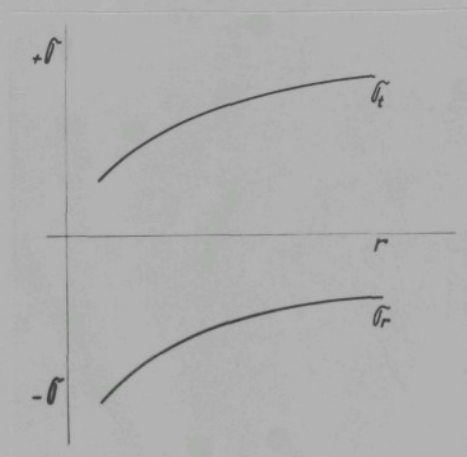
Napětí na poloměru r_v je pro konstantní podmínky vstřikovací konstantou, která je označena K_0 . Radiální napětí v kruhové vstřikovací formě v závislosti na poloměru je rozloženo podle vztahu

$$\sigma_r = \sigma_k \cdot \ln \frac{r}{r_v} + K_0 \quad (30)$$

Dosazením (30) do rovnice (25) se obdrží obdobný vztah pro rozložení tangenciálního napětí

$$\sigma_t = \sigma_k \left(1 + \ln \frac{r}{r_0}\right) + K_p \quad (31)$$

Z rovnice (30) a (31) vyplývá, že obě napětí jsou v kruhovém výstřiku během vyplňování dutiny rozložena podle logaritmické křivky. Graficky je toto znázorněno na obr. 14.



Obr. 14. Průběh radálního napětí σ_r a tangenciálního napětí σ_t v kruhovém výstřiku během vstřikování

Tlakové napětí v radiálním směru klesá se zvětšujícím se poloměrem, tangenciální napětí, které představuje napětí tahové, se zvětšuje s rostoucím poloměrem.

Po ochlazení a po uvolnění vstřikovacího tlaku se smysl obou napětí ve výstřiku obrátí. V chladném výstřiku se tedy projevuje vnitřní pnutí v radiálním směru jako tahové a tangenciálním jako tlakové napětí.

Při zkoušení pevnosti v tahu na tělesech vyříznutých z výstřiku v radiálním směru má radiální napětí opačný směr než vnější síla a zvyšuje tedy naměřenou hodnotu. Mez pevnosti v tahu v radiálním směru má tedy dosahovat nejvyšších hodnot v blízkosti ústí vtoku a nejnižších na okraji výstřiku.

Tangenciální napětí má stejný směr jako vnější síla při tahové zkoušce. Mez pevnosti v tahu se v důsledku toho snižuje. Tato hodnota je tangenciálním napětím ovlivněna nejméně v blízkosti ústí vtoku, kde má tangenciální napětí hodnotu nejmenší a kde tedy má být mez pevnosti v tahu nejvyšší. Naopak na okraji výstřiku je nejnižší.

V praxi ovšem nejsou poměry tak jednoduché vlivem relaxace napětí. Protože rychlost relaxace závisí na tlaku, k největší dochází na okraji výstřiku a k nejmenší relaxaci u ústí vtoku. Tento děj může ještě částečně ovlivnit výsledky měření, především hodnoty mechanických vlastností měřených v tangenciálním směru.

3.6.3. Pohyb molekul v dutině formy během toku

Orientace molekul je způsobována jejich pohybem během toku dutinou vstříkovací formy. Směr pohybu, a tedy i směr orientace, však není vždy jednoznačný. Nejjednodušší případ nastává, když tavenina teče dlouhým úzkým kruhovým kanálem. Potom převládající směr pohybu molekul je shodný s podélnou osou kanálu.

Ko komplikovanějšímu případu dochází u plochých výstřiků, které jsou vstříkovány středovým vtokem. Za těchto podmínek se hmota pohybuje nejen v radiálním směru, vedoucím

ke zvětšování průměru, ale i v tangenciálním směru následkem zvětšování obvodu. Děj odpovídá představě, že tavenina se šíří v soustředných kruzích, jejichž poloměr se stále zvětšuje.

U plochých výstřiků jsou tedy molekuly orientovány jak ve směru radiálním, tak i tangenciálním. Jednomu z těchto směrů přísluší buď maximum nebo minimum mechanické vlastnosti, zatím co druhý extrém leží v některém jiném směru s minimální orientací molekul, pravděpodobně v blízkosti uhlopříčky mezi radiálním a tangenciálním směrem.

Úzký kruhový kanál a plochá deska představují dva extrémní případy z hlediska orientace molekul. Do oblastí mezi těmito extrémy je možno zařadit praktické výstřiky.

3.6.4. Závěry z teoretického řešení

Na základě teoretického řešení vstříkovacího procesu je možno učinit tyto závěry :

- 1.) Vliv rychlosti ochlazování při plnění dutiny vstříkovací formy nemůže být zanedbán, i když tato plnění činí jen několik desetin vteřiny.
- 2.) Vnitřní tlak v kruhové dutině vstříkovací formy a v podobných plochých dutinách, které jsou vstříkovány střeškovým vtokem, je během plnicího procesu rozložen podle logaritmické křivky. Tlak dosahuje maxima u ústí vtoku a klesá k okraji výstřiku.
- 3.) Protože vnitřní tlak ovlivňuje orientaci molekul a stupeň orientace je spojen s mechanickými vlastnostmi výstřiků, mají tyto vycházet stejným průběhem jako vnitřní tlak, to je mají klesat od ústí vtoku k okraji výstřiku.

4.) U plochých výstřiků není směr toku molekul jednoznačný, protože nenastává tečení taveniny pouze v radiálním směru, ale i v tangenciálním. Z toho důvodu nejsou směry extrémních mechanických vlastností předem jasné.

3.7. Souhrn literárních a teoretických poznatků

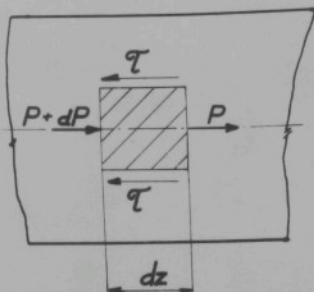
Fyzikálně mechanické vlastnosti výstřiků jsou určovány technologickými podmínkami při vstřikování. Některé z těchto vlastností, jako rozměry a váha výstřiků, jsou závislé na termodynamických veličinách taveniny odpovídajících bodu zatuhnutí.

Mechanické vlastnosti výstřiků se stávají ze dvou složek: Prvá představuje hodnotu základní vlastnosti, to je vlastnosti, která odpovídá plastické hmotě prosté vnitřního pnutí, druhá složka reprezentuje vliv podmínek zpracování.

Hodnota této druhé složky souvisí s velikostí vnitřního pnutí. Ve výstřiku jsou přítomny dva druhy pnutí :

- 1.) Pnutí vznikající jako důsledek ochlazování taveniny v dutině vstřikovací formy. Jeho význam je velmi malý.
- 2.) Pnutí jako důsledek orientace molekul. To ovlivňuje mechanické vlastnosti výstřiku význačným způsobem.

Pnutí z orientace molekul závisí na různých technologických faktorech, ale vlastní příčinou jsou ve všech případech smyková napětí. Jejich velikost souvisí s tlakovým spádem v dutině vstřikovací formy. Vyplývá to z rovnováhy sil působících na element pohybující se taveniny, jak je zřejmo z obr. 15.



Obr.15. Znáznornění rovnováhy síl na elementu pohybující se taveniny

Pro rovnováhu síl platí vztah :

$$\tau = \text{konst.} \cdot \frac{dP}{dz} \quad (32)$$

kde znamená :

konst. - konstantu zahrnující vliv rozměrů elementu

dP - změnu tlaku podél vzdálenosti dz

Protože stupeň orientace molekul je přímo úměrný smykovému napětí, platí následující souvislosti :

1. Zvyšující se vstřikovací teplota snižuje viskozitu taveniny. Tím klesá smykové napětí a orientace molekul, tedy i mechanické vlastnosti výstřiku klesají.
2. Prodlužující se dote plnění zmenšuje rychlost toku. Tím se smykové napětí snižuje a orientace klesá.
3. Jestliže se zvětšuje průřez výstřiku, především jeho tloušťka, jsou tlakové ztráty malé a orientace klesá. Stejný účinek má i zmenšení průřezu ústí vtoku.

Stupeň orientace molekul závisí na vzdálenosti od ústí vtoku. Vnitřní tlak je rozdělen v dutině vstřikovací formy

podle logaritmické křivky s maximem v místě ústí vtoku.

Mechanické vlastnosti výstřiku závisí také na tloušťce orientovaných molekul. Tloušťka vrstvy a tedy její vliv na mechanické vlastnosti klesá, jestliže stoupá vstřikovací teplota a teplota vstřikovací formy. Při konstantních podmínkách vstřikování se měrné mechanické vlastnosti výstřiku snižují se zvětšující se jeho tloušťkou.

Vstřikovací tlak ovlivňuje orientaci molekul pouze nepřímo, a to ovlivněním rychlosti plnění.

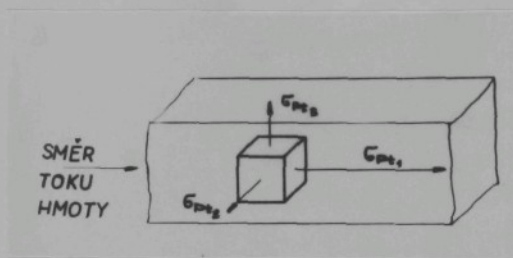
Výsledný stupeň orientace molekul je vlivem relaxace napětí nižší než původně vzniklý. Relaxace napětí závisí na druhu hmoty a u jedné hmoty na podmínkách ochlazování taveniny, tedy na vstřikovací teplotě, teplotě vstřikovací formy a na tvaru výstřiku, především jeho tloušťce. Stupeň relaxace závisí také na vstřikovacím tlaku, který působí na taveninu během dotlačování. Krystalizace hmoty rovněž působí příznivě na relaxaci napětí.

Protože jak vznik orientované struktury, tak relaxační proces jsou závislé na fyzikálních vlastnostech polymérní taveniny, je citlivost různých plastických hmot k podmínkám vstřikování rozdílná.

Vznik orientované struktury platí v podstatě obdobné zákony jak u amorfních tak u krystalických polymérů. To vyplývá z toho, že orientace vzniká v tavenině, kdy jsou všechny hmoty amorfní, bez ohledu na to, zda později, při mnohem nižších teplotách, nabudou krystalické struktury či nikoliv. Z toho důvodu není také rozhodující, zda k pokusům je zvolena plastická hmota krystalická či amorfní, neboť obě se mezi sebou liší pouze relativní velikostí výsledné orientace molekul.

Vstříkovací pochod vyvolává ve výstřiku dva druhy nerovnoměrností fyzikálně mechanických vlastností : anizotropii vlastností a nestatejnorodost (nehomogenitu) vlastností.

Důsledkem anizotropie je, že hodnota mechanické vlastnosti určitého elementu výstřiku, např. mez pevnosti v tahu, je závislá na směru stanovení, jak je schematicky znázorněno na obr. 16.



Obr. 16. Schema rozložení meze pevnosti v tahu elementu výstřiku

Anizotropie vlastností souvisí s orientací molekul. Jestliže zkušební těleso je namáháno tak, že lomová plocha vzniká kolmo na směr orientace molekul, dosahují mechanické vlastnosti extrémní hodnoty.

Nestatejnorodost vlastností je důsledkem toho, že hodnoty vlastností jsou funkcí souřadnic a že se mění od místa k místu, tedy :

$$\sqrt{P_x}(x,y,z) \neq \text{konst.}(x,y,z) \quad (33)$$

$$\sqrt{P_y}(x,y,z) \neq \text{konst.}(x,y,z) \quad (34)$$

$$\sqrt{P_z}(x,y,z) \neq \text{konst.}(x,y,z) \quad (35)$$

kde značí :

$\sqrt{P}$ - měřenou mechanickou nebo fyzikální vlastnost, např. mez pevnosti v tahu, hustotu apod.

x, y, z - souřadnicový systém

konst.- konstanta související s příslušnou měřencu vlastností.

Nestejnorodost vlastností je způsobována odlišnými technologickými podmínkami v různých místech dutiny vetřákovací formy.

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1. Volba druhu plastické hmoty

K experimentálním účelům byl zvolen lineární polyetylén z těchto důvodů :

1. Lignární polyetylén patří v technologii vytříkávání k nejdůležitějším druhům plastických hmot a je používán ve stále větší míře pro výrobu technických předmětů.
2. Je stálý v širokém rozmezí vytříkovacích teplot a všeobecně má dobré zpracovatelské vlastnosti. To umožňuje prostudovat vliv technologických parametrů v jejich velkém rozpětí.
3. Neabsorbuje prakticky žádnou vodu a proto není nutno provádět klimatizaci zkušebních těles.
4. Patří ke krystalizujícím plastickým hmotám, takže stanovené zákonitosti bude možné aplikovat i na jiné důležité hmoty této skupiny, jako jsou polypropylén, polyformaldehyd apod.

Už záměru provádět souběžné zkoušky jak s polyetylémem, tak s jednou amorfní plastickou hmotou, např. houževnatým polystyrénem, bylo po podrobnějším rozboru upuštěno, protože by neúměrně narostlo množství pokusů a práce by se stala nepřehlednou.

Byl používán lineární polyetylén značky "Rigidex" anglické firmy British Resin Products. Menší část pokusů byla provedena s typem Rigidex 15, hlavní část s typem Rigidex 50. Výrobce udává tyto nejdůležitější vlastnosti polyetylénu; tab.4.

Tab.4. Vlastnosti polyetylénu Rigidex 15 a Rigidex 50

Typ		Rigidex 15	Rigidex 50
Tavný index	(i_2)	1,5	5,0
Hustota	(g/cm^3)	0,96	0,96
Mez pevnosti v tahu	(kp/cm^2)	295	295
Rázová houževnatost (Izod)	(ftlb/in notch)	4	2
Teplota křehnutí	($^{\circ}C$)	- 110	- 73
Délka spirály při 220 $^{\circ}C$	(cm)	45	65

Z tabulky je zřejmé, že se oba typy polyetylénu liší hlavně technologickými vlastnostmi, to je zabíhavostí měření na spirále a tavným indexem.

Oba typy byly k dispozici ve formě granulí o průměru asi 2 mm a délce cca 2 mm. Rigidex 15 byl v přírodním odstínu barvy bez pigmentů, Rigidex 50 byl bíle pigmentován. Podle doporučení výrobce je Rigidex 15 vhodný jak pro vstřikování, tak pro vytlačování, Rigidex 50 je doporučován pro vstřikování.

Jeden zloučený provozní výrobek byl zhotoven z Rigidexu 50 černě pigmentovaného.

4.2. Volba zkoušební metody

Vlastnosti výstřiků mohou být hodnoceny z různých hledisek. K hodnocení se používá následujících nejdůležitějších zkoušek :

1. vizuelní zkoušky
2. mikroskopické zkoušky
3. zjišťování rozměrů a váhy
4. stanovení hustoty
5. sledování morfologických vlastností
6. mechanické zkoušky
7. chemické zkoušky
8. elektrické zkoušky
9. tepelné zkoušky
10. optické zkoušky

Z uvedených zkoušek je pro konstrukční praxi bezesporu nejdůležitější stanovení mechanických vlastností. Z nich mají u polyetylénu největší význam horní mez kluzu a tažnost. Horní mez kluzu, případně mez pevnosti v tahu, jsou měřeny na zkušebních tělesech zhotovených vstříkáním. Rozměry zkušebního tělesa jsou zřejmé z obr. 17. Tělesa těchto rozměrů nejsou však vhodná pro studování nestejnorodosti výstřiků. K tomu účelu je nutno používat těles co nejmenších rozměrů. Způsob jejich zhotovování je nutno vpracovat. Je třeba mít na paměti, že však tato mikrotělesa pro tahovou zkoušku, byť i se menších rozměrů, jsou stále ještě relativně velká, takže ani v tom případě není zcela vyloučena jejich nestejnorodost, což může mít nepříznivý vliv na měřené vlastnosti.

Zkušební tělesa pro stanovení rázové houževnatosti podle Izoda, jsou sice menších rozměrů, ale metoda může být použita jen u křehkých plastických hmot a nikoliv u houževnatých, k nimž polyetylén patří. V tom případě by bylo nutno měřit vrubovou houževnatost. Z praktických zkušeností je ale zná-

mo, že rázové zkoušky vykazují vysoký rozptyl měření. Tím vzniká nebezpečí, že chyba měření může být větší než vlastní kolísání vlastností vlivem nestejnorodosti výstřiku. Kromě toho příprava zkušebních těles s vrubem klade vysoké nároky na přesnost práce i na čas. Z obou důvodů bylo od rázových zkoušek upuštěno.

Z nauky o kovech je známo, že u těchto materiálů bývá mez pevnosti v tahu a mez pevnosti ve stříhu v určitém konstantním poměru. O používání pevnosti ve stříhu při zkoušení plastických hmot sice nejsou k dispozici téměř žádné konkrétní údaje, ale jeví se účelné přesvědčit se o vhodnosti této metody, neboť má přednosti v malém rozměru zkušebních těles, reprodukovatelnosti podmínek měření atd.

V praxi je často požadována taková zkušební metoda, která nevede k destrucci zkoušeného tělesa. K takovým metodám patří měření tvrdosti, které se i u plastických hmot, i když v menším měřítku, občas používá.

Nevýhodou měření makrotvrdosti je, že podle normy DIN 53456 má být tloušťka zkušebního tělesa 4 mm. To je ovšem u praktických výrobků jen málokdy splněno. Mimo to je nutné, aby tloušťka byla konstantní. Ani tento požadavek výstřiky často nesplňují. Při rozdílné tloušťce zkušebního tělesa se však mění průběh tluzných čar v objemu tělesa deformovaném při zkoušce a to vede k různým naměřeným hodnotám tvrdosti.

Kybníků [42] uvádí, že ke zkoušení plastických hmot je možno využít i stanovení mikrotvrdosti. Tato metoda má některé výhody: plocha vstisku je nepatrná, takže poškození povrchu výstřiku je zanedbatelné. Dále lze očekávat, že metoda může poskytnout dosti přesné údaje o stupni orientace

molekul a s tím spojené nestejnorodosti výstřiku, protože orientace je soustředěna v povrchových vrstvách a objem, který je při zkoušce mikrotvrdosti zasažen, leží rovněž při povrchu. Protože se používá velmi malých síl při zatížení, není konstantní tloušťka tělesa bezpodmínečně nutná.

Protože je změna mechanických vlastností výstřiků vlivem různých podmínek zpracování vyvolána orientací molekul (tepelné poškození hmoty během zpracování se předem vylučuje), je třeba mít k dispozici metodu, která by umožňovala kvantitativní měření orientace.

Podle literatury [3;31] se k tomuto účelu často používá stanovení dvojlómu v polarizovaném světle. Této metody může být použito jen u průhledných plastických hmot, nikoliv však u krystalických, které jsou neprůhledné.

Boukal [12] použil ke studiu orientace molekul rentgenografické metody.

Orthmann [36;37] a jiní autoři doporučují používat jako kritéria orientace molekul ve výstřiku smrštění zkoušebního tělesa při zehřívání na teplotu, která leží výše než je Vicatova teplota přelomu hmoty stanovená v glykolu. Všechny údaje o této metodě se týkají amorfních plastických hmot. Není proto předem jasno, zda jí bude možno použít i u krystalizujících hmot, které můžou v poměrně úzkém teplotním rozmezí.

Vhodnou metodou k hodnocení orientace může být penetrometrická metoda, která se osvědčila v jiné oblasti zkoušek. [27;47] Princip metody spočívá v tom, že ohřívání jehla je vtlačována konstantní silou do povrchu zkoušebního tělesa. Předností metody je, že objem tělesa zasažený při zkoušce je malý.

zatím co vlastnosti zbývající části tělesa nejsou zkouškou ovlivněny. Metoda se podobá Vicatově zkoušce stanovení tepelné odolnosti s tím rozdílem, že není zahříváno celé těleso, nýbrž jen jeho malá část v bezprostřední blízkosti jehly.

Teoretickým základem aplikace metody pro hodnocení stupně orientace molekul je tato úvaha : V důsledku přeskupování molekul během plnění dutiny vstříkovací formy jsou molekuly orientovány a přecházejí do stavu, který neodpovídá termodynamické rovnováze. Tento stav je fixován ochlazením. Při zvýšené pohyblivosti molekul se tyto snaží přejít do rovnovážného stavu. Jedná se o entropicko-elastickou změnu.

Je-li původní stav molekul charakterizován malou hodnotou entropie, která odpovídá uspořádanému stavu, dochází k deformaci molekul při nižší teplotě než u molekul s vyšší hodnotou entropie, to je neorientovaných molekul. Čím je orientace molekul vyšší, tím má tedy být hloubka vtisku jehly při určité teplotě větší. Naopak malá hloubka vpichu má charakterizovat nízký stupeň orientace.

O nehomogenitě výstřiků může poskytnout informace i stanovení hustoty v různých jeho částech. Metoda je nenáročná na zařízení a při tom je velmi citlivá. Proto je často i charakteristice výstřiků používána [28;50] .

Z praktického hlediska je třeba sledovat rozměry a váhu výstřiků v závislosti na technologických podmínkách vstřikování. Tato znalost je důležitá proto, že rozměry jsou v přímém vztahu k fyzikálně mechanickým vlastnostem výstřiku. Kolísání rozměrů i váhy výstřiků vyrobených v téže dutině vstříkovací formy je z praxe dobře známo.

Kolísání váhy bývá vysvětlováno stlačitelností tavenin plastických hmot, tedy zvýšením hustoty vlivem tlaku. Podle jiných názorů se však připouští i změny rozměrů výstřiku vlivem technologických podmínek.

Rozměry výstřiku závisejí na několika faktorech, z nichž jedny rozměry zmenšují, jiné zvětšují.

Do skupiny faktorů, které zmenšují rozměry, patří především vstřikovací teplota. Plastické hmoty mají několikanásobně vyšší koeficient α tepelné roztažnosti než kovy. Proto samotné zvýšení vstřikovací teploty při konstantním vnitřním tlaku má za následek zvětšení smrštění, tedy zmenšení rozměrů.

K těmto faktorům patří také teplota vstřikovací formy, která je důležitá hlavně u krystalizujících plastických hmot, protože ovlivňuje stupeň krystalinity. Ten stoupá se zvyšující se teplotou formy a proto se smrštění zvětšuje.

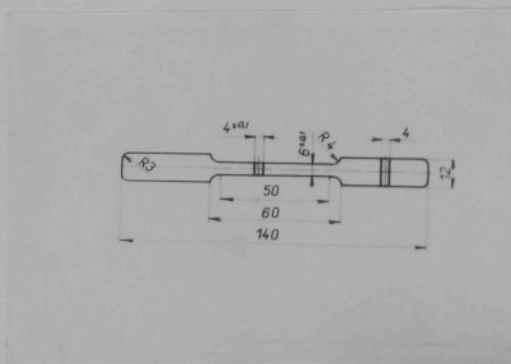
Ze skupiny faktorů, které smrštění zmenšují, je nejdůležitější vnitřní tlak. Během ochlazování taveniny v dutině formy dochází ke snižování vnitřního tlaku, a to urožňuje elastické odpružování původně stlačené taveniny. Čím je vnitřní tlak vyšší, tím je odpružení větší a smrštění výstřiku menší.

Tato úvaha se týká rozměrů výstřiku vázaných vstřikovací formou. U rozměrů nevázaných formou přistupují ještě elastické deformace vlastního uzavíracího ústrojí lisu. To vyvolává další, obtížně kontrolovatelné změny rozměrů.

4.3. Popis zvolených zkušebních metod

4.3.1. Horní mez kluzu a tažnost normalizovaných zkušebních těles

Ke stanovení horní meze kluzu a tažnosti bylo používáno normalizovaných zkušebních těles podle obr. 17, ČSN 640361



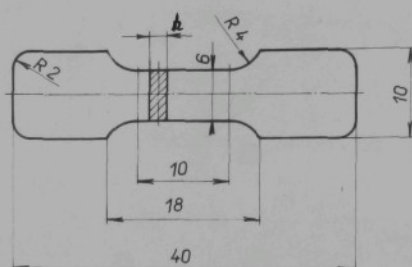
Obr. 17. Normalizované zkušební těleso pro tahovou zkoušku

Zkoušky byly provedeny na trhačím stroji FM 1000, výrobce VEB Thüringer Industriewerk, Rauenstein, DDR; rok výroby 1962. Stroj měl tři měřicí rozsahy síly, a to 0 až 200 kp, 0 až 500 kp, 0 až 1000 kp. Při zkouškách bylo používáno prvního rozsahu. Rychlost posuvu čelistí byla u stroje měnitelná od 10 do 90 mm/min. Bylo používáno rychlosti 90 mm/min.

Zkušební místnost nebyla klimatizována, takže teplota kolísala ve větším rozmezí než doporučují normy. Z pravidla je předepsována teplota 23 ± 1 °C, pohybovala se však v rozmezí 21 ± 2 °C.

4.3.2. Horní mez kluzu a tažnost měřená na mikrotělesech

Ke stanovení horní meze kluzu a tažnosti výstřiku v jeho různých místech bylo používáno mikrotěles podle obr. 18.



Obr. 18. Mikrotěleso pro tahovou zkoušku

Mikrotěleso vzniklo zkrácením měřené části normalizovaného tělesa na minimální rozměr. Ke zkouškám bylo použito trhacího stroje fy Werkstoffprüfmaschinen, Leipzig, který měl tři měřicí rozsahy, a to 0 až 50 kp, 0 až 100 kp a 0 až 250 kp. Stroj umožňoval přesnější měření, protože síla odpovídající horní mezi kluzu činila asi 40 kp. Trhací rychlost byla 90 mm/min., teplota místnosti 21 ± 2 °C.

Horní mez kluzu v případech 4.3.1. i 4.3.2. byla počítána podle vztahu

$$\sqrt{P_t} = \frac{P_t}{b \cdot h} \quad (36)$$

kde značí :

$\sqrt{P_t}$ - horní mez kluzu [kp/cm²]

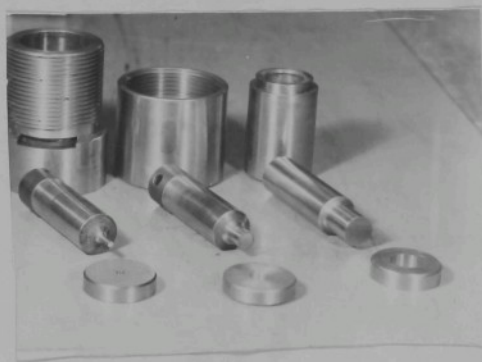
P_t - maximální síla dosažená při tahové zkoušce [kp]

b - šířka tělesa [cm]

h - tloušťka tělesa [cm]

4.3.3. Mez pevnosti ve stříhu

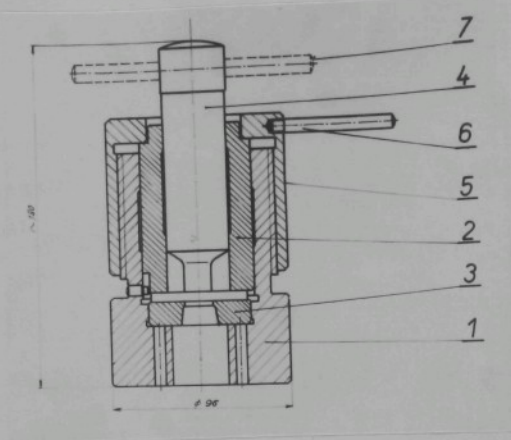
Podkladem metody pro stanovení pevnosti ve stříhu byla americká norma ASTM D 732-46. Ke zkouškám bylo použito střižného nástroje vlastní konstrukce podle obr. 19.



Obr.19. Střižný nástroj pro měření pevnosti ve stříhu

Sestava nástroje je na obr. 20. Nástroj sestává z vlastního tělesa 1, vodícího pouzdra 2, které slouží jednak k vedení průstřížníku 4, jednak přitlačuje zkoušený materiál k průstřížnici 3. Přitlačení pouzdra se dosahuje dotažením převlečné matice 5 opatřené k tomu účelu tyčí 6. Tyč 7 slouží k vytahování průstřížníku.

Jak průstřížník tak průstřížnice byly vyměnitelné, což umožnilo měnit průměr průstřížníku i střižnou vůli.



Obr. 20. Sestava střížného nástroje

Mez pevnosti ve stříhu byla počítána ze vztahu :

$$\tau_f = \frac{F_s}{\pi \cdot d_p \cdot h} \quad (37)$$

kde značí :

τ_f - mez pevnosti ve stříhu [kp/cm²]

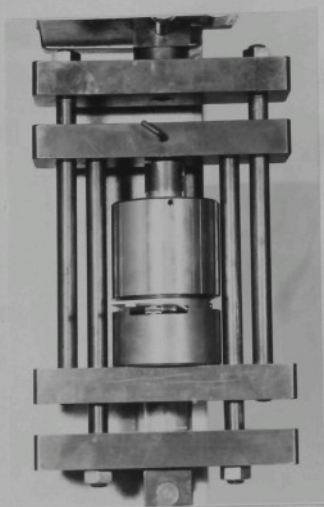
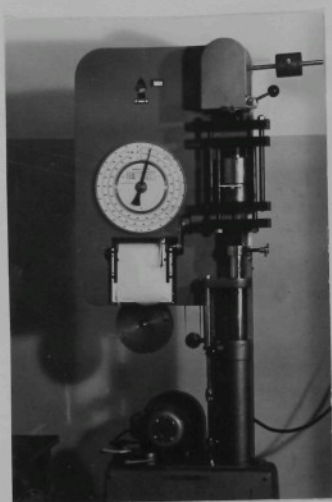
F_s - maximální sílu při stříhové zkoušce [kp]

d_p - průměr přestřížníku [cm]

h - tloušťku desky [cm]

Bylo používáno přestřížníku o průměru 15 mm, střížná vůle činila 0,03 mm. Podrobné zkoušky související s vypracováním metody jsou popsány v příloze 2 na konci zprávy.

Rychlost čelistí byla 90 mm/min., teplota místnosti 21 ± 2°C. Zkoušky byly provedeny na tržícím stroji FM 1000, síla měřena na střední stupnici, to je 0 až 500 kp. Zkušební trhací stroj a jeho detail se střížným nástrojem jsou na obr. 21.



Obr.21. Zkušební trhací stroj a detail se střižným nástrojem

4.3.4. Měření tvrdosti kuličkou

Protože nebyl k dispozici Brinellův tvrdoměr pro plastické hmoty, který se používá nejčastěji, bylo užito Rockwellova tvrdoměru pro kovy, jenž pracuje na obdobném principu. Pro měření byl přístroj částečně upraven. Úprava spočívala ve změnění zatěžovací síly, která byla volena tak, aby hloubka vtisku kuličky o průměru 5 mm činila asi 0,2 mm, jak předepisuje norma DIN 53456. Zatěžovací síla dosáhla konečné hodnoty během 2 vteřin. Hloubka vtisku byla stanovena po 10 resp. po 60 vteřinách působení síly. Předzatižení u přístroje činilo 10 kp místo 1 kp u přístrojů pro plastické hmoty, což ovlivnilo konečné hodnoty tvrdosti. Přebudování přístroje v tomto smyslu však nebylo proveditelné.

Postup měření byl následující : Měřené těleso bylo vloženo na stolek přístroje a otáčením stolku bylo přitisknuto ke kuličce, až ručička indikátoru překročila nulovou značku o 2 dílky. Vlivem plastického tečení hmoty se ručička vracela zvolna zpět. V okamžiku, kdy dosáhla nuly, byla na těleso vložena zatěžovací síla, která působila 10 příp. 60 vteřin. Po zrušení síly a uplynutí dalších 60 vteřin se odečetla hloubka vtisku s přesností na tisíciny milimetru.

Tvrdoost byla počítána ze vztahu

$$HR = \frac{P_R}{\pi \cdot d_R \cdot h_R} \quad (38)$$

kde značí :

HR - tvrdoost 5/31,25/10 resp. 5/31,25/60 [kp/cm²]

P_R - zatěžovací síla 31,25 kp

d_R - průměr kuličky, 0,5 cm

h_R - hloubka vtisku kuličky [cm]

Pokusy byly provedeny v místnosti s klimatizací při teplotě 21 ± 1 °C a relativní vlhkosti vzduchu 60 ± 5 %.

4.3.5. Měření mikrotvrdoosti

K měření mikrotvrdoosti bylo použito sovětského mikrotvrdoměru PNT 3, který pracuje na principu Vickersovy metody. Zatěžovací síla činila 50, příp. 100 p. Větší síly nebylo možno použít, protože plocha vtisku byla potom větší než zorné pole okuláru.

Již první pokusy ukázaly, že použití metody bez předběžné úpravy povrchu zkutebního tělesa, není možné. Hlavní cíl úpravy spočíval ve vytvoření takového povrchu, na němž by byly

hrany vtisku zřetelné. Nejvhodnějším způsobem úpravy se ukázalo pokovování tělesa ve vakuu parami hliníku. Tloušťka nanesené vrstvy činila jen několik desítek angstrémů, takže její vliv na výsledky mikrotvrdosti byl zanedbatelný, jak bylo ověřeno pokusy. [62]

Mikrotvrdost byla vypočítána ze vztahu

$$HV = \frac{1\,855 \cdot P_V}{a^2} \quad (39)$$

kde je :

HV - mikrotvrdost [kp/mm^2]

1 855 - konstanta přístroje

P_V - zatěžovací síla [kp]

a - délka uhlopříčky otisknutého hranolu [mm]

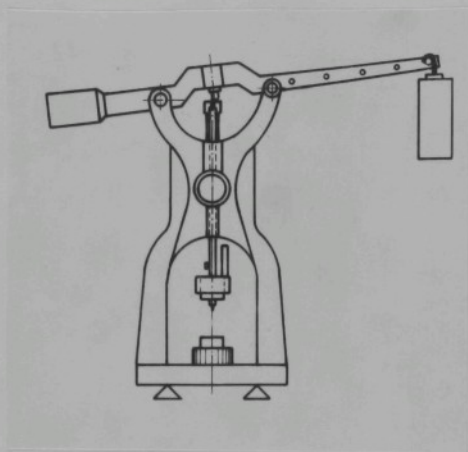
4.2.6. Stanovení hustoty

K stanovení hustoty bylo použito flotační metody. Její princip je následující : V místnosti s konstantní teplotou $21 \pm 1^\circ C$ byla měřená tělesa vložena do roztoku destilované vody a metylalkoholu. Přikapáváním vody nebo metylalkoholu byla vytvořena taková hustota roztoku, že se tělesa v kapalině začala vznášet. V tomto okamžiku, kdy hustota tuhých těles i kapaliny byla shodná, byla hustota kapalně fáze stanovena pyknometricky.

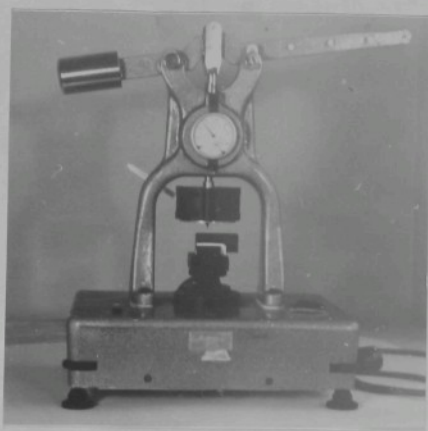
Přesnost metody byla velice dobrá. Rozlišení těles s jen nepatrně se odlišující hustotou bylo umožněno tím, že v kádince s kapalinou se současně nacházelo větší množství měřených těles, takže bylo snadné je navzájem oddělit.

4.3.7. Penetrometrická měření

K měření bylo použito přístroje, jehož schema je na obr. 22. a přístroj je na obr. 23.



Obr.22. Schema penetrometru



Obr.23. Penetrometrický přístroj

Penetrometr vznikl úpravou Höpplerova konsistometru. Podstatnou součástí přístroje byla jehla o průřezu 1 mm^2 zakončená vrcholem o úhlu asi 60° . Jehla byla vsazena do hliníkového tepelného reservoáru, který byl vyhříván elektricky. Teplota stoupala rychlostí 4°C za minutu. Během vlastních měření byla teplota měřena rtuťovým teploměrem vloženým do reservoáru. Protože tato teplota neodpovídala teplotě na špičce jehly, byly nejdříve údaje rtuťového teploměru okalibrovány termočlánkem připojeným ke špičce jehly.

Hloubka vtisku byla odečítána na indikátoru s přesností na $0,01 \text{ mm}$ při teplotách jehly $100, 105, 110, 115$ a 120°C . Při vyšší teplotě jehla pronikala do měřeného tělesa nekontrolovatelně rychle.

Celková zatěžovací síla včetně váhy tyče s reservoárem činila 3 kp . Protože má jehla malou tepelnou kapacitu, byla měření prováděna v klimatizované místnosti s teplotou $21 \pm 1^\circ\text{C}$.

Aby byla eliminována tepelná roztažnost funkčních částí přístroje, byl nejprve zahřát na teplotu asi 150°C , načež volně vychladl asi na 70°C , kdy bylo topení znovu zapnuto. Při teplotě 90°C bylo vloženo zkušební těleso pod jehlu penetrometru a při dosažení teploty 100°C byla odečtena první hodnota hloubky vpíchu.

4.3.8. Rentgenografická měření

Rentgenografická měření byla provedena na mikrorentgenu Mikrometa, výrobek n.p. Chirana v Modřanech. Jako zdroje záření bylo použito kobaltové rentgenové lampy se železným filtrem. Difrakční obrazy byly zaznamenány na film Agfa-Laue

s oboustrannou emulzí. Film byl od zkušebního tělesa vzdálen 30 mm, expoziční doba činila 6 hod.

4.3.9. Měření délky a váhy

Rozměry zkušebních těles byly měřeny odpovídajícím mikrometrem s přesností na 0,01 mm. K vážení bylo používáno analytických vah s přesností 0,0001 g.

4.3.10. Stanovení fluidity

Fluidita polyetylénu byla stanovena pouze v jediném případě na vytlačovacím plastoměru při teplotě 200 °C a zatížení 10 kp/cm². Tryska měla průměr 1 mm a délku 6 mm.

4.3.11. Měření smrštění za tepla

Smrštění za tepla bylo měřeno v glycerinové lázni při teplotě 135 °C. Zkušební tělesa byla ohřívána na tuto teplotu po dobu 10 min. Další prodloužení ohřevu již hodnotu smrštění neovlivnilo.

4.3.12. Smrštění výstřiků

Smrštění výstřiků je dáno poměrem rozdílu délky dutiny vstřikovací formy a odpovídající délky výstřiku k délce dutiny formy při 20 °C, tedy :

$$s = \frac{l_0 - l}{l_0} \cdot 100 \quad (40)$$

kde značí :

s - srážení výstřiku [%]

l_0 - rozměr dutiny vstřikovací formy při teplotě 20 °C [cm]

l - odpovídající rozměr výstřiku při stejné teplotě [cm]

4.4. Volba základních výstřiků a volba zkušebních těles

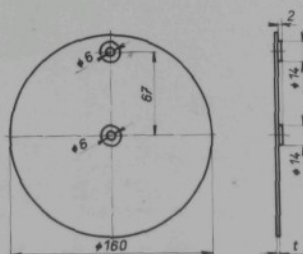
Ke zkouškám bylo používáno následujících základních výstřiků :

4.4.1. Zkušební těleso pro tahovou zkoušku.

První serie pokusů byla provedena se zkušebním tělesem pro tahovou zkoušku znázorněném na obr. 17.

4.4.2. Kotouč o průměru 160 mm a nastavitelné tloušťce l a 2 mm. Skutečná tloušťka však byla ve většině případů větší než nastavená.

Kruhová deska byla zvolena proto, že tento tvar je z teoretického hlediska nejjednodušší. Tvar kotouče je zřejmý z obr. 24.



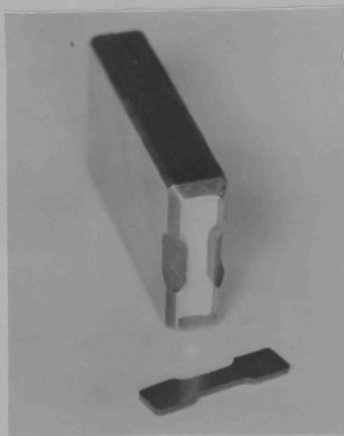
Obr. 24. Zkušební kotouč o průměru 160 mm

4.4.3. Pravoúhlá deska o rozměrech 120 x 120 x 2 mm.

4.4.4. Dva výstřiky byly odebrány přímo z provozní výroby, a to dětská loupací vanička a kryt topení osobního automobilu.

4.4.5. K vyhodnocení vlastností bylo nutno někdy používat přizpůsobená zkušební tělesa. Jednalo se o tyto případy :

Stanovení meze kluzu na mikrotělesech : Základní tvar mikrotělesa je na obr. 18. Těleso bylo z požadovaného místa výstřiku vyseknuto vysekávacím nožem, který je na obr. 25.



Obr.25. Vysekávací nůž na mikrotělesa

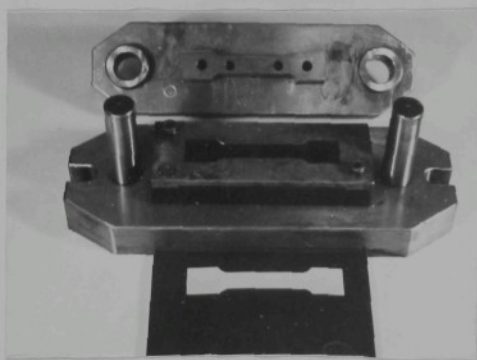
Na těchto tělesech bylo také měřeno smrštění za tepla.

Stanovení meze pevnosti ve stříhu : Ze základního výstřiku byly vyříznuty pásy o šířce asi 50 mm libovolné délky, které byly vkládány do střížného nástroje. Vystřižené kotoučky o průměru 15 mm byly použity pro stanovení hustoty.

Pro stanovení tvrdosti, mikrotvrdosti a penetrometrických hodnot nebyl tvar základních výstřiků upravován.

Rentgenografická měření byla provedena na dvou vrstvách o tloušťce 0,2 mm, které byly ze zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku seříznuty na mikrotomu.

Vhodnost střížové zkoušky byla ověřena na deskách z lineárního polyetylenu vyrobených vytlačováním. Zkušební tělesa pro tahovou zkoušku byla vyrobena pomocí střížného nástroje podle obr. 26.



Obr.26. Střížný nástroj pro zhotovování zkušebních těles z vytlačených desek

Tato tělesa měla šířku měřené části 18 mm, délku 50 mm.

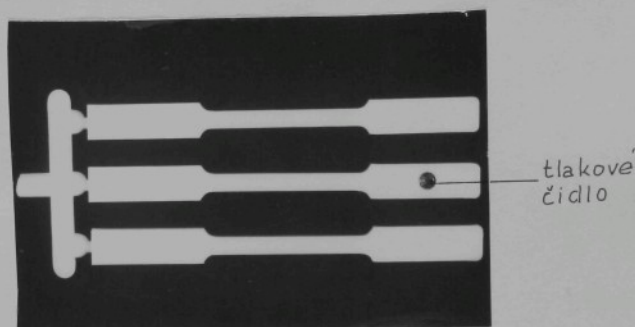
Byla použita pouze v kapitole 6.2.

4.5. Způsob zhotovení zkušebních výstřiků a technologické podmínky při vstřikování

4.5.1. Zkušební těleso pro tahovou zkoušku

Zkušební těleso bylo vstřikováno na trojnásobné vstři-

kovací formě. Uspořádání výstřiků je zřejmé z obr. 27.



Obr.27. Uspořádání kompletního výstřiku těles pro tahovou zkoušku

Tělesa byla vstřikována na lisu LTR 4714, výrobce TOS n.p. Rakovník. Lis měl tyto nejdůležitější parametry :

maximální objem výstřiku	100 cm ³
zavírací síla	47 Mp
vstřikovací síla	10,5 až 14 Mp

Forma se uzavírala horizontálně, směr vstřikování byl vertikální. Jednalo se o starší lis se vstřikovacím pístem bez předplastikace.

Tělesa byla vstřikována z Rigidexu 15, který byl zvolen proto, že má nízkou tekutost a tedy vyšší citlivost vůči podmínkám zpracování.

V rámci práce byly zvoleny následující podmínky vstřikování :

4.5.1.1. Vstřikovací teplota : 160, 180, 200, 220, 260 °C

Tavicí komora lisu byla vyhřívána elektrickým odporovým topením rozděleným do tří pásem, z nichž každé bylo udržováno na požadované teplotě pomocí padáčkového regulátoru. Teplota vstřikovací trysky byla kontrolována termočlánkem železo-konstantán.

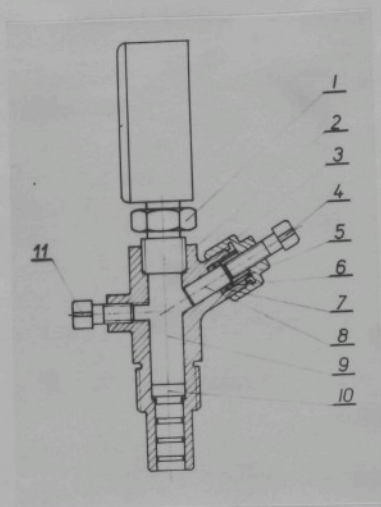
Protože všechna čidla byla umístěna ve stěně tavicí komory, byla ještě měřena při každé serii měření skutečná teplota taveniny. Postup byl následující : Při rovnoměrném vstřikovacím cyklu bylo množství taveniny, odpovídající jednomu vstřikovacímu cyklu, vystříknuto na místo do dutiny formy do volného prostoru před tryskou. Teplota taveniny byla změřena termočlánkem Fe-Ko vloženým do injekční jehly, která umožňovala jeho snadné vpíchnutí do taveniny. Takto stanovená teplota byla vždy o několik stupňů vyšší než údaj termočlánku v trysce komory.

Rozsah vstřikovací teploty byl vymezen možnostmi zhotovit kvalitní výstřiky. Spodní teplota byla určena tím, že při ještě nižší teplotě již nebyla tělesa úplná, horní hranice byla dána teplotou, kdy se tvořily neúměrně tlusté přetoky v dělicí rovině formy.

4.5.1.2. Vstřikovací tlak : 570, 670, 750 kp/cm²

Rozsah použitého vstřikovacího tlaku byl určen možnostmi měnit tlak v hydraulickém válci lisu. Pro zkoušky bylo využito celého možného rozsahu. Uvedený vstřikovací tlak odpovídá tlaku na čele vstřikovacího pístu. Mimo to byl měřen tlak taveniny v trysce tavicí komory. Princip tohoto měření je zřejmý z obr. 28: Tlak taveniny je přenášen pístem 10 do kapaliny 9, v tomto případě silikonové vazelíny, která dále

působí na manometr 1.

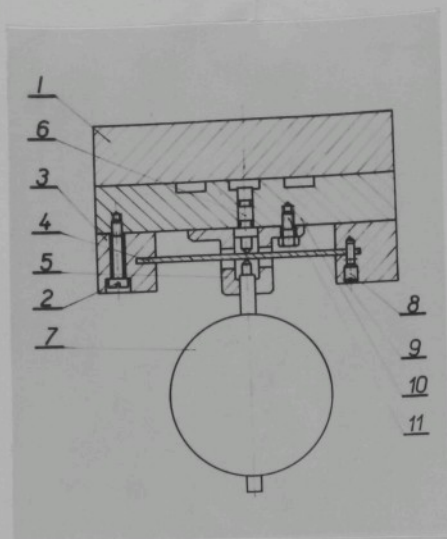


Obr.28. Princip měření tlaku
taveniny v trysce tavicí komory

4.5.1.3. Teplota vstřikovací formy : 20, 70 °C

Teplota vstřikovací formy byla udržována na zvolené výši pomocí obíhající temperované vody s přesností na ± 1 °C. K regulaci bylo používáno Höpplerova ultratermostatu. Teplota vstřikovací formy byla ještě kontrolována rtuťovým teploměrem.

Forma umožňovala měřit tlak přímo v dutině středního výstřiku. Umístění čidla je zřejmé z obr. 27. a jeho princip je na obr. 29. Tavenina v tomto případě působí na píst 6, jehož posuv se přenáší na ocelový nosník 4. Z jeho průhybu, měřeného pomocí setnového indikátoru 7 se vypočítal vnitřní tlak v dutině formy.



Obr.29. Způsob měření tlaku
v dutině vstříkovací formy

4.5.1.4. Průměr ústí vtoku : 1,2,3,4 a 6 mm

Zkušební tělesa byla vstříkována polokruhovým ústím vtoku o průměru 1,2,3,4,a 6 mm. Základní řada zkoušek byla provedena s ústím o průměru 4 mm. Délka ústí vtoku byla ve všech případech 1,5 mm.

4.5.1.5. Délka vstříkovacího cyklu : 60 vteřin

Vstříkovací cyklus trval vždy 60 vteřin. Doba plnění, dotlačování a chlazení činila celkem 30 vteřin, dalších 30 vteřin bylo vyhrazeno pro manipulaci tj. vyjmutí výstřiku z dutiny atd. Doba dotlačování nebyla měněna a vstříkovací tlak byl udržován na maximální výši po celou dobu chlazení, tedy prakticky 30 vteřin. Tlak působil na taveninu v dutině formy až do bodu zatuhnutí, čímž byl jeho vliv na vlastnosti výstřiku maximální.

4.5.2. Kotouč o průměru 160 mm

Kotouč byl vstříkován z Rigidexu 50. Jeho zabíhavost byla lepší než Rigidexu 15, což bylo výhodné z ohledem na poměrně velkou plochu kotouče.

Kotouč byl vyráběn na jednodušební vstříkovací formě se středovým vtokem. Ke vstříkování bylo použito horizontálního vstříkovací lisu PECO 21 MR, vybaveného žnekovou předplasticí. Výrobce udává tyto charakteristiky lisu :

maximální objem výstřiku	84 cm ³
vstříkovací rychlost	107 cm ³ /sec
uzavírací síla	81,5 Mp

Při vstříkování byly zvoleny následující technologické podmínky :

4.5.2.1. Vstříkovací teplota : 180, 200, 220, 240 °C

Tavící komora lisu byla rozdělena do tří samostatně vyhřívanych pásem, ve kterých byla teplota udržována regulátory typu Gardsmen s měřicím rozsahem 0 až 400 °C. Teplota taveniny byla kontrolována vpichovacím termočlánkem (viz 4.5.1.1.). V tomto případě umožňovala konstrukce lisu vložit termočlánek přímo do otvoru trysky tavící komory. Když byla tavenina vytlačována do volného prostoru, obtékala termočlánek, takže ztráty tepla byly minimální. Údaje teploty termočlánku a regulátorů se velmi dobře shodovaly.

Spodní a horní vstříkovací teplota byly určeny podobně jako v 4.5.1. dobrou kvalitou výstřiku.

4.5.2.2. Vstříkovací tlak: 230 až 680 kp/cm²

Vstříkovací tlak byl měněn regulováním tlaku hydraulické kapaliny vstříkovacího ústrojí lisu. Z něho byl počítán tlak

na čele šneku. Tlak v trysce nebylo možno měřit. Výše vstříkovacího tlaku bylo nutné volit v závislosti na vstříkovací teplotě a na tloušťce kotouče. Proto nebylo možné vstříkovat libovolně voleným tlakem při jakýchkoliv jiných technologických veličinách.

4.5.2.3. Tloušťka kotouče : 1 a 2 mm

Vstříkovací forma umožňovala svou konstrukcí měnit tloušťku kotouče v rozmezí 1 až 2 mm. Značný se dosáhlo vkládáním kovové vložky do dutiny formy. Skutečná tloušťka kotouče se ovšem od nastavených hodnot ve většině případů lišila.

Do dutiny formy byla zabudována dvě tlaková čidla, jedno naproti ústí vtoku, druhé na okraji kotouče (viz obr. 24). Tlak byl měřen stejným způsobem jak je znázorněno na obr. 28.

4.5.2.4. Teplota vstříkovací formy : 50 a 90 °C

Teplota vstříkovací formy byla regulována obíhající vodou temperovanou v Höpplerově ultratermostatu.

4.5.2.5. Průměr ústí vtoku : 1, 2, 3 a 5 mm

Kotouč byl vstříkován středovým vtokem. Vložka ústí vtoku byla vyměnitelná, což umožňovalo rychlou změnu průměru ústí vtoku. Kruhové ústí mělo průměr 1, 2, 3 a 5 mm.

4.5.2.6. Délka vstříkovacího cyklu : 90 vteřin

Vstříkovací cyklus trval celkem 90 vteřin, z toho doba plnění, dotlačování a chlazení 40 vteřin, 5 vteřin předplastizace a 45 vteřin manipulační práce. Doba 40 vteřin byla delší než nejdelší doba potřebná k zatuhnutí ústí vtoku o průměru 5 mm, která byla vypočítána teoreticky. (Viz 6.4)

4.5.3. Pravouhlá deska 120 x 120 x 2 mm

Deska byla vyráběna z Rigidexu 50 na vstřikovacím lise Eckert-Ziegler EZ VII. Lis byl používán pro laboratorní účely a jeho maximální objem výstřiku činil asi 35 cm³. Jednalo se o horizontální pístový lis bez předplasticace.

Při vstřikování desek bylo používáno stejných regulačních prvků jako v kap. 4.5.1. a 4.5.2. a technologické faktory byly následující :

4.5.3.1. Vstřikovací teplota : 160, 180, 200, 220, 240 °C

K regulaci bylo použito dvou padáčkových regulátorů, teplota taveniny byla kontrolována vpíchovacím termočlánkem Fe-Ko.

4.5.3.2. Vstřikovací tlak : 640 kp/cm²

Zkoušky byly provedeny při konstantním vstřikovacím tlaku 640 kp/cm². Byl kontrolován podle údajů manometru typ Prema, jehož přesnost byla 2 1/2 %. Vstřikovací forma nebyla vybavena zařízením k měření vnitřního tlaku.

4.5.3.3. Teplota vstřikovací formy : 10, 50, 90 °C

Teplota byla udržována pomocí obíhající vody z Höpplerova ultratermostatu. V případě teploty 10 °C bylo jako chladicího media obíhající vody použito ledu.

4.5.3.4. Průměr ústí vtoku : 2 mm

Deska byla vstřikována středovým vtokem kruhového tvaru o průměru ústí 2 mm, což odpovídá zásadám konstruktérské praxe.

4.5.3.5. Tloušťka desky : byla konstantní 2 mm

4.5.3.6. Vstřikovací cyklus : 60 vteřin

Vstřikovací cyklus trval celkem 60 vteřin, z toho 30 vteřin činila manipulace. Vstřikovací tlak působil na taveninu v dutině formy až do okamžiku těsně před otevřením formy.

4.5.4. Provozní výstřiky

Technologické podmínky vstřikování u výrobků odebraných v provozu nebyly známy, protože v okamžiku odebrání již byly výrobky dohotoveny. Oba výstřiky, tj. dětská koupací vanička a kryt topení motorového vozidla, byly vyrobeny v n.p. Plasti-mat v Liberci. Oba byly z lineárního polyetylénu Rigidex 50. Vanička byla přesně ze stejné šarže polyetylénu jako zkušební kotouč a zkušební deska, kryt topení byl vyroben z Rigidexu 50, který byl černě pigmentován.

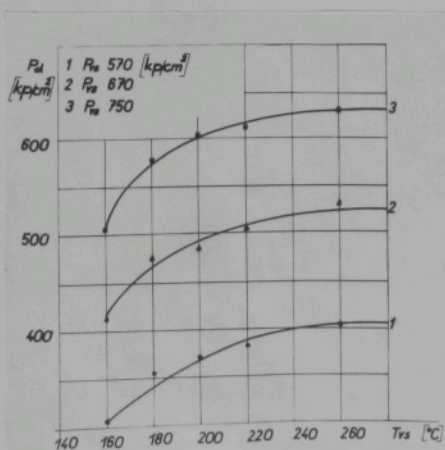
4.6. Výsledky experimentálních měření

4.6.1. Výsledky měření na zkušebním tělese pro tahovou zkoušku

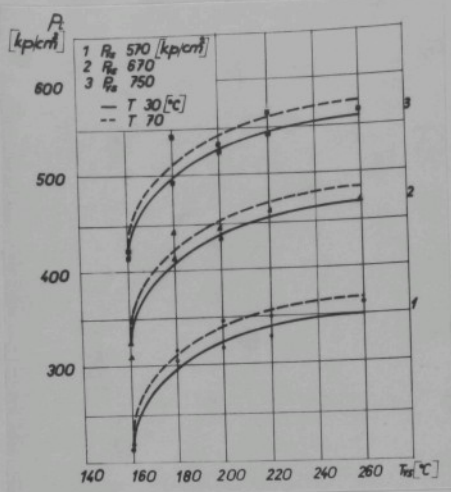
4.6.1.1. Zjištění vztahu mezi technologickými faktory

Aby bylo možno správně zhodnotit vliv technologických faktorů na vlastnosti výstřiku, bylo nejprve nutno zjistit závislost vnitřního tlaku na ostatních faktorech vstřikování. Jednalo se hlavně o závislost vnitřního tlaku na vstřikovací teplotě, na vnějším vstřikovacím tlaku, na teplotě vstřikovací formy a na průřezu ústí vtoku.

Závislost maximálního tlaku v trysce tavicí komory P_d a vnitřního tlaku P_i v závislosti na sledovaných faktorech je na obr. 30 a 31. Průměr ústí vtoku byl v obou případech 4 mm. Podrobné údaje jsou v tabulce 35 v příloze 5.



Obr.30. Závislost P_d na T_{ms} a P_i



Obr.31. Závislost P_i na T_{vs} , P_{vs} a T_f

Jak je z obr. 30 a 31 zřejmé, způsobuje zvýšení vstřikovací teploty T_{vs} současně vzrůst tlaku, a to jak v trysce tavicí komory P_d , tak i vnitřního tlaku P_i ve vlastní dutině formy. Příčina spočívá v tom, že při stoupající teplotě klesá viskozita taveniny, což má za následek snížení ztrát tlaku při toku taveniny jak tavicí komorou tak i vlastní dutinou formy.

Relativní zvýšení tlaků v procentech způsobené změnou vstřikovací teploty ze 160 na 260 °C při teplotě vstřikovací formy $T_f = 30$ °C udává tabulka 5. Hodnoty tlaků při $T_{vs} = 160$ °C byly považovány za 100 %.

Z tabulky vyplývá, že zvýšení vstřikovací teploty se projevilo hlavně změnou vnitřního tlaku. Znena byla nejmarkantnější při nízkém vstřikovacím tlaku.

Tab.5. Relativní zvýšení P_d a P_i způsobené změnou T_{vs} ze 160 na 260 °C; $T_f = 30$ °C

P_{vs} (kp/cm ²)	570	670	750
Zvýšení P_d v %	131	130	125
Zvýšení P_i v %	160	151	135

Dále bylo ověřeno, jak je vnitřní tlak ovlivňován průměrem ústí vtoku d_u . Zkoušky byly provedeny za následujících podmínek : $T_{vs} = 220$ °C, $P_{vs} = 670$ kp/cm², což odpovídá $P_d = 505$ kp/cm², $T_f = 30$ °C. Výsledky jsou v tabulce 6.

Tab.6. Vliv průměru ústí vtoku d_u na vnitřní tlak P_i

d_u [mm]	1	2	3	4	6
P_i (kp/cm ²)	288	405	425	466	452

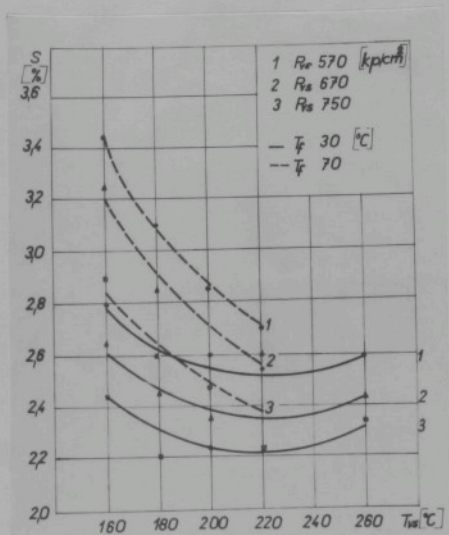
Jak ukazuje tab. 6, dochází v ústí vtoku o průměru 1 mm k velkým ztrátám tlaku. Naproti tomu ztráty u průměrů větších než 2 mm ovlivňují tlak v dutině formy poměrně málo a převládajícím vlivem se pravděpodobně stávají ztráty ve vlastní dutině formy.

Zvýšení teploty vstřikovací formy ze 30 na 70 °C se projevilo jen malým vzrůstem vnitřního tlaku. Zvýšení představovalo asi 20 kp/cm².

4.6.1.2. Závislost smrštění a rozměrů výstřiků na technologických faktorech

Závislost smrštění výstřiku s ve směru jeho podélné osy na sledovaných technologických veličinách je na obr. 32.

Průměr ústí vtoku byl konstantně $d_u = 4$ mm. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 36, příl. 6.



Obr. 32. Závislost s na T_{ve} , P_{vs} a T_f

Smrštění výstřiku v příčném směru nebylo možno spolehlivě změřit, protože hodnoty vykazovaly příliš velký rozptyl. Příčina spočívala v konicitě jak dutiny vstříkovací formy, tak i výstřiku, takže přesné rozměry ani v prvním ani v druhém případě nebylo možno stanovit. Velmi zhruba bylo zjištěno, že smrštění v příčném směru činilo asi 65 až 80 % příslušné hodnoty v podélném směru. Kolísání hodnot však nedovolilo stanovit závislost příčného smrštění na podmínkách vstříkování.

Proto byla zjištěna závislost příčného průřezu $\bar{X}_F$ ve střední zúžené části zkušebního tělesa na podmínkách vstříkování. Průřez je udáván jako průměrná hodnota ze tří míst na pěti různých tělesech, jedna hodnota tedy představuje průměr z 15 měření. Variční koeficient $V_F = \pm 0,15$ %; směrodatná

odchylka $\pm 0,04 \text{ mm}^2$. Výsledky jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7. Závislost F na T_{vs} , P_{vs} , T_f ; $du = 4 \text{ mm}$

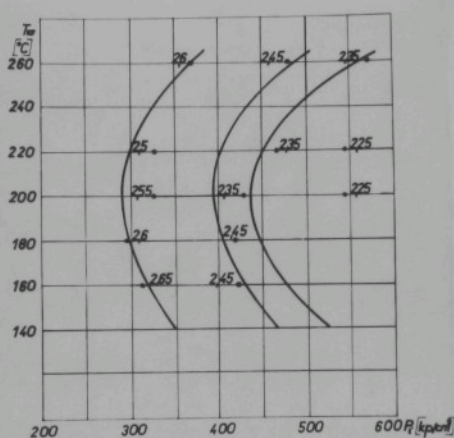
		$F \text{ (mm}^2\text{)}$				
T_{vs}	$[^{\circ}\text{C}]$	160	180	200	220	260
$P_{vs} = 570 \text{ kp/cm}^2$						
$T_f = 30^{\circ}\text{C}$		24,82	25,09	25,28	25,36	25,43
$T_f = 70^{\circ}\text{C}$		24,79	24,89	24,97	25,18	-----
$P_{vs} = 670 \text{ kp/cm}^2$						
$T_f = 30^{\circ}\text{C}$		24,88	25,12	25,30	25,40	25,48
$T_f = 70^{\circ}\text{C}$		24,87	24,95,	25,05	25,23	-----
$P_{vs} = 750 \text{ kp/cm}^2$						
$T_f = 30^{\circ}\text{C}$		24,91	25,18	25,38	25,48	25,54
$T_f = 70^{\circ}\text{C}$		24,90	25,00	25,11	25,27	-----

Na základě obr. 32 a tab. 7 je možno učinit tyto závěry:

1. Rozměry vstříků v podélném i příčném směru se mění při vstřikování podle stejných závislostí.
2. Zvýšení vstřikovacího tlaku způsobuje ve všech případech zvětšení rozměrů v podélném i příčném směru.
3. Stoupající teplota vstřikovací formy má naopak za následek zmenšení rozměrů, tzn. zvětšení smrštění. Vliv je nejzřetelnější při nízkých vstřikovacích teplotách, při vyšších se vliv zmenšuje.
4. Vliv vstřikovací teploty je do jisté míry překvapující. Pro sledovaný rozsah teploty je možno usoudit, že zvyšování vstřikovací teploty způsobuje zvětšování rozměrů, tj. pokles smrštění. Vysvětlení spočívá v tom, že při stoupající vstřikovací teplotě stoupá i vnitřní tlak, jakbylo

uvedeno v 4.6.1.1.

Zajímavou se také jeví závislost podélného smrštění na vnitřním tlaku a na vstřikovací teplotě, která je na obr.33.



Obr.33. Závislost podélného smrštění ϵ na vnitřním tlaku P_i a vstřikovací teplotě T_{vs}

I když je nutno brát závislost na obr. 33 zdrženlivě, protože nebylo k dispozici dostatečné množství měření, zdá se, že v oblasti nízkých vstřikovacích teplot převládá vliv stoupajícího tlaku. Ten se mění v této oblasti s teplotou nejrychleji. Při vyšší vstřikovací teplotě však začne převládat vliv stoupající teploty, takže smrštění se s teplotou zvětšuje.

Zjištění vlivu průměru ústí vteku na podélné smrštění a na příčný průřez tělesa slouží k ověření předcházejících výsledků. Hodnoty udává tab. 8. Technologické podmínky byly následující : $T_{vs} 220^\circ\text{C}$, $P_{vs} 670 \text{ kp/cm}^2$, $T_f 30^\circ\text{C}$.

Tab.8. Závislost podélného smrštění s a příčného průřezu tělesa F na průměru ústí vtoku du

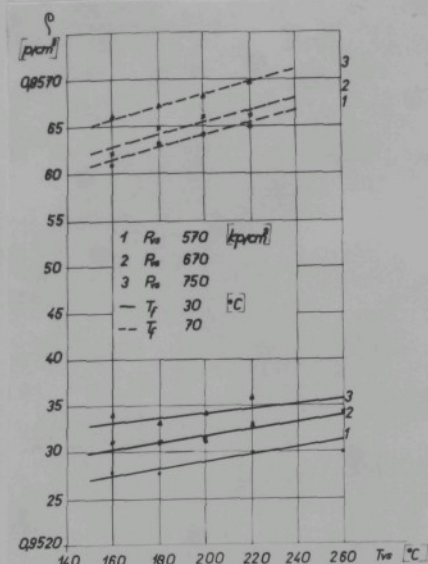
du [mm]	1	2	3	4	6
s [%]	3,45	3,00	2,57	2,35	2,30
F [mm ²]	24,68	25,24	25,31	25,40	25,60

Podle očekávání má zvětšování průměru ústí vtoku za následek zvětšení rozměrů zkušebního tělesa. Příčina spočívá jednak ve zvýšení vnitřního tlaku, jednak v prodloužení doby dotlačování a s tím souvisejícím zvýšením vnitřního tlaku v bodě zatuhnutí.

4.6.1.3. Závislost váhy a hustoty zkušebních těles na podmínkách vstřikování

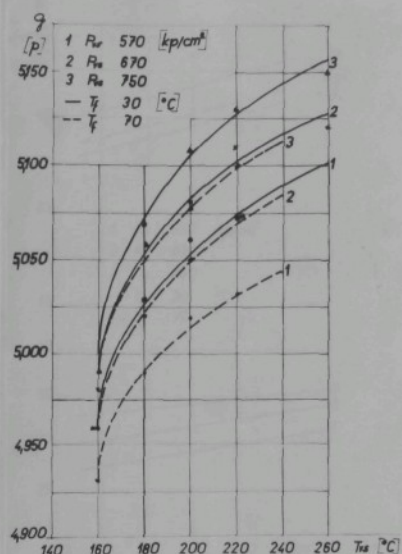
Aby bylo možno učinit správné závěry o vlivu podmínek vstřikování na váhu výstřiku, bylo nutno stanovit také závislost hustoty na sledovaných technologických faktorech. Výsledky jsou zřejmé z obr. 34 a 35 a z tab. 9. Hustota byla měřena ve střední části tělesa. Průměr ústí vtoku : $du = 4$ mm.

Podrobné hodnoty měření jsou uvedeny v tab. 37 v příloze 7. Průměrný variační koeficient stanovení hustoty činí
 $V_p = \pm 0,02 \%$, stanovení váhy $V_g = \pm 0,06 \%$.



Obr.34.

Závislost hustoty ρ a váhy g zkutečného tělesa na vstříkovací teplotě T_{vs} , vstříkovacím tlaku P_{vs} a teplotě vstříkovací formy T_f



Obr.35.

Tab.9. Vliv průměru duté vstřiky d_u na hustotu ρ a váhu g zkutečného tělesa

$T_{vs} = 220 \text{ } ^\circ\text{C}$, $P_{vs} = 670 \text{ kp/cm}^2$, $T_f = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$

d_u [mm]	1	2	3	4	6
ρ [p/cm ³]	0,9529	0,9533	0,9533	0,9533	0,9533
g [p]	4,8404	4,9885	5,0260	5,1163	5,1317

Rozbor výsledků ukázal, že hustota vstříků při nízké teplotě vstříkovací formy nebyla prakticky ovlivněna vstříkovací teplotou. Při vyšší teplotě vstříkovací formy však zvyšující se vstříkovací teplota způsobila nepatrný vzrůst hustoty. Vzrůst ovšem byl téměř na hranici chyby stanovení.

Podobně zvýšení vstřikovacího tlaku způsobilo při jinak stejných podmínkách vstřikování nepatrný vzrůst hustoty. Z hlediska technické praxe jsou však změny hustoty tak malé, že mohou být ve většině případů zanedbány. Pouze při přesnějších výzkumech je nutné s nimi počítat.

Teplota vstřikovací formy se projevila zřetelně. Ve všech sledovaných případech byla hustota výstřiků při teplotě formy 70 °C vyšší než při 30 °C. Zvýšení hustoty představovalo asi 0,3 %.

Rovněž vliv sledovaných technologických faktorů na váhu zkušebních těles byl jednoznačný. Jak zvýšení vstřikovací teploty, tak i zvyšování vstřikovacího tlaku mělo za následek zvětšení váhy výstřiků. V souvislosti s předcházejícími výsledky je zřejmé, že hlavní úlohu při tom hraje zvětšování objemu výstřiku. Když byla váha výstřiku při $T_{\text{vs}} = 160$ °C a $P_{\text{vs}} = 570$ kp/cm² položena za základ, potom zvýšení vstřikovací teploty ze 160 na 260 °C způsobilo zvětšení váhy asi o 3 %, zvýšení vstřikovacího tlaku z 570 na 750 kp/cm² zvětšení asi o 1 %. Zvýšení teploty vstřikovací formy ze 30 na 70 °C naopak způsobilo mírný pokles váhy, a to asi o 1/2 %. Celková váha klesla přesto, že se hustota za stejných okolností zvýšila. Tuto skutečnost je možno vysvětlit takto: Váha výstřiku je ovlivňována dvěma pochody, a to vlastním plněním dutiny formy a krystalizací polyméru. Z rozboru vstřikovacího procesu vyplývá, že váha výstřiku je určována termodynamickými veličinami v bodě zatuhnutí. V tomto bodě je však teplota větší částí polyméru v dutině pravděpodobně jen o málo nižší než teplota měknutí, takže krystalizace proběhla jen v malé míře. Většina hmoty skystalizuje při teplotách mnohem nižších,

kdy však do prostoru uvolněného krystalizací již další hmota nemůže být vtažena. Při vyšší teplotě vstříkovací formy je uvolněný prostor v její dutině malý a tedy i dodatečně vtlačené množství taveniny je malé. To je příčinou, že váha vstříků při vyšší teplotě formy je menší než při nízké teplotě formy.

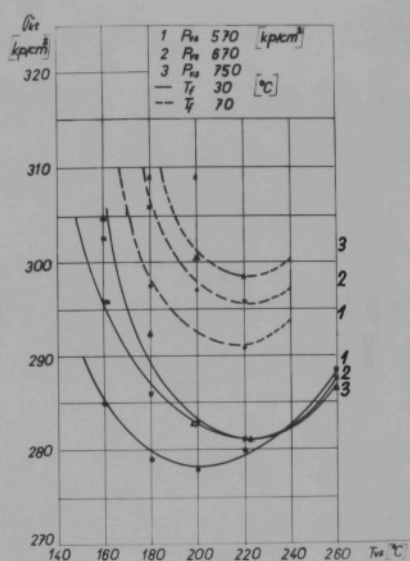
Stanovení vlivu průměru ústí vtoku potvrdilo předcházející závislosti. Zvětšování průměru ústí mělo za následek zvýšení váhy tělesa, ale hustota nebyla ovlivněna.

4.6.1.4. Závislost horní meze kluzu a tažnosti na podmínkách vstříkování

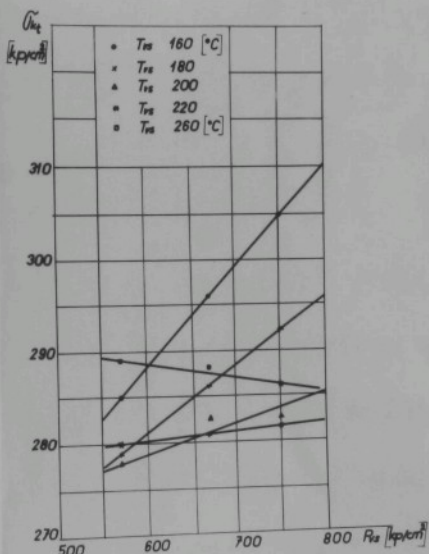
Úvodem je třeba říci, že objektivní závěry mohly být vyvozeny jen z hodnot horní meze kluzu. Vyhodnocení tažnosti selhalo, neboť z výsledků nebylo možno odvodit spolehlivou závislost. Původně bylo zamýšleno hodnotit tažnost těles při přetržení. Tato hodnota je však velmi nespolehlivá, protože závisí na vnitřní místní vadě tělesa. Očekávalo se, že přeseňjší výsledky poskytne tažnost odpovídající horní mezí kluzu. Ale i tento pokus ztroskotál, protože trhací diagram nebylo možno vyhodnotit s takovou přesností, aby nevznikala i zde velká chyba. Situaci nezlepšilo ani používání uhlového papíru, na němž byl diagram zaznamenáván jehlou.

Naměřené výsledky horní meze kluzu σ_{kt} , tažnosti při přetržení ε_p a tažnosti na horní mezí kluzu ε_k jsou uvedeny v tab. 38, příl. 8. Vprůměrný koeficient stanovení horní meze kluzu činil $V_{\sigma_{kt}} = \pm 1,36 \%$, pro tažnost nebyl počítán, byl však vyšší než 10 %.

Závislost horní meze kluzu na podmínkách vstřikování je na obr.36. Na obr. 37 je uveden vliv vstřikovacího tlaku na horní mez kluzu.



Obr.36. Závislost σ_{kt} na T_{vs} , P_{vs} a T_f



Obr.37. Vliv P_{vs} na σ_{kt} při různé T_{vs} , $T_f = 30^{\circ}\text{C}$

Z obr. 36 je patrné, že horní mez kluzu při teplotě formy 20°C vykazuje minimum při vstřikovacích teplotách mezi 200 až 220°C . Při teplotě formy 70°C byla zaznamenána jen klesající část křivky, protože při teplotě vyšší než $T_{vs} = 220^{\circ}\text{C}$ již nebylo možno vyrobit bezvadná tělesa.

Obr. 37 ukazuje, že zvýšení vstřikovacího tlaku má za následek vzrůst horní meze kluzu. Vliv tlaku však závisí na vstřikovací teplotě. Při nízkých vstřikovacích teplotách je vliv zřetelný, zatím co při vysoké vstřikovací teplotě se stává zanedbatelný.

Zvýšení teploty vstřikovací formy způsobilo ve všech případech vzrůst horní meze kluzu. Bezesporně se uplatnilo zvětšení hustoty výstřiku.

V souladu s předchozími výsledky bylo zjištěno, že zvětšování průměru χ ústí vtoku vede ke zvýšení horní meze kluzu, jak ukazuje tab. 10.

Tab.10. Závislost horní meze kluzu σ_{kt} a tažnosti při přetržení ϵ_p na průměru ústí vtoku χ .

$T_{vs} = 220^\circ \text{C}$, $P_{vs} = 670 \text{ kp/cm}^2$, $T_f = 30^\circ \text{C}$

χ [mm]	1	2	3	4	6
σ_{kt} [kp/cm ²]	266,0	271,6	272,2	281,1	283,0
ϵ_p [%]	470	128	188	185	90

Poznámka 1. Při stanovení meze kluzu bylo pozorováno, že k vytvoření hrčku v měřené části tělesa docházelo pravidelně na konci protilehlém ústí vtoku. Ukazuje to, že pevnost tělesa byla v tomto místě nejmenší. Ani sebepečlivější měření však nebylo prokázáno, že by tomuto místu odpovídal také nejmenší průřez tělesa.

Poznámka 2. K vysvětlení příčin vzrůstu horní meze kluzu při vysoké vstřikovací teplotě po předcházejícím minimu byla zkušební tělesa rozkrájena na granulát a u něj byla změřena fluidita na vytlačovacím plastoměru. Výsledky jsou uvedeny v tab. 11.

Z tabulky je zřejmé, že fluidita při stoupající vstřikovací teplotě proti očekávání klesá. Znamená to, že během vstřikování dochází ke zvětšování molekul polyméru v důsledku síťování či další polymerace. K těmto jevům dochází právě při

teplotách nad 200 °C, což souvisí s se zvýšením horní meze kluzu.

Tab.11. Fluidita ϕ polyetylénu ze zkušebních těles vstřikovaných při různé vstřikovací teplotě

T_{vs} [°C]	ϕ [cm ³ /sec] · 10 ⁴
originální granulát	148
160	154,5
180	149,3
200	130
220	101
260	92

4.6.1.5. Hodnocení homogenity zkušebních těles

Na nehomogenitu tělesa upozornily nepřímo tahové zkoušky při stanovení meze kluzu. Pevnostně nejslabší místo leželo vždy na vzdálenějším konci měřené části tělesa vzhledem k ústí vtoku. Rovněž z teoretického rozboru vyplynulo, že zúžená část tělesa má mít jiné vlastnosti než obě okrajové části sloužící k uchycení tělesa do čelistí.

Nehomogenita byla potvrzena stanovením mikrotvrdosti, jak ukazuje tab. 12.

Tab.12. Závislost mikrotvrdosti HV zkušebních těles na vzdálenosti od ústí vtoku l_u

Podmínky vstřikování : $T_{vs} = 180$ °C, $P_{vs} = 670$ kp/cm², $d_u = 4$ mm

l_u [mm]	10	30	50	70	90	110	130
HV [kp/mm ²]	5,88	5,79	6,46	6,46	5,94	5,27	5,16

Body vzdálené od místa ústí vtoku 50 a 70 mm leží ve zúžené části, bod přibližující 90 mm na její hranici. Jak je zřejmé, střední část tělesa vykazuje jiné vlastnosti než obě okrajové. Mikrotvrdost ve střední části byla vůbec nejvyšší, nejnižší naopak na konci protilehlém ústí vtoku.

Stanovení mikrotvrdosti bylo časově velmi náročné, a proto bylo od dalších měření na tělesech upuštěno.

K dalším orientačním zkouškám bylo použito penetrometrické metody. Hloubka vpichu jehly byla stanovena na pěti místech tělesa, a to 10 mm od ústí vtoku, 1, na počátku 2, ve středu 3, a na konci 4 zúžené části, a 10 mm od konce tělesa 5. Výsledky jsou v tabulce 13.

Tab.13. Závislost ~~na~~ hloubky vpichu h při teplotě jehly 120°C na vzdálenosti od ústí vtoku
 $P_{vs} = 670 \text{ kp/cm}^2$, $T_f = 30^{\circ}\text{C}$, $d_u = 4 \text{ mm}$

Poloha vpichu	$H \cdot 10^2 [\text{mm}]$				
	1	2	3	4	5
$T_{vs} [^{\circ}\text{C}]$					
200	80	78	84	76	77
220	83	82	86	75	81
260	81	81	84	77	72

Jak ukazují výsledky projevila se nesejnorodost tělesa i při penetrometrických měřeních. Je však nutno říci, že ani tato metoda neuspokojila při hodnocení stupně orientace^{molekul}. Tak je možno jen s určitou pravděpodobností soudit, že orientace je nejvyšší ve střední části tělesa a nejmenší na jejích koncích.

Tab.14. Smrštění jednotlivých částí zkutebních těles za tepla

Poloha ve výstřiku	Poloha v tělese			
	Smrštění (%)			
	1	2	3	4
1. okraj	6,5	6,4	5,6	3,5
střed	4,2	7,3	3,6	2,3
2. okraj	5,6	4,1	3,7	3,0

V tab. značí :

- 1 - okraj tělesa u ústí
- 2 - zúžená část tělesa směrem k ústí
- 3 - zúžená část tělesa směrem ke konci
- 4 - konec tělesa

Výsledky v tab. 14 jsou typické pro prováděná měření. (Pokus byl několikrát opakován.) Jak je zřejmé, vykazovala metoda velký rozptyl výsledků. Ku příkladu obě okrajová tělesa byla vyrobena za naprosto stejných podmínek a rovněž podmínky při měření byly stejné a přesto se naměřené hodnoty velmi lišily. Proto i vyhodnocení výsledků bylo problematické. Bylo možno pouze soudit, že orientace klesá od ústí vtoku k opačnému konci tělesa, ale nebylo možno spolehlivě určit, kde orientace dosahuje maxima.

S ohledem na neuspokojující výsledky měření bylo od dalších upuštěno, protože metoda, jak se zdá, není pro krystalizující plastické hmoty vhodná.

V různé vzdálenosti od místa ústí vtoku byla dále stanovena hustota flotační metodou. Protože bylo již dříve zjištěno, že ani vstříkovací teplota ani vstříkovací tlak hustotu

neovlivňují, nebyl vliv těchto faktorů systematicky studován. Naměřené výsledky jsou v tab. 15.

Tab.15. Hustota zkušebních těles v různé vzdálenosti od ústí vtoku

Vzdálenost od ústí [mm]	Hustota [ρ/cm^3]			
	0	45	95	135
$T_f = 30\text{ }^\circ\text{C}$, $P_{vs} = 570\text{ kp/cm}^2$				
$T_{vs} = 160\text{ }^\circ\text{C}$	0,9535	0,9531	0,9530	0,9530
$T_{vs} = 260\text{ }^\circ\text{C}$	0,9535	0,9533	0,9533	0,9530
$T_f = 30\text{ }^\circ\text{C}$, $P_{vs} = 750\text{ kp/cm}^2$				
$T_{vs} = 160\text{ }^\circ\text{C}$	0,9536	0,9533	0,9531	0,9530
$T_{vs} = 260\text{ }^\circ\text{C}$	0,9534	0,9532	0,9532	0,9531
$T_f = 70\text{ }^\circ\text{C}$, $P_{vs} = 570\text{ kp/cm}^2$				
$T_{vs} = 200\text{ }^\circ\text{C}$	0,9572	0,9564	0,9559	0,9564

Výsledky v tab. 15 ukazují, že hustota není stejná ve všech místech vstříků, ale že vyklazuje maximum v blízkosti ústí vtoku. V této části tělesa také nejrychleji klesá, zatím co ve vzdálenějších místech se mění jen nepatrně.

4.6.1.6. Zhodnocení výsledků měření na tělesech pro tahovou zkoušku

Mezi jednotlivými technologickými faktory existuje těsná souvislost. Platí to především o závislosti vnitřního tlaku na vstříkovací teplotě, na vnějším vstříkovacím tlaku i na rozměrech ústí vtoku. Z toho vyplývá, že není možno sledovat vliv jen jedínoho faktoru, např. měnící se vstříkovací teploty,

při konstantním vnějším vstříkovacím tlaku na změnu vlastností výstřiku, protože v dutině vstříkovací formy se mění nejen teplota taveniny, ale i vnitřní tlak. Totéž platí o vlivu ústí vtoku atd. Protože změna vnitřního tlaku se vstříkovací teplotou je závislá na vlastnostech taveniny plastické hmoty, mohou být vlivy technologických faktorů u různých hmot velmi odlišné.

Ve sledovaném případě převládá při zvyšování vstříkovací teploty vliv vnitřního tlaku. Tento se projevil jak na rozměrech tak na váze výstřiku.

Z výsledků vyplývá, že názor podle něhož zvyšování vstříkovací teploty má za následek větší smrštění je zjednodušen a nemá obecnou platnost. Konečná hodnota smrštění závisí jak na samotném zvýšení vstříkovací teploty tak na zvýšení vnitřního tlaku. V praxi mohou nastat tři případy :

1. Vliv stoupajícího vnitřního tlaku je větší než vliv stoupající vstříkovací teploty a v tomto případě klesá smrštění i když vstříkovací teplota se zvyšuje.
2. Zvětšení smrštění vlivem zvyšující se teploty se právě rovná jeho zmenšení vlivem vzrůstu tlaku. Pak je smrštění konstantní. Tento případ je ovšem víceméně jen teoretický.
3. Zmenšení smrštění v důsledku vzrůstu tlaku je menší než jeho zvětšení vlivem zvýšené vstříkovací teploty. Pak se smrštění se stoupající vstříkovací teplotou zvětšuje.

Který z těchto tří případů nastane, závisí na vlastnostech taveniny příslušného druhu plastické hmoty.

Vnitřní tlak ovlivňuje také horní mez tluzu zhutněných těles. Naproti tomu se nepodařilo stanovit závislost tažnosti na podmínkách vstříkování pro příliš velký rozptyl naměřených

hodnot. Podobně narezilo na potíže prověření homogenity těles. Výsledky měření mikrotvrdosti, měření na penetrometru a částečně smrštění za tepla ukazují, že orientace molekul dosahuje pravděpodobného maxima ve zúžené části výstřiku. Hustota výstřiku byla nejvyšší v bezprostřední blízkosti ústí vtoku, směrem k opačnému konci klesala.

4.6.2. Výsledky měření na kotoučích

4.6.2.1. Zjištění vztahu mezi technologickými faktory

Nejdříve byl stanoven vztah mezi vstříkovací teplotou a vnitřním tlakem. Vnitřní tlak byl měřen jednak uprostřed kotouče proti ústí vtoku a je označen P_{is} , jednak na okraji kotouče a je označen P_{ik} . Dále byla stanovena závislost vnitřního tlaku na vnějším vstříkovacím tlaku P_{vs} , na průměru ústí vtoku d_u , na tloušťce kotouče h_k a na teplotě vstříkovací formy T_f . Výsledky těchto měření jsou uvedeny v tab. 16, 17 a 18.

Z výsledků je možno učinit následující závěry :

1. Zvyšování vstříkovací teploty má za následek vzrůst vnitřního tlaku. Toto platí bez výhrad pro tloušťku kotouče 2 mm, u kotouče tlustého 1 mm pouze pro tlak na okraji kotouče. Tlak ve středu kotouče v některých případech naopak mírně poklesl.
2. Stoupající vstříkovací teplota zmenšuje rozdíl tlaku ve středu a na okraji kotouče, tzn. že podmínky vstříkování jsou při vyšší vstříkovací teplotě homogennější. Tento

závěr je zřetelný u kotoučů tlustých 1 mm, u kotoučů tlustých 2 mm je tlakový rozdíl na vstřikovací teplotě prakticky nezávislý.

3. Vzrůst vnějšího tlaku má za následek zvýšení tlaku vnitřního.
4. Rovněž zvýšení teploty vstřikovací formy vede ke zvýšení vnitřního tlaku.
5. Ve všech případech, kdy dochází ke zvýšení vnitřního tlaku, zvětšuje se i tloušťka kotouče.
6. Vstřikování tenkých kotoučů je velice citlivé na dodržení optimálních technologických podmínek. Z tab. 10 je zřejmé, že kotouč o tloušťce 1 mm může být vstřikován při dané vstřikovací teplotě maximálně při dvou různých hodnotách vstřikovacího tlaku, které leží v rozmezí asi 100 kp/cm^2 . Při větším zvýšení tlaku se tvoří přetoky, při jeho snížení je kotouč neúplný.

Naproti tomu je možno kotouče s tloušťkou 2 mm vstřikovat při zvolené teplotě v širokém rozmezí vstřikovacího tlaku. Je ale nutno pamatovat, že s tlakem se mění i tloušťka kotouče.

Také zvyšující se teplota vstřikovací formy rozšiřuje oblast použitelnosti vstřikovacího tlaku.

7. Při stejné vstřikovací teplotě a stejném vstřikovacím tlaku byl vnitřní tlak ve středu kotouče u 2 mm kotoučů nižší než tentýž u kotoučů o tloušťce 1 mm. U tlaku na okraji tomu však bylo naopak. Toto lze vysvětlit tím, že u tenkých kotoučů vzniká v dutině formy velký odpor proti tečení, což vyvolává i velký tlakový spád. Protože odpory u tlustých kotoučů jsou menší, dosahuje tlak ve středu nižší hodnoty.
8. Zvětšování průměru ústí vtoku má různý vliv u tenkých a u tlustých kotoučů. U tenkých kotoučů nezávisí vnitřní tlak na průměru ústí vtoku. To souvisí bezpochyby s tím, že výše vnitř-

ního tlaku je ovlivněna především odpory ve vlastní dutině formy. U 2 mm kotoučů stoupá vnitřní tlak až do průměru ústí 3 mm. Rozdíl mezi ústím 3 a 5 mm je ale nepatrný.

Tab.16. Závislost P_{is} a P_{ik} na P_{vs} a T_{vs} pro teoretickou tloušťku kotouče $h_k = 1 \text{ mm}$; $d_u = 2 \text{ mm}$

$T_f = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$					
$P_{vs} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$		610	530	460	380
$T_{vs} \text{ [}^\circ\text{C]}$					
X 175	$P_{is} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$	500			
	$P_{ik} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$	195			
	$h_k \text{ [mm]}$	1,25			
200	$P_{is} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$	520	455		
	$P_{ik} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$	290	215		
	$h_k \text{ [mm]}$	1,45	1,2		
220	$P_{is} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$		440	395	
	$P_{ik} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$		310	300	
	$h_k \text{ [mm]}$		1,35	1,2	
240	$P_{is} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$			370	310
	$P_{ik} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$			320	260
	$h_k \text{ [mm]}$			1,25	1,2
$T_f = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$					
$T_{vs} \text{ [}^\circ\text{C]}$					
200	$P_{is} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$			410	335
	$P_{ik} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$			250	130
	$h_k \text{ [mm]}$			1,2	1,15
220	$P_{is} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$			420	340
	$P_{ik} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$			270	210
	$h_k \text{ [mm]}$			1,25	1,15

Tab.17. Závislost P_{is} a P_{ik} na P_{vs} a T_{vs} pro teoretickou tloušťku kotouče $h_k = 2 \text{ mm}$; $du = 2 \text{ mm}$

$T_f = 50 \text{ }^\circ\text{C}$							
$P_{vs} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$		610	530	460	380	310	230
$T_{vs} \text{ [}^\circ\text{C]}$							
175	$P_{is} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$	400	375	310	260	170	
	$P_{ik} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$	365	300	280	225	120	
	$h_k \text{ [mm]}$	2,4	2,2	2,1	2,05	2,0	
200	$P_{is} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$		390	345	280	190	
	$P_{ik} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$		320	285	245	155	
	$h_k \text{ [mm]}$		2,4	2,2	2,1	2,0	
220	$P_{is} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$			365	310	220	150
	$P_{ik} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$			300	255	180	85
	$h_k \text{ [mm]}$			2,25	2,05	2,0	2,0
240	$P_{is} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$			390	320	240	160
	$P_{ik} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$			340	280	200	105
	$h_k \text{ [mm]}$			2,3	2,1	2,0	2,0
$T_f = 90 \text{ }^\circ\text{C}$							
$T_{vs} \text{ [}^\circ\text{C]}$							
200	$P_{is} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$				280	235	155
	$P_{ik} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$				225	160	100
	$h_k \text{ [mm]}$				2,0	2,05	2,0
220	$P_{is} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$				335	250	180
	$P_{ik} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$				280	215	125
	$h_k \text{ [mm]}$				2,1	2,05	2,0

Tab.18a. Vliv průměru ústí vstupu du na P_{is} a P_{ik} při různém P_{vs} ; $T_{vs} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_k = 1 \text{ mm}$

$P_{vs} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$		680	610	530	460
$du \text{ [mm]}$					
1	$P_{is} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$	540			
	$P_{ik} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$	180			
	$h_k \text{ [mm]}$	špatné			
2	$P_{is} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$		520	455	
	$P_{ik} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$		290	215	
	$h_k \text{ [mm]}$		1,45	1,2	
3	$P_{is} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$			465	
	$P_{ik} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$			275	
	$h_k \text{ [mm]}$			1,25	
5	$P_{is} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$			430	380
	$P_{ik} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$			280	225
	$h_k \text{ [mm]}$			1,45	1,25

Tab.18b. Vliv průměru ústí vtoku d_u na P_{is} a P_{ik} při
různém P_{vs} ; $T_{vs} = 200^\circ\text{C}$, $T_f = 50^\circ\text{C}$, $h_k = 2\text{ mm}$

P_{vs} [kp/cm^2]		610	530	460	380	310	230
d_u [mm]							
1	P_{is} [kp/cm^2]	400	335	250	185		
	P_{ik} [kp/cm^2]	310	260	215	145		
	h_k [mm]	2,3	2,15	2,0	2,0		
2	P_{is} [kp/cm^2]		390	345	280	190	
	P_{ik} [kp/cm^2]		320	285	245	155	
	h_k [mm]		2,4	2,2	2,1	2,0	
3	P_{is} [kp/cm^2]			375	305	230	165
	P_{ik} [kp/cm^2]			320	260	195	110
	h_k [mm]			2,3	2,1	2,0	2,0
5	P_{is} [kp/cm^2]			385	300	235	170
	P_{ik} [kp/cm^2]			325	270	210	125
	h_k [mm]			2,3	2,1	2,05	2,0

4.6.2.2. Měření horní meze kluzu a meze pevnosti ve střihu na kotoučích

Horní mez kluzu byla měřena na mikrotělesech vystřižených na poloměrech 30 a 55 mm. Tyto vzdálenosti odpovídaly minimální a maximální poloze mikrotělesa v radiálním směru. Na obou poloměrech byla tělesa oděrána jak v radiálním, tak v tangenciálním směru. Na těchto poloměrech byla stanovena také mez pevnosti ve střihu. Výsledky měření jsou sestaveny do tabulek 19, 20 a 21. Variační koeficient horní meze kluzu byl roven $V_{\sigma_{kt}} = \pm 1,64\%$, mez pevnosti ve střihu $V_{\tau} = \pm 1,03\%$.

Graficky nebylo možno výsledky zpracovat, protože technické podmínky musely být voleny podle vzájemné závislosti, takže porovnatelné podmínky se vyskytly zpravidla jen pro dva či tři případy jedné série.

Tab.19. Horní mez kluzu σ_{ktr} a σ_{ktt} a mez pevnosti ve stříhu τ_s na kotoučích o tloušťce 1 mm

$T_f = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$							
T_{fs} [$^{\circ}\text{C}$]	F_{vs} [kp/cm ²]	σ_{ktr3} [kp/cm ²]	σ_{ktt3} [kp/cm ²]	τ_{s3} [kp/cm ²]	σ_{ktr5} [kp/cm ²]	σ_{ktt5} [kp/cm ²]	τ_{s5} [kp/cm ²]
175	610	479	332	343	329	338	282
200	610	384	325	311	301	339	284
	530	408	327	303	296	329	272
220	530	405	326	302	313	336	283
	460	380	326	302	304	329	274
240	460	342	317	290	302	321	271
	380	350	308	284	300	320	270
$T_f = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$							
200	460	383	327	288	306	322	269
	380	394	330	291	316	350	286
220	460	369	324	290	306	330	276
	380	365	333	284	317	323	275

Význam symbolů :

- σ_{ktr3} - horní mez kluzu v radiálním směru na poloměru 30 mm
- σ_{ktt3} - horní mez kluzu v tangenciálním směru na poloměru 30 mm
- τ_{s3} - mez pevnosti ve stříhu na poloměru 30 mm
- σ_{ktr5} - horní mez kluzu v radiálním směru na poloměru 55 mm
- σ_{ktt5} - horní mez kluzu v tangenciálním směru na poloměru 55 mm
- τ_{s5} - mez pevnosti ve stříhu na poloměru 55 mm

Tab.20. Horní mez kluzu $\tilde{\nu}_{ktr}$ a $\tilde{\nu}_{ktt}$ a mez pevnosti ve
střihu τ_s na kotoučích o tloušťce 2 mm

$T_f = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$							
T_{vs} [$^{\circ}\text{C}$]	F_{vs} [kp/cm^2]	$\tilde{\nu}_{ktr3}$ [kp/cm^2]	$\tilde{\nu}_{ktt3}$ [kp/cm^2]	τ_{s3} [kp/cm^2]	$\tilde{\nu}_{ktr5}$ [kp/cm^2]	$\tilde{\nu}_{ktt5}$ [kp/cm^2]	τ_{s5} [kp/cm^2]
175	610	306	310	269	287	302	256
	530	305	303	370	383	389	259
	460	298	306	271	274	296	263
	380	306	326	275	294	307	267
	310	306	328	279	291	317	270
200	530	305	299	264	288	296	253
	460	302	303	269	287	296	261
	380	297	313	270	276	290	262
	310	295	309	277	278	293	267
220	460	301	308	268	287	293	260
	380	299	316	276	295	297	270
	310	302	315	280	289	298	271
	230	303	297	278	279	296	271
240	460	297	302	268	288	298	263
	380	296	302	271	288	295	270
	310	305	312	275	289	301	272
	230	296	315	278	289	303	274
$T_f = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$							
200	380	309	306	271	294	303	265
	310	305	317	276	298	299	271
	230	309	320	279	296	312	274
220	380	319	320	280	310	307	275
	310	320	342	280	319	325	278
	230	320	340	282	317	325	279

Tab.21. Vliv průměru ústí vtoku na $\tilde{\nu}_{ktr}$, $\tilde{\nu}_{ktt}$ a τ_s

Podmínky vetřikování : $T_{vs} = 200^\circ\text{C}$, $T_r = 50^\circ\text{C}$

Tloušťka kotouče : $h_k = 1 \text{ mm}$							
d_u [mm]	P_{vs} [kp/cm ²]	$\tilde{\nu}_{ktr3}$ [kp/cm ²]	$\tilde{\nu}_{ktt3}$ [kp/cm ²]	τ_{s3} [kp/cm ²]	$\tilde{\nu}_{ktr5}$ [kp/cm ²]	$\tilde{\nu}_{ktt5}$ [kp/cm ²]	τ_{s5} [kp/cm ²]
2	610	384	325	311	301	339	284
	530	373	327	303	296	329	272
3	530	404	347	305	308	356	279
	460	414	348	303	305	342	270
5	530	420	346	310	316	352	280
	460	413	336	296	314	346	271
$h_k = 2 \text{ mm}$							
1	610	303	314	273	301	305	265
	530	309	320	276	299	307	271
	460	307	307	281	298	307	273
	380	307	307	280	296	316	274
2	530	305	299	264	288	296	254
	460	302	303	269	287	296	261
	380	297	313	270	276	290	262
	310	295	309	277	278	293	267
3	460	306	315	270	294	302	266
	380	304	312	276	295	305	271
	310	305	325	278	293	304	271
	230	308	331	279	294	313	272
5	460	310	313	269	297	302	261
	380	311	319	274	292	306	266
	310	308	327	280	289	302	268
	230	302	329	272	292	304	268

Aby bylo možno učinit si představu o vlivu technologie vstřikování na vlastnosti vstřihu, byla pro porovnání stanovena horní mez kluzu Rigidez 50 na normalizovaných zkušebních tělesech pro tah. Tělesa byla vyrobena vstřikováním při teplotě $T_{ve} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ na lise TOS 1245. Vstřikovací tlak u lisu nebyl znám. Horní mez kluzu Rigidez 50 takto stanovená byla rovna $279 \pm 3,3\text{ kp/cm}^2$ ($V_{\text{kt}} = \pm 1,14\%$).

Na základě výsledků měření uvedených v tab. 19, 20 a 21 je možno učinit následující závěry :

1. Kotouč o tloušťce 1 mm :

1.1. Zvyšování vstřikovací teploty a s tím spojené snižování vstřikovacího tlaku má na poloměru 30 mm za následek pokles horní meze kluzu jak v radiálním, tak v tangenciálním směru. Obdobně klesá i mez pevnosti ve střihu. Změna těchto vlastností na poloměru 55 mm se zvyšující se vstřikovací teplotou je méně zřetelná.

1.2. Zvýšení teploty vstřikovací formy nemělo vliv na změnu sledovaných mechanických vlastností, protože hodnoty ležely v mezích chyb stanovení.

1.3. Horní mez kluzu v radiálním směru i mez pevnosti ve střihu klesají s rostoucím poloměrem. Horní mez kluzu v tangenciálním směru se s poloměrem prakticky nemění.

2. Kotouč o tloušťce 2 mm :

2.1. Hodnoty mechanických vlastností ukazují, že homogenita kotouče je značně vyšší než při tloušťce 1 mm.

2.2. Vliv vstřikovací teploty je menší než chyba stanovení.

Snížením vstřikovacího tlaku dochází k nepatrnému zvýšení horní meze kluzu v tangenciálním směru a meze pevnosti

ve střihu. Toto zvýšení je způsobeno zmenšením tloušťky kotoučů a tedy relativním zvýšením podílu orientovaných vrstev.

Zvýšení teploty vstříkovací formy mělo za následek mírný vzrůst mechanických vlastností.

2.3. Rozdíl mechanických vlastností na měřených poloměrech je menší než u kotoučů tlustých 1 mm a ještě se dále snižuje při vyšší vstříkovací teplotě a vyšší teplotě vstříkovací formy.

2.4. Z porovnání mechanických vlastností kotoučů o tloušťce 1 a 2 mm je patrné, že vlastnosti tlustšího kotouče jsou v průměru asi o 10 % nižší než u tenšího.

3. Změna průměru ústí vtoku se projevila jen u kotoučů s tloušťkou 1 mm, kde zvětšení průměru způsobilo mírné zvýšení horní meze kluzu. Mez pevnosti ve střihu však zůstala na stejné úrovni. U 2 mm kotoučů se vliv ústí vtoku na mechanické vlastnosti neprojevil vůbec.

4.6.2.3. Vztah mezi horní mezí kluzu a mezí pevnosti ve střihu

Protože je výstřík anizotropním tělesem, je možné zjistit poměr horní meze kluzu a meze pevnosti ve střihu jen tehdy, jestliže se uvažuje průměrná hodnota horní meze kluzu v radiálním a tangenciálním směru. Tedy

$$B = \frac{\frac{\sigma_{rx} + \sigma_{tx}}{2}}{\tau_x} \quad (41)$$

kde x je poloměr.

Když byl tento poměr vypočítán pro celý soubor provedených

měření, bylo zjištěno, že hodnota B je velmi dobře konstantní.

U 1 mm kotoučů se rovnalo $B_1 = 1,16 \pm 0,03$, u dvoumili-
metrových kotoučů bylo $B_2 = 1,12 \pm 0,025$.

Z malého kolísání hodnot B je zřejmé, že mezi oběma vlast-
nostmi existuje příčná závislost, i když je třeba pamatovat,
že pevnost ve stříhu vyjadřuje průměrnou hodnotu v daném místě
pro všechny směry, zatím co mez kluzu je ovlivněna anizotropií.
Pro stanovení přesnější hodnoty B by bylo nutno zjistit horní
mez kluzu ve více než dvou směrech. Tento případ nebyl v této
práci podrobněji studován.

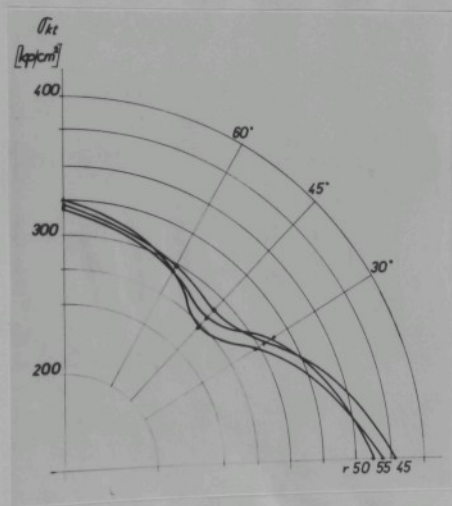
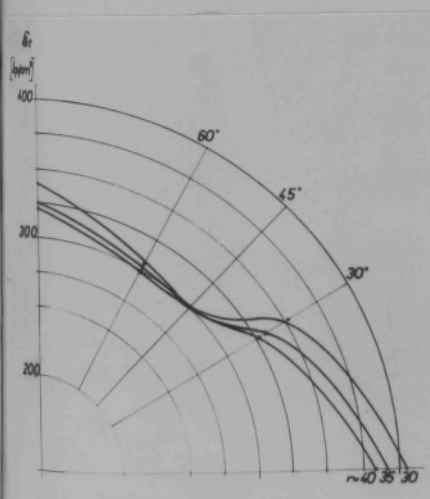
4.6.2.4. Závislost horní meze kluzu na poloměru a úhlu odebrá- ní mikrotělesa

Předcházející pokusy potvrdily, že mechanické vlastnosti
výstřiku klesají s rostoucí vzdáleností od místa ústí vtoku.
Proto byla tato závislost prověřena důkladněji. Horní mez klu-
zu byla měřena na šestí různých poloměrech a na každém z nich
ještě v pěti různých směrech. Radiálnímu směru byl přisouzen
úhel 0° , tangenciálnímu 90° . Ostatní mikrotělesa byla ode-
brána pod úhly 30, 45 a 60° . Umístění mikrotěles na kotou-
čích pro dva poloměry je zřejmé z obr. 39.

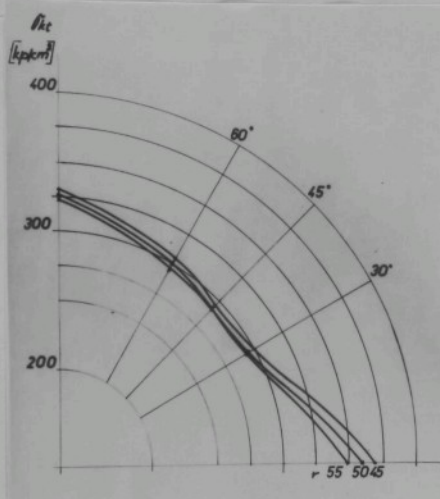
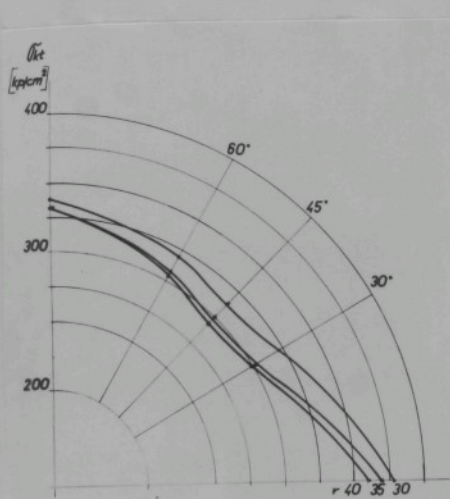
Výsledky měření horní meze kluzu jsou znázorněny v po-
lárních diagramech na obr. 40 až 43. Podrobné hodnoty jsou
uvedeny v tab. 39, příloha 3.



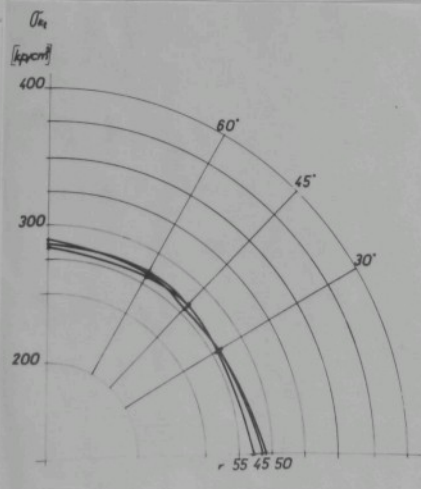
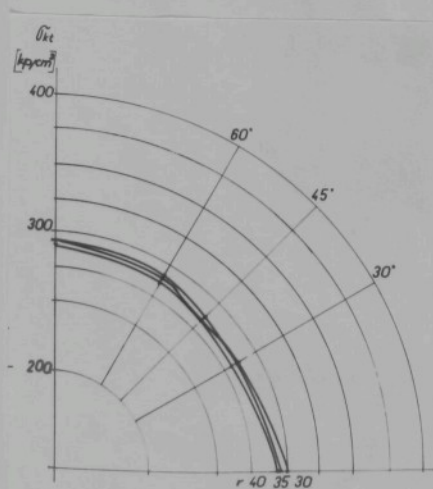
Obr.39. Rozmístění mikrotěles na kotouči



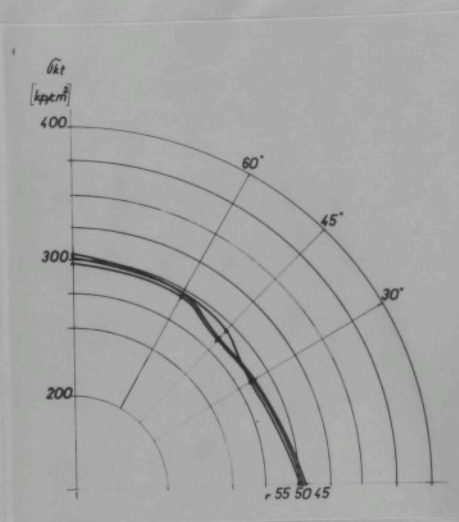
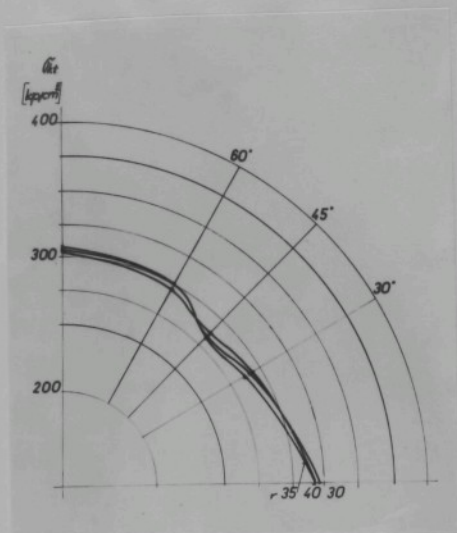
Obr.40ab. Závislost horní meze kluzu na poloměru a úhlu odebrání mikrotělesa. Podmínky vstříkování : $T_{vs} = 175^{\circ}\text{C}$, $P_{vs} = 610 \text{ kp/cm}^2$, $T_f = 50^{\circ}\text{C}$, $du = 2 \text{ mm}$, $hk = 1,25 \text{ mm}$



Obr.41ab. Závislost horní meze kluzu na poloměru a úhlu odebrání mikrotělesa. Podmínky vstřikování : $T_{vs} = 220^{\circ}\text{C}$, $P_{vs} = 530 \text{ kp/cm}^2$, $T_f = 50^{\circ}\text{C}$, $du = 2 \text{ mm}$, $hk = 1,30$



Obr.42ab. Závislost horní meze kluzu na poloměru a úhlu odebrání mikrotělesa. Podmínky vstřikování : $T_{vs} = 200^{\circ}\text{C}$, $P_{vs} = 310 \text{ kp/cm}^2$, $T_f = 50^{\circ}\text{C}$, $du = 2 \text{ mm}$, $hk = 2,35 \text{ mm}$



Obr.43ab. Závislost horní meze kluzu na poloměru a úhlu odebrání mikrotělesa. Podmínky vstříkování : $T_{vs} = 200^\circ\text{C}$, $P_{vs} = 530 \text{ kp/cm}^2$, $T_f = 50^\circ\text{C}$, $du = 2 \text{ mm}$, $hk = 2,35 \text{ mm}$

Vliv průměru ústí vtoku a různého úhlu odebrání mikrotělesa na horní mez kluzu jevtab. 22.

Tab.22. Závislost horní meze kluzu σ_{kt} na úhlu odebrání mikrotělesa při různém průměru ústí vtoku.

Podmínky vstříkování : $T_{vs} = 200^\circ\text{C}$, $P_{vs} = 530 \text{ kp/cm}^2$, $T_f = 50^\circ\text{C}$

				$\sigma_{kt} [\text{kp/cm}^2]$				
Úhel $[\alpha]$				0	30	45	60	90
du [mm]	r [mm]	hk [mm]						
2	30	1,25		373	341	313	286	323
	55			311	296	272	318	329
3	30	1,42		389	299	291	305	328
	55			314	281	270	304	360
5	30	1,45		420	339	320	315	349
	55			331	302	294	322	350

Zhodnocení výsledků : Výsledky potvrdily, že tenké kotouče jsou mnohem nehomogennější než kotouče o tloušťce 2 mm. Horní mez kluzu vykazuje minimum při úhlu odebrání mikrotělesa asi 45° .

Rozdíl mezi maximální hodnotou horní meze kluzu, která leží v radiálním směru a minimální pod úhlem 45° činila u jednomilimetrových kotoučů téměř 25 % maximální hodnoty. Zvyšující se vstříkovací teplota rozdíl zmenšovala. Naproti tomu rozdíl těchto hodnot u kotoučů 2 mm tlustých činil jen asi 10 %.

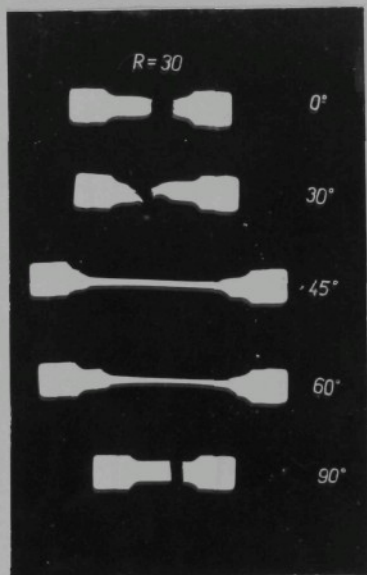
Zvětšení průměru ústí vtoku mělo u jednomilimetrových kotoučů za následek zvýšení horní meze kluzu, avšak nehomogenita kotoučů se nezvýšila.

4.6.2.5. Závislost tažnosti mikrotěles na poloměru a na úhlu odebrání tělesa

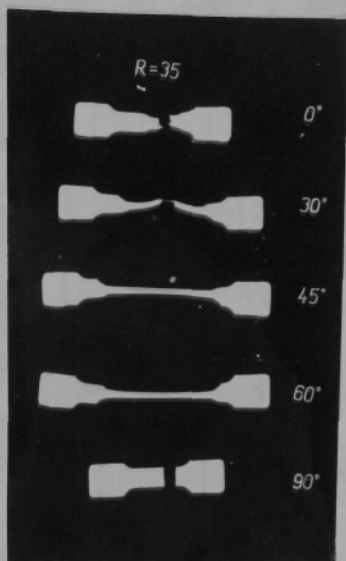
Kvantitativní vyhodnocení tažnosti mikrotěles nebylo proveditelné pro velký rozptyl naměřených hodnot. Daleko názornější se ukázalo kvalitativní vyhodnocení, které představují obr. 44 a, b, c, d, e, f.

Z obrázků je patrné, že tažnost mikrotěles byla ovlivněna jak poloměrem, tak úhlem odebrání. Mikrotělesa v radiálním směru na malém poloměru vytvářela před prasknutím krátký krček, který se zvětšoval při úhlech 30° a 60° a tělesa pod úhlem 45° vykazovala vysokou tažnost. Naproti tomu tělesa pod úhlem 90° vykazovala na malém poloměru zcela křehký lom. S rostoucím poloměrem se houževnatost těles zvětšovala.

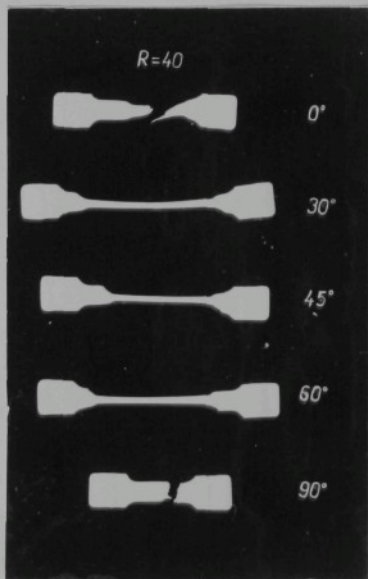
Obr. 44. Tažnost mikrotěles v závislosti na různých poloměrech a různých úhlech odebrání. Podmínky vytříkávání: $T_{vs} = 220^\circ \text{C}$, $P_{vs} = 530 \text{ kp/cm}^2$, $T_f = 50^\circ \text{C}$, $du = 2 \text{ mm}$, $hk = 1,30 \text{ mm}$



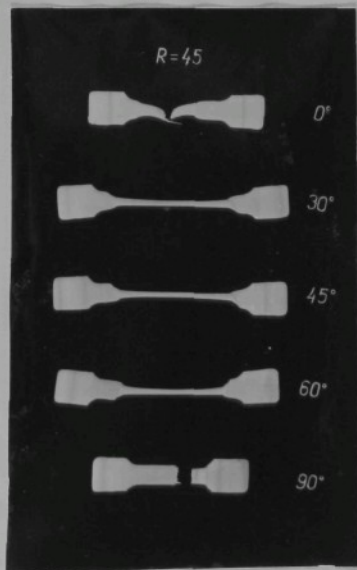
44 a



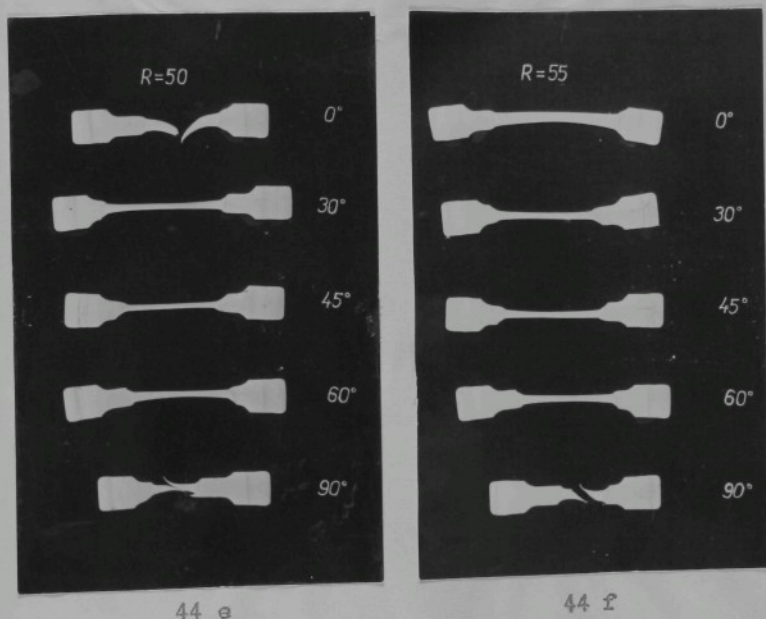
44 b



44 c



44 d



Větší homogenita loutoušů o tloušťce 2 mm se projevila i na tažnosti mikrotěles. I když se tato chovala při zkoušce obdobně jak je na obr. 44, rozdíly byly značně menší.

4.6.2.6. Zhodnocení výsledků měření na loutouších

Měření vnitřního tlaku potvrdilo jeho závislost na ostatních sledovaných technologických faktorech, tj. vstříkovací teplotě, vstříkovacím tlaku, teplotě vstříkovací formy, průměru ústí vtoku a tloušťce loutouše. Stanovení vnitřního tlaku na dvou místech dutiny formy umožnilo posoudit rozložení tlaku v dutině. K vysokému tlakovému spádu dochází u tenlostěnných výtřiků, u dvoumístných loutoušů byl rozdíl $\times$ tlaku malý, asi 50 kp/cm^2 , při čemž nezávisel ani na vstříkovací teplotě

an' na vstřikovacím tlaku. Naproti tomu u kotoučů tlustých 1 mm tlakový spád závisel značně na vstřikovací teplotě : Při $T_{vs} = 175^{\circ}\text{C}$ činil rozdíl tlaků ve středu a na okraji kotouče asi 300 kp/cm^2 , při $T_{vs} = 240^{\circ}\text{C}$ však jenom asi 50 kp/cm^2 .

Vnitřní tlak ovlivnil řadu vlastností výstřiků. Předně to byla tloušťka kotoučů. Přes to, že vstřikovací lis byl vybaven kolenným uzavíracím ústrojím, kde by teoreticky nemelo docházet ke změně tloušťky výstřiku, značně tloušťky se nepodařilo zabránit. Příčina spočívá bezesporu v pružných deformacích uzavíracího ústrojí vyvolaných vnitřním tlakem, protože síla v dutině vstřikovací formy dosahuje asi 60 tun.

Vnitřní tlak také ovlivňoval mechanické vlastnosti výstřiků. V souladu s teorií vyvolává větší tlakový spád větší nehomogenitu výstřiku, která byla mnohem vyšší u tenkých než u tlustých výstřiků. Vyšší orientace molekul v tenkostěnných kotoučích se projevila vyššími hodnotami mechanických vlastností.

Nevýhodou měření mechanických vlastností na kotoučích bylo, že vlastnosti nemohly být stanoveny v bezprostřední blízkosti ústí vtoku, protože v tomto místě se tvořil nálietek vlivem tlakového čidla. Nálietek měl průměr asi 15 mm a v daném místě zvětšoval tloušťku kotouče asi o 2 mm.

Když byl vypočítán poměr horní meze kluzu, bráné jako aritmetický průměr hodnoty v radiálním a tangenciálním směru, k mezi pevností ve střihu, bylo zjištěno, že poměr je konstantní. Dokazuje to, že obě vlastnosti podléhají stejnému zákonitosti. Stanovení meze pevnosti ve střihu předčilo měření horní meze kluzu menší chybou.

Závislost horní meze kluzu na úhlu odebrání mikrotělesa odhalila, že horní mez kluzu dosahuje minimální hodnoty asi uprostřed mezi radiálním a tangenciálním směrem. Tomuto směru odpovídá největší tažnost. Naopak nejmenší tažnost, na malých poloměrech prakticky nulovou, vykazovala tělesa v tangenciálním směru. Tento poznatek je pro praxi důležitý, protože pomáhá vysvětlit příčiny praskání výstřiků z polyetylénu. Je zřejmé, že výstřiky nemusí vždy praskat ve směru nejmenší pevnosti, ale lom může vzniknout ve směru s nejnižší tažností. Když totiž hmota vykazuje dostatečnou tažnost, potom působící napětí vyvolá plastické přetvoření, čímž se hodnota napětí sníží a k lomu vůbec nedojde. Jestliže však plastické přetvoření v důsledku malé tažnosti nemůže nastat, výstřik praskne.

4.6.3. Výsledky měření na deskách 120 x 120 x 2 mm

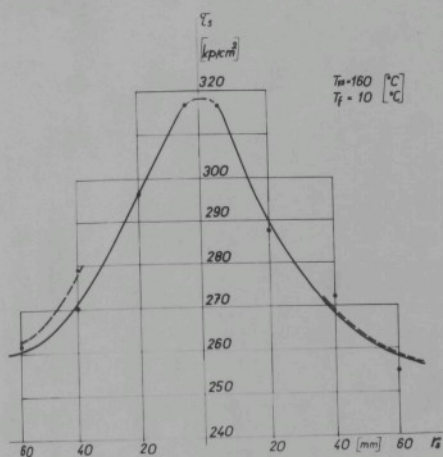
4.6.3.1. Stanovení meze pevnosti ve stříhu

Nejprve bylo ověřeno, zda jsou mechanické vlastnosti rozloženy po ploše výstřiku v soustředných kružnicích. K hodnocení vlastností bylo používáno výhradně pevnost ve stříhu, která se ukázala přenějnější než stanovení horní meze kluzu.

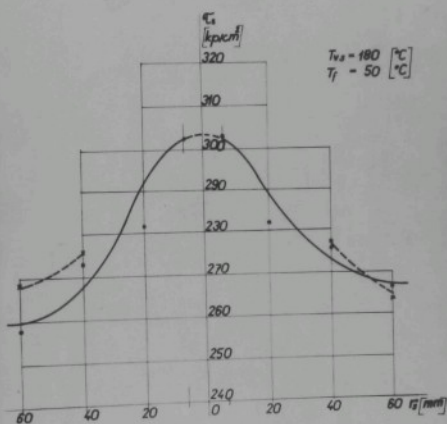
Rozložení meze pevnosti ve stříhu ve směru obou uhlopříček je na obr. 45 a, b, c. Naměřené hodnoty jsou v tab. 40 v příloze 10.

Jak z obrádků vyplývá je mez pevnosti ve stříhu skutečně rozdělena v soustředných kruzích. Proto byly nadále vlastnosti měřeny pouze ve směru jedné uhlopříčky, přičemž výsledky příslušící stejnému poloměru byly vždy sloučeny.

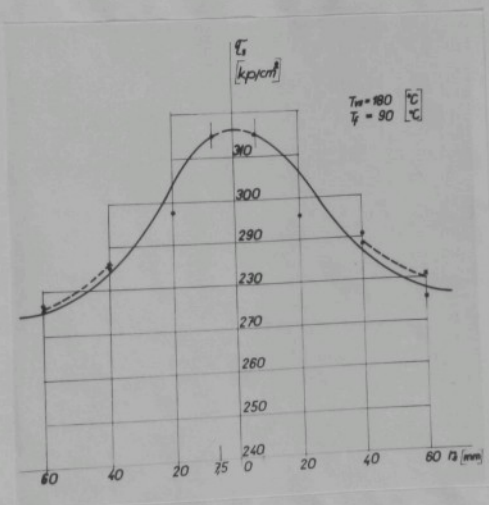
Obr. 45a, b, c. Závislost meze pevnosti ve střihu ve směru obou ^{úhlopříček} pro troje namátkově zvolené podmínky vstřikování, které jsou uvedeny v příslušných obrazech



45 a



45 b



45 c

Závislost meze pevnosti ve stříhu na různých poloměrech výstřiků a pro různé podmínky vstříkování je uvedena v tab.23. Měření pevnosti ve stříhu byla provedena na čtyřech poloměrech. Variční koeficient stanovení $V_{\tau_s} = \pm 1,3 \%$. Variční koeficient je vyšší než v kap. 4.6.2., protože vstříkovací lis nebyl vybaven tak přesnými regulátory vstříkovací teploty jako v případě kotoučů, a proto se jednotlivé desky mezi sebou více lišily.

Tab.23. Závislost meze pevnosti ve stříhu τ_s na poloměru výstřiku r_s pro různé podmínky vstříkování

		τ_s [kp/cm ²]				Průměr τ_s
r_s [mm]		7,5	20	40	60	
$T_f = 10 [^{\circ}C]$	$T_{vs} [^{\circ}C]$					
	160	315	287	270	263	284
	180	300	276	265	259	275
	200	296	273	264	257	273
	220	293	269	263	260	271
	240	293	278	271	268	277
$T_f = 50 [^{\circ}C]$						
	160	309	290	282	274	289
	180	307	285	278	275	286
	200	297	284	275	271	282
	220	294	281	275	271	280
	240	285	278	273	267	276
$T_f = 90 [^{\circ}C]$						
	160	324	294	284	278	295
	180	298	285	282	276	285
	200	293	280	278	272	281
	220	313	295	295	295	299
	240	308	294	292	292	297

Z výsledků v tab. 23 vyplývají tyto závěry :

1. Pevnost ve stříhu vykazovala zřetelné maximum v blízkosti ústí vtoku, směrem k okrajům výstřiku pevnost klesala zpočátku rychle, na větších poloměrech pomaleji.
2. Při teplotách vytřikovací formy 10 a 90 °C vykazovala mez pevnosti ve stříhu minimum při teplotě asi 200 °C. Toto zjištění je v souladu se závislostí nalezenou u zkušebních těles v kap. 4.6.1. Minimum se neobjevilo při teplotě formy 50 °C, což je pravděpodobně způsobeno náhodnou chybou měření.
3. Stoupající teplota vytřikovací formy se projevila zvýšením meze pevnosti ve stříhu.

4.6.3.2. Stanovení homogenity desek

Homogenita desek byla posuzována na základě průměrného variačního koeficientu meze pevnosti ve stříhu vypočítaného pro jednotlivé podmínky vytřikování z hodnot uvedených v tab. 23. Vyšší hodnota průměrného variačního koeficientu $\bar{V}$ je známkou horší homogenity výstřiku. Výsledky jsou sestaveny do tab. 24.

Tab. 24. Průměrný variační koeficient $\bar{V}$ jako míra homogenity desek

		$\bar{V}[\%]$				
T_{vs} [°C]		160	180	200	220	240
T_f [°C]						
10		6,35	6,58	5,08	5,93	4,04
50		5,15	4,98	3,98	3,52	2,72
90		6,22	3,25	3,10	3,04	2,65

I když se v tab. 24 objevily určité nepravidelnosti, které jsou způsobeny tím, že průměrný variační koeficient je ovlivňován chybami, které se postupným slučováním závislostí zvětšují, je možno vyvodit tyto závěry :

Homogenita desek zhotovených při nízké vstříkovací teplotě je nejhorší. Při konstantní teplotě vstříkovací formy homogenita stoupá zvyšováním vstříkovací teploty. Rovněž zvyšování teploty vstříkovací formy při konstantní vstříkovací teplotě příznivě ovlivňuje homogenitu výstřiků. Při extrémně nízké vstříkovací teplotě se mohou vyskytnout nepravidelnosti, které pramení z toho, že teplota $T_{vs} = 160^{\circ}\text{C}$ leží na spodní hranici použitelnosti. Jestliže skutečná teplota taveniny kolísá v rozmezí asi $\pm 5^{\circ}\text{C}$, jak je běžné u padáčkových regulátorů, projeví se toto kolísání při nízké vstříkovací teplotě markantněji než při teplotě vyšší.

4.6.3.3. Průběh plošného rozložení meze pevnosti ve střihu

Teoreticky bylo odvozeno, že vnitřní tlak v dutině vstříkovací formy ve tvaru desky je během vstříkávání rozdělen podle logaritmické křivky a stejnou tendencí mají vykazovat i mechanické vlastnosti v jednotlivých místech výstřiku. Pro mez pevnosti ve střihu tedy má platit vztah

$$\sigma_{sx} = k_{s1} \cdot \log r_x + k_{s2} \quad (42)$$

Výpočtem bylo ověřeno, zda hodnoty uvedené v tab. 23 odpovídají vztahu (42). Konstanty k_{s1} a k_{s2} byly vypočítány dosazením příslušných hodnot meze pevnosti ve střihu pro poloměr $r_1 = 7,5 \text{ mm}$, tj. poloměr vzdálenosti střihné plochy od ústí vteku a 60 mm jako střední hodnotu vzdálenosti.

Na základě závislosti konstant k_{s1} a k_{s2} byly vypočítány hodnoty meze pevnosti ve střihu pro poloměry $r = 20$ a $r = 40$ a tyto byly porovnány s experimentálně zjištěnými. Výsledky jsou v tab. 25.

Tab.25. Hodnoty konstant k_{s1} a k_{s2} a vypočítané a experimentálně zjištěné hodnoty meze pevnosti ve střihu

τ_{s20} a τ_{s40}

T_f [°C]	T_{ve} [°C]	k_{s1}	k_{s2}	τ_{s20} [kp/cm ²]		τ_{s40} [kp/cm ²]	
				vypoč.	exper.	vypoč.	exper.
10	160	-57,6	365	290	287	273	270
	180	-43,6	338	281	276	268	265
	200	-43,4	334	278	273	264	264
	220	-35,8	328	278	269	268	262
	240	-27,2	316	283	278	273	271
50	160	-36,9	340	293	290	281	282
	180	-34,8	336	291	285	280	278
	200	-27,2	320	284	283	277	275
	220	-23,9	315	283	280	277	275
	240	-19,6	302	276	277	271	273
90	160	-50,1	368	303	294	288	284
	180	-27,2	318	282	285	274	282
	200	-21,7	312	284	280	277	278
	220	-19,6	330	304	295	299	294
	240	-17,4	323	301	294	295	292

V tabulce značí :

τ_{s20} - mez pevnosti ve střihu na poloměru $r = 20$ mm

τ_{s40} - mez pevnosti ve střihu na poloměru $r = 40$ mm

Z tabulky 25 vyplývá, že konstanta k_{s1} se zmenšuje se stoupající vstřikovací teplotou. Protože rovnice (42) představuje v semilogaritmických souřadnicích přímku a k_{s1} její

směrnicí, znamená pokles konstanty zvýšení homogenity výstřiků. Konstanta k_{s2} odpovídá mezi pevností ve stříhu na poloměru $r = 1 \text{ mm}$ a také zde se projevila klesající tendence se zvyšováním vstřikovací teploty. Tato tendence byla porušena pouze při teplotě formy $T_f = 90^\circ \text{C}$ při nejvyšších vstřikovacích teplotách, tedy při extrémních podmínkách vstřikování.

Z tabulky je také patrná dobrá shoda vypočítaných a experimentálně zjištěných hodnot. Odchylka mezi těmito hodnotami není větší než je variační koeficient stanovení meze pevnosti ve stříhu.

4.6.3.4. Vztah mezi pevností ve stříhu a horní mezí kluzu

Podobně jako u kotoučů byla na deskách změřena horní mez kluzu v radiální a tangenciální směru na shodných poloměrech jako mez pevnosti ve stříhu a z obou vlastností byl vypočítán poměr B , jehož hodnoty jsou uvedeny v tab. 26.

Tab.26. Poměr horní meze kluzu a meze pevnosti ve stříhu B pro různé poloměry desky r_s

$r_s \text{ [mm]}$	20	40	60
B	$1,12 \pm 0,022$	$1,13 \pm 0,014$	$1,13 \pm 0,017$

Výsledky ukazují, že hodnota B velmi dobře souhlasí s hodnotou zjištěnou na kotoučích.

Poznámka : Horní mez kluzu i v tomto případě vykazovala větší kolísání hodnot než mez pevnosti ve stříhu. Variační koeficient $V_{Gd} = \pm 2,3 \%$.

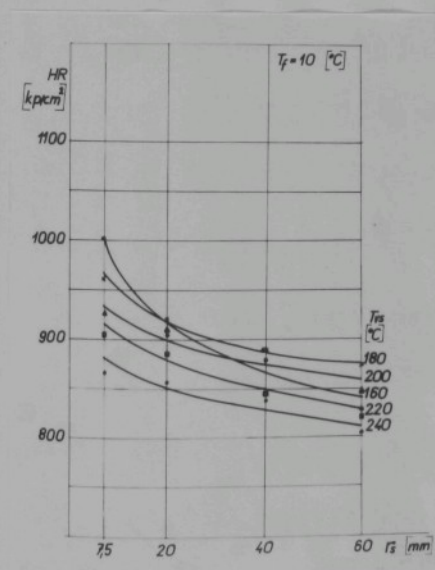
4.6.3.5. Měření tvrdosti

Tvrdost byla měřena na upraveném Rockwellově přístroji. Tloušťka desek se pohybovala v rozmezí $2 \pm 0,1$ mm. Protože podmínky měření neodpovídají předepsaným normou, nelze brát stanovené hodnoty jako absolutní.

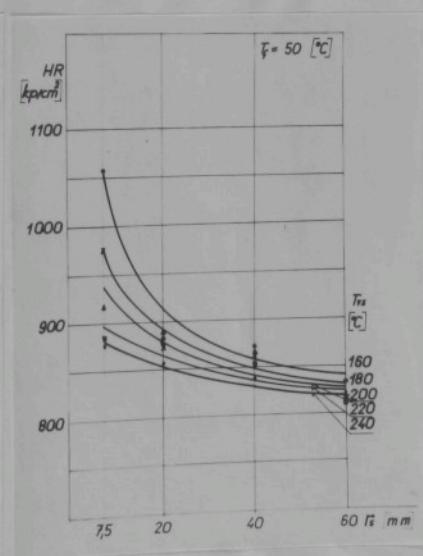
Výsledky měření jsou graficky zobrazeny na obr. 46 a, b, c, a dále jsou uvedeny v tab. 41, příloha 11. Průměrná hodnota variačního koeficientu stanovení tvrdosti :

$$V_{HR} = \pm 1,47 \%$$

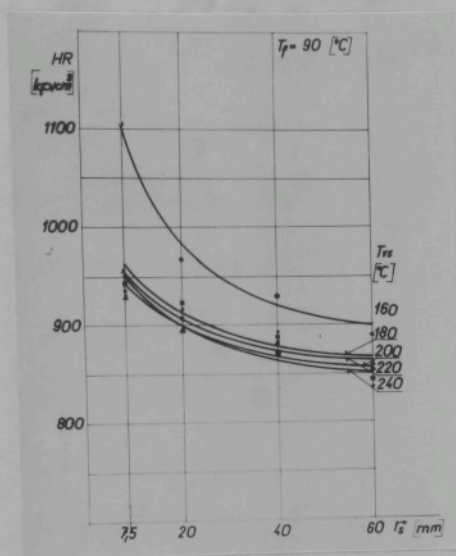
Obr. 46a, b, c. Závislost tvrdosti HR 5/31/60 [kp/cm^2] na vzdálenosti od ústí vtoku r_s



46 a



46 b



46 c

Zhodnocení výsledků :

1. Měření tvrdosti potvrdilo nehomogenitu výstřiků. Tvrdost dosahovala nejvyšší hodnoty v blízkosti ústí vteku.
2. Podmínky vstřikování mají na změnu tvrdosti podobný vliv jako na změnu pevnosti ve střihu : Zvyšující se vstřikovací teplota při konstantní teplotě vstřikovací formy má za následek snížení tvrdosti. Zvyšující se teplota formy při konstantní vstřikovací teplotě způsobuje naopak zvýšení tvrdosti.

Poznámka 1 : Podle literárních údajů i podle osobního sdělení Dr. Orthmanna by zkoušený typ polyetylénu na Brinellově tvrdoměru vykázal tvrdost asi kolem 500 kp/cm^2 . Metoda, která bylo použito sice pracuje na obecném principu, avšak předzatižení činilo 10 kp místo jednoho kilopondu u Brinellova přístroje. To bylo hlavní příčinou naměřených vysokých hodnot tvrdosti.

Poznámka 2 : Poměrně vysoká hodnota variačního koeficientu je způsobena jednak kolísáním technologických faktorů při vstříkování, jednak vlastním měřením. Některé desky nebyly zcela rovné, ale částečně prohnuté. Proto nebylo možné pokládat je při měření na rovnou podložku tvrdoměru, ale muselo být použito speciální zaoblené podložky. Tím bylo elastické odpružování desky sníženo na minimum.

4.6.3.6. Závislost mezi tvrdostí a mezi pevností ve stříhu

Výsledky měření tvrdosti a pevnosti ve stříhu ukázaly, že obě metody podléhají obdobným zákonitostem. Protože obě metody vyjadřují průměrnou vlastnost v daném místě neovlivněnou izotropií, bylo možno předpokládat, že mezi oběma může existovat určitý vztah. Pro jednotlivá místa měření byl stanoven poměr

$$Z = \frac{\tau_s}{HR} \quad (43)$$

Vypočítané hodnoty Z jsou sestaveny do tabulky 42, příl. 12. Ples určitý rozptyl hodnot Z je zřejmé, že poměr je dobře konstantní. Jeho průměrná hodnota pro celý soubor měření byla stanovena na : $Z = 0,319 \pm 0,012$. Vztah mezi tvrdostí a mezi pevností ve stříhu je tedy možno psát ve tvaru

$$\tau_s = (0,319 \pm 0,012) \cdot HR \quad (44)$$

4.6.3.7. Stanovení mikrotvrdosti, měření na penetrometru a určení hustoty -----

Uvedené metody byly použity k ověření homogenity desek.

Výsledky stanovení mikrotvrdoti HV jsou v tab. 27.

Tab.27. Mikrotvrdot HV na různých poloměrech desky r_s

Podmínky vstříkování : $T_{vs} = 240\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_f = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$

r_s [mm]	10	20	30	40	50
HV [kp/cm ²]	496	450	445	425	459

Výsledky mikrotvrdoti, i když byly provedeny jen orientačně, ukázaly stejnou závislost jako měření tvrdosti kuličkou. Rovněž nehomogenita desky byla zřejmá.

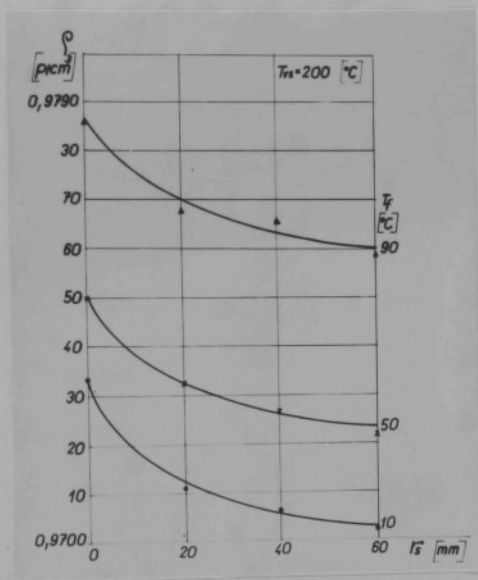
Nehomogenita byla potvrzena i měřením na penetrometru jak ukazuje tab. 28.

Tab.28. Hloubka vpíchu na penetrometru při teplotě jehly $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ v různé vzdálenosti od ústí vtoku ζ

r_s [mm]	Hloubka vpíchu [mm]. 10^{-2}		
	7,5	40	60
Podmínky vstříkování			
$T_{vs} = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_f = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	77	73	68
$T_f = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	72	71	67
$T_f = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$	69	66	65

Z penetrometrických měření vyplývá, že orientace derek je nejvyšší v blízkosti ústí vtoku. Směrem k okraji klesá. Zvyšující se teplota vstříkovací formy snižuje orientaci a zvyšuje homogenitu výstříku.

Závislost hustoty na poloměru odebrání vzorku je graficky zobrazena na obr. 47. Podrobnější hodnoty jsou v tab. 43, příloha 13.



Obr. 47. Závislost hustoty ρ na poměru délky l pro různou teplotu vstřikovací formy

Z obr. 47 a z výsledků v tab. 43 je možno vyvodit tyto závěry :

1. Hustota dosahuje nejvyšší hodnoty v okolí ústí vstupu a se zvětšující se vzdáleností nejprve rychle, později pomaleji klesá. Toto platilo pro všechny sledované podmínky vstřikování.
2. Zvýšení teploty vstřikovací formy způsobilo vzrůst hustoty. Vliv teploty formy není rovnoměrný : Zvýšení teploty z 10 na 50 °C způsobilo relativně menší zvýšení hustoty než změna teploty z 50 na 90 °C.
3. Vstřikovací teplota při konstantní teplotě vstřikovací formy prakticky hustotu neovlivnila, což je v souladu se závěry v kap. 4.6.1.

4.6.3.8. Zhodnocení výsledků měření na deskách

Měření pevnosti ve stříhu potvrdilo, že k největší změně vlastností ve výstřiku dochází v blízkosti ústí vtoku, zatím co ve větší vzdálenosti změna probíhá pomaleji. Souvisí to s rozdělením vlastností v ploše výstřiku podle logaritmické křivky. Shoda teoreticky vypočítaných a experimentálně zjištěných hodnot meze pevnosti ve stříhu byla velmi dobrá.

Bylo zjištěno, že homogenita desek vstříkovaných ve formě o teplotě 10 °C je velmi špatná. Homogenita se zlepšila při teplotách formy 50 a 90 °C. Kromě teplé formy má na homogenitu výstřiku příznivý vliv také vstříkovací teplota, je-li vyšší než 180 °C.

Vypočítaný vztah mezi pevností ve stříhu a horní mezí kluzu se shodoval s hodnotou vypočítanou u kotoučů, i když podmínky vstříkování v obou případech byly značně odlišné. Dokaže to, že mez pevnosti ve stříhu může být považována za hodnotu vlastností právě tak cennou jako je horní mez kluzu.

Tvrdość, i když nebyla stanovena podle podmínek předepsaných normou, se ukázala jako metoda citlivě reagující na strukturu výstřiku. Tvrdość vykazovala stejný průběh jako pevnost ve stříhu a když byl vypočítán poměr obou hodnot, bylo zjištěno, že je velmi dobře konstantní. Stanovením tvrdosti a převedením těchto hodnot na mez pevnosti ve stříhu, příp. na průměrnou hodnotu horní meze kluzu, by v praxi mohlo být prospěšné, protože by bylo možno odhadnout vlastnosti výrobků, aniž by se použilo destruktivní metody. Praktická aplikace by ovšem musela být ještě důkladněji ověřena.

Nehomogenitu desek potvrdila i mikrotvrdost a měření na penetrometru. Obě metody jsou však poměrně pracné a hodnotí ve skutečnosti nepřímý stupeň orientace molekul v povrchových vrstvách; což sice může mít význam pro vědecké hodnocení vlastností výstřiků, avšak v praxi se mohou uplatnit jen jako metody pomocné. Proto nebyly ve větším měřítku použity ani v této práci.

4.6.4. Výsledky měření na výrobcích z provozu

Mez pevnosti ve střihu byla použita k hodnocení vlastností dvou výrobků z provozu. Výsledky jsou uvedeny v tab. 29. a 30.

Tab.29. Mez pevnosti ve střihu τ_g měřená na dětské vaničce v různé vzdálenosti od ústí vtoku r

r (mm)	40	70	90	125	155	185	215
τ_g (kp/cm ²)	264	263	258	260	262	255	261
tloušťka stěny (mm)	3,80	3,80	3,85	3,80	3,65	3,60	3,45

r (mm)	240	270	300	330	360	390	420
τ_g (kp/cm ²)	253	256	252	253	241	236	238
tloušťka stěny (mm)	3,55	3,45	3,00	3,00	3,05	3,05	3,20

Tab.30. Mez pevnosti ve stříhu τ_s měřená na krytu topení
v různé vzdálenosti od ústí vtoku r

r [mm]	7,5	20	40	60	80	120	140
τ_s [kp/cm ²]	250	237	237	232	229	222	217
tloušťka stěny [mm]	2,00	2,05	2,05	2,05	2,15	2,12	2,12

Zhodnocení výsledků :

Stanovení meze pevnosti ve stříhu na výrobcích z Rigide-
xu 50 potvrdilo závislosti odvozené na zkusebních tělesech
používaných v této práci. Mez pevnosti ve stříhu klesala se
zvětšující se vzdáleností od ústí vtoku. Pokles byl markantněj-
ší u krytu topení, který měl tloušťku prakticky stejnou ja-
ko zkusební kotouč a deska. Tloušťka stěny u tohoto výrobku
byla poměrně rovnoměrná. Z tab. 30 je patrný rychlejší pokles
meze pevnosti ve stříhu v bezprostřední blízkosti ústí vtoku.

Vlastnosti dětské vanyčky jsou mnohem rovnoměrnější,
což je způsobeno velkou tloušťkou stěny, 3,8 mm. Změna meze
pevnosti ve stříhu je vzhledem k proměněné ploše poměrně malá.
Avšak to potvrzuje závěry dříve nalezené.

5. SOUHRN VÝSLEDKŮ A JEJICH VÝZNAM PRO PRAXI

5.1. Bylo prokázáno, že vliv jednotlivých technologických faktorů vstřikování, např. vstřikovací teploty, vstřikovacího tlaku, teploty vstřikovací formy, rozměru ústí vtoku i vlastního tvaru dutiny formy, na vlastnosti výstřiku není možno hodnotit každý samostatně, protože spolu úzce souvisejí. Souvislost je zřejmá především u vnitřního tlaku, tj. tlaku taveniny ve vlastní dutině vstřikovací formy, který je ovlivňován nejen vnějším vstřikovacím tlakem, ale je funkcí i ostatních uvedených faktorů. Samotné zvýšení vstřikovací teploty může způsobit zvýšení vnitřního tlaku o několik desítek procent, i když vnější vstřikovací tlak zůstává konstantní. Podobně je ovlivňován vnitřní tlak velikostí ústí vtoku. Výsledky ukázaly, že tzv. bodové vtoky o průměru ústí menším než 1 mm nejsou pro vstřikování vhodné, protože způsobují velké ztráty tlaku. Naproti tomu ústí vtoku s průměrem nad 2 mm se ukázalo jako vyhovující.

Teplota vstřikovací formy sice ovlivnila vnitřní tlak poměrně málo, přesto však lze doporučit používání teploty formy co nejvyšší.

Vzhledem k vzájemné závislosti technologických faktorů mezi sebou, je nutné hodnotit jejich vliv na vlastnosti výstřiku komplexně. K tomu je nezbytné vybavit vstřikovací formy určené především pro výrobu zkušebních těles potřebnými měřicími přístroji, hlavně k měření vnitřního tlaku. Jestliže není znám vnitřní tlak při vstřikování, pak nelze ani hodnotit např. "vliv vstři-

kovací teploty při konstantním vstříkovacím tlaku na vlastnosti výstříku", jak bývá v literatuře uváděno, při čemž je vstříkovacím tlakem míněn vnější tlak. V konečném výsledku se totiž projevuje nejenom vliv zvýšené vstříkovací teploty, ale i zvýšeného vnitřního tlaku.

Podobný závěr platí i o hodnocení vlivu ústí vtoku, o vlivu konstrukce vtokových kanálů atd.

5.2. Pro vlastnosti výstříku má velký význam tvar samotné dutiny vstříkovací formy, hlavně pak průřez dutiny určující tloušťku stěny výstříku. V dutině formy dochází k poklesu vnitřního tlaku od ústí vtoku směrem k okraji výstříku. Absolutní hodnota tlakového spádu závisí jednak na tloušťce dutiny, jednak na podmínkách vstříkování. K vysokému poklesu tlaku dochází u výstříků s tloušťkou asi 1 mm a tenších, výstříky s tloušťkou 2 mm vykazovaly pokles tlaku mnohem menší.

U tenkostěnných výstříků byl tlakový spád ovlivněn také ostatními technologickými faktory, a to vstříkovací teplotou a průměrem ústí vtoku. Zvyšující se vstříkovací teplota, právě tak jako zvětšování ústí vtoku mělo za následek zmenšení tlakového spádu.

5.3. Změna vnitřního tlaku měla za následek změnu rozměrů výstříku. Zvyšováním vnitřního tlaku vzrůstala tloušťka výstříků, a to i tehdy, jestliže byl lis vybaven kolenným uzavíracím ústrojím a i když vnitřní síla v dutině vstříkovací formy byla menší než celková uzavírací síla

lísu. Ke změně rozměrů ve směru uzavírací síly dochází bezesporu hlavně vlivem pružných deformací zavíracího ústrojí lísu způsobených vnitřní silou. Změna tloušťky výstřiku za těchto podmínek může dosáhnout několika procent i desítek procent. Např. u kotoučů o tloušťce 1 mm činila až 45 % teoretické tloušťky dutiny, u kotoučů 2 mm tlustých až 20 %. U pravoúhlých desek, jejichž rozměry nebyly systematicky sledovány, byly pozorovány odchylky od požadované tloušťky v rozmezí ± 10 %.

Změna tloušťky výstřiku působí v praxi velké potíže. V provozní výrobě je příčinou nedodržení předepsaných tolerancí rozměrů a překračování spotřeby materiálu. Rovněž ve zkušebnictví komplikuje měnící se tloušťka poměry, protože změnu tloušťky výstřiku se mění i poměry během plnění dutiny formy při vytlačování. Výstřik s tlustší stěnou je potom vlastně vyráběn za jiných podmínek než výstřik se stěnami o 10 či 20 % tenšími.

K tomu, aby byla zaručena skutečně stálá tloušťka výstřiku, by bylo nutno opatřit vytlačovací formu speciálním uzavíracím mechanismem, který by nedovolil její pootevření při měnícím se vnitřním tlaku.

Vnitřní tlak ovšem ovlivňuje i rozměry výstřiku vázané formou. Vlivem vysoké stlačitelnosti tavenin plastických hmot způsobuje zvyšování vnitřního tlaku, větší elastické stlačení a při poklesu tlaku během chladnutí i větší odpružení hmot v dutině formy. Vyšší vnitřní tlak má za následek zvětšení rozměrů výstřiků a tedy zmenšení jejich smrštění. Se stoupajícím vnitřním tlakem se zvyšuje i váha výstřiků.

5.4. U výstřiků vstříkovaných středovým vtokem, nebo obecně tahdy umožňuje-li dutina formy, aby se tavenina šířila převážně v soustředných kruzích, klesá vnitřní tlak od ústí vtoku podle logaritmické křivky. Protože tlakový spád ovlivňuje stupeň orientace molekul, projevuje se jeho vliv i na mechanické vlastnosti výstřiků, které nejsou ve všech místech výstřiku stejné.

Toto zjištění má pro praxi velký význam, protože ani normalizovaná zkušební tělesa nemají vlastností všude stejné. Těleso pro tahovou zkoušku vytvářelo krček v měřené části vždy na vzdálenějším konci od ústí vtoku, kde byla pevnost nejnižší. Hodnoty mechanických vlastností naměřené na zkušebních tělesech mohou být proto přímo porovnávány jen s vlastnostmi výstřiků tvarově blízkých, ale vlastností nelze přenášet automaticky na výstřiky zcela jiných tvarů. Aby se vznik nehomogenity u zkušebního tělesa omezil na minimum, měla by být měřená část tělesa co nejkratší.

5.5. Nerovnoměrnost vlastností výstřiků je dvojího druhu.

Orientace molekul vyvolává anizotropii vlastností, rozdělení vnitřního tlaku v dutině vstříkovací formy má za následek nehomogenitu čili nestejnorodost výstřiku.

Anizotropie vlastností byla potvrzena zkouškou, při které bylo zkušební mikrotěleso namáháno ve směru jedné osy, tj. stanovením horní meze kluzu. Nejvyšší hodnota horní meze kluzu neodpovídala ve všech případech radiálnímu směru odebrání mikrotělesa. Zkoušky ukázaly, že hodnoty meze kluzu v radiálním a tangenciálním směru jsou

si často blízké, přičemž na malých poloměrech od ústí vtoku může být mez kluzu v radiálním směru vyšší než v tangenciálním, avšak na větších poloměrech mohou být poměry opačné. Nejnižší mez kluzu vykazovala mikrotělesa odebraná pod úhlem asi 45° k radiálnímu směru. V tomto směru vykazovala tělesa i největší tažnost, zatím co ve směru tangenciálním byla tažnost nejmenší.

Vysoké hodnoty horní meze kluzu v tangenciálním směru jsou vysvětlitelné tím, že molekuly se při vyplňování dutiny formy nepohybují jenom v radiálním směru, ale v důsledku zvětšování obvodu vstříkovaného kotouče i ve směru tangenciálním.

- 5.6. Stanovení horní meze kluzu potvrdilo také nehomogenitu výstřiku. Hodnoty meze kluzu klesaly se zvětšující se vzdáleností od ústí vtoku. Ještě lépe byla homogenita prokázána stanovením meze pevnosti ve stříhu. Rozdělení meze pevnosti ve stříhu po ploše výstřiku odpovídalo průběhu podle logaritmické křivky. K největšímu poklesu pevnosti docházelo v blízkém okolí ústí vtoku, dále od něho byl pokles mírnější.

Nehomogenita výstřiku závisela jednak na jeho tloušťce, jednak na technologických faktorech. Tenkostěnné výstřiky s tloušťkou kolem 1 mm se vyznačovaly velkou nehomogenitou, výstřiky o tloušťce kolem 2 mm byly homogennější a jak dokázal výstřik dětské vaničky, který měl tloušťku stěny téměř 4 mm, byla homogenita ještě vyšší.

Z technologických faktorů příznivě ovlivnily homogenitu výstřiku zvyšující se vstřikovací teplota a zvy-

žující se teplota vstřikovací formy.

Nehomogenita vlastností byla potvrzena i jinými zkušebními metodami. Tvrdost vykazovala nejvyšší hodnoty v blízkosti ústí vtoku, k okrajům výstřiku klesala. Stejnou tendenci vykazovala i mikrotvrdost a penetrometrická měření.

5.7. Hodnocení stupně orientace molekul ve výstřiku z lineárního polyetylénu se poměrně nejlépe osvědčila penetrometrická metoda, která poskytovala nejvěrohodnější výsledky. Má ovšem také některé nedostatky. K největším patří, že neposkytuje žádné přesně definovatelné fyzikální hodnoty, takže hodnocení orientace molekul je pouze relativní. Předností metody naopak je, že poškození zroušeného tělesa je nepatrné a že k měření postačuje i malé těleso, jehož rozměry nejsou rozhodující. Nevýhodou je, že je citlivá na kolísání teploty v měřárně, takže při malých rozdílech měřené vlastnosti se její reprodukovatelnost stává spornou. Přesto bude účelné metodu dále pracovat.

Další metody, které byly ověřeny, a to rentgenografie a stanovení smrštění ze tepla, neposkytly očekávaný výsledek. Na rentgenogramech povrchové a středové vrstvy výstřiku nebylo možné s pomocí metod, které byly k dispozici, zjistit strukturální rozdíly. Vstatně se zdá pravděpodobné, že orientace molekul vznikající při toku taveniny dutinou vstřikovací formy má jiný charakter než orientace molekul vyvolaná dloužením polotovarů za stlačení. Z toho také pramení nestejnost rentgenogramů.

Smrštění za tepla rovněž nesplnilo očekávání pro příliš velký rozptyl výsledků. Zdá se, že tato metoda za podmínek, které byly v práci použity, není vhodná pro krystalické plastické hmoty.

5.8. Pro hodnocení mechanických vlastností finálních výstřihů je možno doporučit stanovení meze pevnosti ve stříhu. Metoda má řadu předností: Poskytuje hodnoty, které jsou dobře reprodukovatelné a přesnost stanovení byla ve všech případech vyšší než stanovení horní meze kluzu. Měření pevnosti ve stříhu je možno provádět na běžných zkušebních strojích pro stanovení pevnosti v tahu. Sama metoda je jednoduchá a pořizovací náklady pro zhotovení střížného nástroje jsou minimální. Příprava zkušebních těles pro zkoušku je snadná. Zkušební podmínky jsou dobře definovatelné. Podobně jako u jiných zkoušek mechanických vlastností je ovšem nutné, aby tloušťka zkušebního tělesa byla konstantní. Také zde má však pevnost ve stříhu přednost v tom, že měřená plocha je malá, takže i tento požadavek je zpravidla snadno splnitelný.

5.9. Mez pevnosti ve stříhu vyjadřuje průměrnou hodnotu ve zkoušeném místě bez ohledu na izotropii vlastností tělesa. Byla-li mez pevnosti ve stříhu porovnána s průměrnou hodnotou horní meze kluzu v témže místě tělesa, byl tento poměr stálý. Tento poznatek umožňuje na základě stanovení pevnosti ve stříhu odhadnout průměrnou hodnotu horní meze kluzu v daném místě.

Podobná souvislost byla nalezena i mezi pevností

ve stříhu a tvrdosti výstřiku. Protože měření tvrdosti patří k nedestruktivním zkouškám, bylo by možno této závislosti využít k nepřímému odhadu mechanických vlastností finálních výstřiků, aniž by došlo k jejich zničení. Přesné zkušební podmínky měření tvrdosti však bude nutno ještě dále zpracovat.

5.10. Jednotlivé technologické faktory ovlivnily mechanické vlastnosti výstřiků takto :

Zvyšování vstřikovací teploty způsobilo pokles mechanických vlastností výstřiků z lineárního polyetylénu. Vlastnosti klesaly do teploty asi 200 až 220 °C, načež docházelo opět k mírnému vzestupu, který souvisel se zvětšováním velikosti molekul vystavených vstřikovací teplotě v tavicí komoře. Klesající část křivky souvisela se zmenšováním stupně orientace molekul. Stoupající část křivky se neobjevila u kotoučů. To je možno vysvětlit tím, že kotouče byly vstřikovány na šnekovém lisu, takže polyetylén byl vystaven vstřikovací teplotě mnohem kratší dobu než tomu bylo u lisu pístových.

Zvyšující se teplota vstřikovací formy měla za následek vzrůst mechanických vlastností výstřiků, což souvisí se zvyšováním stupně krystalinity. Vzrůst krystalinity byl potvrzen zvýšením hustoty výstřiku.

Mechanické vlastnosti se také zvyšovaly v důsledku zvyšování vstřikovacího tlaku. Jeho vliv byl zřetelný u těles pro tahovou zkoušku. U kotoučů při zvýšení vstřikovacího tlaku docházelo ke snížení mechanických vlastností vztažených na jednotku plochy. Tento zdánlivý

pokles byl způsoben současným zvětšováním tloušťky kotoučů, což vedlo k relativnímu poklesu vlastností.

Tloušťka výstřiku ovlivňovala měrné mechanické vlastnosti velmi podstatně. Všeobecně byla pevnost vztažená na jednotku plochy u tlustých výstřiků nižší než u tenkostěnných. Rozdíl hodnot dosahoval až několika desítek procent.

Také konstrukce vtokové soustavy, v tomto případě velikosti ústí vtoku, měla vliv na mechanické vlastnosti výstřiku. Jestliže se průřez ústí vtoku zvětšoval, mechanické vlastnosti stoupaly.

- 5.11. Aplikace poznatků obsažených v této práci, především navržený způsob kvantitativního hodnocení mechanických vlastností finálních výstřiků, bude mít pro praxi význam z několika hledisek. Pro konstruktéry výrobků z plastických hmot bude možno postupně shromáždit počklady, které jim budou sloužit při konstrukčních výpočtech dalších výrobků. Výrobce bude mít možnost na základě znalostí mechanických vlastností výstřiků kontrolovat dodržování technologické kázně při výrobě a hodnotit vliv jednotlivých faktorů nebo celých technologických postupů na kvalitu konečného výrobku. Tak bude moci odhalovat příčiny zmetkovitosti, ovlivňovat v příznivém směru kvalitu výrobků a tím prodlužovat jejich životnost. Zvýšení kvality výrobků a snížení zmetkovitosti se příznivě projeví na ekonomických ukazatelích zpracovatelského podniku, takže aplikace poznatků přinese přímé finanční zisky.

Možnost hodnotit mechanické vlastnosti výstřiků v jeho různých místech umožní konstruktérům navrhovat tvar výrobků tak, aby pevnost výstřiků v nejvíc namáhaných místech byla vhodnou konstrukční úpravou zvýšena a tak aby bylo dosaženo vyšší spolehlivosti při funkci výrobku.

Hodnocení vlastností výstřiků také umožní posoudit vhodnost určitých druhů plastických hmot pro daný typ výrobku a zvolit nejvýhodnější typ hmoty pro požadovaný účel. Poznatky tak mohou složit do jisté míry i pro účely vstupní kontroly při přejímce dodávek hmot, ať již od jednoho či více výrobců.

Znalost závislosti mechanických vlastností výstřiku na jeho tvaru nabízí možnost vypracovat jednoduchou zkušební metodu, která bude umožňovat hodnotit citlivost zkoušené hmoty k podmínkám vetřikování. Princip metody bude spočívat ve vetřikování řady zkušebních těles lišících se navzájem svými rozměry, která budou vetřikována za různých technologických podmínek. Stanovením jejich mechanických vlastností bude možno určit stupeň citlivosti hmoty k měnícím se podmínkám vetřikování. Tato znalost zpětně ovlivní volbu optimálního typu hmoty.

Navržená zkušební metoda, založená na měření pevnosti ve stíhu, může být aplikována i v oblasti dalších výzkumů, např. při zkoušení stárnutí výrobků z plastických hmot, při hodnocení vlivu chemických činidel atd.

5.12. Výsledky, kterých bylo dosaženo v této práci, se vzta-
hují na jeden typ lineárního polyetylénu. Z tohoto
hlediska je třeba výsledky hodnotit. Orientační zkoušky
prováděné mimo rámec práce však ukázaly, že závěry v práci
formulované, platí i u jiných druhů plastických hmot,
i když konkrétní vztahy, např. vztah meze pevnosti
ve střihu a horní meze kluzu apod., se případ od přípa-
du liší. Aplikace poznatků z této práce na jiné ter-
moplasty se však jeví velmi nadějná.

6. PŘÍLOHY

6.1. Příloha 1 - tabulka 31

Teoretická závislost tloušťky ztuhlé povrchové vrstvy h_e ve výstřiku z lineárního polyetylénu na podmínkách vstřikování

Tloušťka h_e [mm]				
T_{vs} [°C]	180	200	220	240
T_f [°C]				
10	0,845	0,763	0,730	0,670
50	0,774	0,696	0,644	0,605
90	0,631	0,596	0,550	0,522

6.2. Příloha 2 - Vypracování metody měření pevnosti ve stříhu

Protože nebyly k dispozici žádné literární údaje o používání pevnosti ve stříhu u plastických hmot, bylo nutno metodu ověřit řadou pokusů.

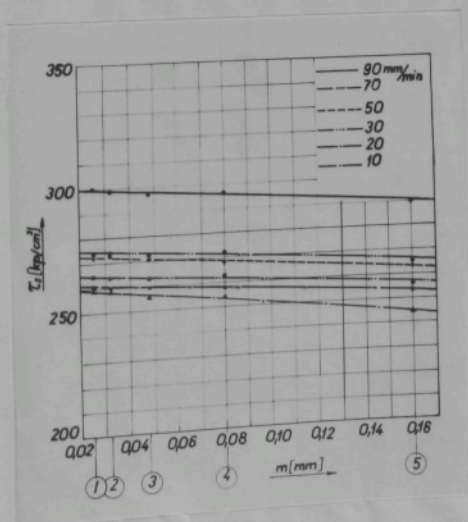
Pro zkoušky byly zvoleny následující podmínky :

1. Průstřížník byl kruhového tvaru, protože je nejvhodnější jak z hlediska výroby, tak i z hlediska vyhodnocování výsledků. U složitějších tvarů by se zkomplikovalo rozdělení napětí ve střížné ploše. Kruhový tvar je také v souladu s normou ASTM D 732-46, která byla vzata za základ.
2. Základní řada pokusů byla provedena na vytlačovaných deskách z lineárního polyetylénu, kde byla předpokládána dostačující izotropie vlastností. Lisované desky z lineárního polyetylénu, které by tuto podmínku splňovaly nejlépe, nebyly k dispozici.

3. Postupně byla ověřena závislost meze pevnosti ve stříhu na těchto proměnných veličinách :

- 3.1. na střížné vůli,
- 3.2. na střížné rychlosti,
- 3.3. na průměru průstřížníku,
- 3.4. na tloušťce desky.

Základní řada pokusů byla provedena s průstřížníkem o průměru 25 mm, protože ASTM předepisuje průměr 1 inch (25,4 mm). Tento průměr vyhovoval i proto, že střížná plocha je dostatečně velká, takže místní nestejnoročnost v desce, která se přece jen může vyskytnout, ovlivní výslednou hodnotu jen nepatrně. Závislost meze pevnosti ve stříhu τ_s desek vyrobených ze sovětského lištárního polyetylénu typ 4020 na střížné vůli m a střížné rychlosti je na obr. 48.



Obr. 48. Závislost meze pevnosti ve stříhu τ_s na střížné vůli m a střížné rychlosti

Vliv průměru průstřížníku na mez pevnosti ve střihu byl zkoušen při rychlosti 90 mm/min při střizné vůli 0,16 mm. Výsledky jsou v tabulce 32.

Tab.32. Závislost meze pevnosti ve střihu τ_s na průměru průstřížníku d_p

d_p [mm]	τ_s [kp/cm ²]
5	257
15	233
25	243

Stanovení meze pevnosti na deskách o tloušťce 1 a 2,8 mm ukázalo, že pevnost ve střihu stoupá se zmenšující se tloušťkou desky.

Poznámka : Přesnost metody byla ověřena vypočítáním variačního koeficientu asi ze 40 pětic měření. (Každý pokus byl opakován pětkrát.) Variační koeficient celého souboru měření činil $V_{\tau_s} = \pm 0,66 \%$. Metoda se tedy ukázala jako velice přesná.

Zhodnocení závislosti meze pevnosti ve střihu.

1. Mez pevnosti ve střihu stoupá při zvyšující se střizné rychlosti. Tato závislost potvrzuje obecně známou skutečnost při zkoušení mechanických vlastností plastických hmot.
2. Mez pevnosti ve střihu stoupá při zmenšující se střizné vůli. Příčina spočívá v tom, že při malé vůli se více projevuje vliv elastického stlačování materiálu v okolí střizné plochy. Tím se zvyšují hodnoty radiálního i tan-

genciálního napětí ve střižné ploše, což se projeví i ve výsledné hodnotě pevnosti ve stříhu.

3. Mez pevnosti ve stříhu je nejvyšší u průměru průstřižníku 5 mm, nejmenší u průměru 15 mm. Vysvětlení je následující : U malého průstřižníku se projevuje velký vliv elastického stlačení hmoty. Poměr stlačeného objemu k celkovému objemu prostřižku je u malých průměrů průstřižníku největší. U velkého průměru průstřižníku se naopak začíná projevovat vliv přidavných ohybových napětí. Ze zkoušených průměrů se nejideálnějšímu případu "čistého stříhu" blíží průstřižník průměrem 15 mm. Proto byl ve vlastní práci také výhradně používán.

4. Hodnoty meze pevnosti ve stříhu stoupají při zmenšující se tloušťce desky. Příčina spočívá jednak ve větším elastickém stlačení, jednak se projevuje vliv technologie zpracování, která u tenkých desek vyvolává relativně vyšší orientaci molekul než u tlustých.

Poměr horní meze kluzu σ_{kt} a meze pevnosti ve stříhu σ_s

Aby bylo možno zjistit, zda horní mez kluzu a mez pevnosti ve stříhu jsou v určitém poměru, byla z desek zhotovena pomocí střižného nástroje dle obr. 26 zkoušební tělesa pro tahovou zkoušku a na nich byla stanovena horní mez kluzu.

Variační koeficient stanovení horní meze kluzu na vystřižených tělesech byl roven $V = \pm 1,62 \%$. Mez pevnosti v tahu byla stanovena při stejných rychlostech jako mez pevnosti ve stříhu. Z naměřených hodnot byl vypočítán poměr $B = \frac{\sigma_{ut}}{\sigma_s}$. Tento poměr byl nezávislý na rychlosti zkoušky, což svědčí o analogickém chování materiálu při obou zkouškách. Byl však závislý na střížné vůli: Při střížné vůli 0,02 mm se rovnal $B^* = 1,06$ až 1,03, při střížné vůli 0,16 mm byl roven $B^* = 1,11$ až 1,09. Při dané konstrukci střížného nástroje a shodných podmínkách zkoušky je poměr B stálý.

Zhodnocení výsledku stříhové zkoušky.

Výsledky měření meze pevnosti ve stříhu ukazují, že metoda má dobrou reprodukovatelnost a že je přesnější než stanovení horní meze kluzu. Poměr meze pevnosti ve stříhu a horní meze kluzu je za odpovídajících si zkušebních podmínek veličinou stálou. Existují proto všechny předpoklady k tomu, aby pevnost ve stříhu byla používána při zjišťování materiálových vlastností výrobků z plastických hmot.

6.3. Příloha 3 - Ověření penetrometrické metody

Před vlastní aplikací penetrometrické metody k hodnocení orientace molekul ve výrobcích z polyetylenu bylo nutno

se přesvědčit, zda výsledky měření jsou opravdu měřítkem orientace molekul. Ověření bylo provedeno následujícím způsobem :

Ze zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku dle obr. 17 byla vyříznuta střední část o rozměrech cca 6 x 4 x 15 mm. Nejprve byla změřena hloubka vpichu na povrchu tělesa, potom byla z povrchu na mikrotomu seříznuta vrstva 0,5 mm tlustá a bylo provedeno další měření, opět seříznuta 0,5 mm vrstva atd. Celkově byly odstraněny tři vrstvy. Výsledky měření na dvou tělesech vyrobených vstříkováním při $T_{vs} = 200^{\circ}\text{C}$ a $P_{vs} = 570 \text{ kp/cm}^2$ a 750 kp/cm^2 jsou uvedeny v tabulce 33.

Tab.33. Hloubka vpichu jehly na výstřiku s postupně zmenšovanou tloušťkou

Druh výstřiku	I				II			
Tloušťka výstřiku [mm]	4,1	3,6	3,1	2,6	4,1	3,6	3,1	2,6
Hloubka vpichu [mm]. 10^2	83	84	83	73	88	95	94	79

V tabulce značí :

I - $T_{vs} = 200^{\circ}\text{C}$, $P_{vs} = 570 \text{ kp/cm}^2$

II - $T_{vs} = 200^{\circ}\text{C}$, $P_{vs} = 750 \text{ kp/cm}^2$

Výsledky zroubek byly uspokojující. V soulase s teorií vyvolával vyšší vstříkovací tlak vyšší stupeň orientace. Výsledky také potvrdily teorii Ballmana Teora, podle níž

je orientace soustředěna v povrchové vrstvě s maximem mezi povrchem a středem výstřiku.

6.4. Příloha 4

K výpočtu doby teoreticky potřebné k zatuhnutí ústí vtoku bylo použito následujícího vzorce :

$$t = \frac{1}{\left(\frac{23,14}{d_u^2} + \frac{\pi^2}{l_u^2} \right) a} \cdot \ln \left[6,396 \frac{Q_a}{Q_m} \right] \quad (45)$$

kde l_u je délka ústí vtoku v mm.

Teoretická doba chlazení pro nejnepříznivější případ odpovídající vstřikovací teplotě $T_{vs} = 240^\circ \text{C}$ je uvedena v tabulce 34.

Tab.34. Závislost doby teoreticky potřebné k zatuhnutí ústí vtoku různého průměru na teplotě vstřikovací formy pro vstřikovací teplotu $T_{vs} = 240^\circ \text{C}$

$T_f [^\circ \text{C}]$	$t \text{ [sec]}$		
	10	50	90
$d_u \text{ [mm]}$			
1	1,5	1,7	2,0
2	6,8	7,3	7,7
3	12,2	13,4	16,3
4	19,3	21,2	25,7
5	27,0	29,6	36,0

6.5. Příloha 5

Tab.35. Závislost tlaku v trysce tavicí komory P_d a vnitřního tlaku P_i na vstřikovací teplotě T_{vs} , vstřikovacím tlaku P_{vs} a teplotě vstřikovací formy T_f

$T_{vs} [^{\circ}\text{C}]$	160	180	200	220	260
$P_{vs} = 570 \text{ kp/cm}^2$					
$P_d [\text{kp/cm}^2]$	306	353	370	380	404
$P_i [\text{kp/cm}^2] \quad T_f = 30^{\circ}\text{C}$	220	303	322	328	366
$T_f = 70^{\circ}\text{C}$	219	323	348	350	
$P_{vs} = 670 \text{ kp/cm}^2$					
$P_d [\text{kp/cm}^2]$	412	477	485	505	535
$P_i [\text{kp/cm}^2] \quad T_f = 30^{\circ}\text{C}$	310	415	439	466	471
$T_f = 70^{\circ}\text{C}$	328	447	448	466	
$P_{vs} = 750 \text{ kp/cm}^2$					
$P_d [\text{kp/cm}^2]$	505	577	605	608	632
$P_i [\text{kp/cm}^2] \quad T_f = 30^{\circ}\text{C}$	422	493	540	548	569
$T_f = 70^{\circ}\text{C}$	418	546	532	569	

6.6. Příloha 6

Tab.36. Závislost podélného smrštění s na T_{vs} , P_{vs} a T_f

$s [\%]$					
$T_{vs} [^{\circ}\text{C}]$	160	180	200	220	260
$P_{vs} = 570 \text{ kp/cm}^2$					
$T_f = 30^{\circ}\text{C}$	2,80	2,60	2,55	2,50	2,60
$T_f = 70^{\circ}\text{C}$	3,45	3,10	2,85	2,70	---
$P_{vs} = 670 \text{ kp/cm}^2$					
$T_f = 30^{\circ}\text{C}$	2,65	2,45	2,35	2,35	2,45
$T_f = 70^{\circ}\text{C}$	3,25	2,85	2,60	2,60	---
$P_{vs} = 750 \text{ kp/cm}^2$					
$T_f = 30^{\circ}\text{C}$	2,45	2,20	2,25	2,25	2,35
$T_f = 70^{\circ}\text{C}$	2,90	2,60	2,50	2,55	---

6.7. Příloha 7

Tab.37. Vliv podmínek vetřikování na hustotu ρ a váhu
výstřiku g

$T_{vs} [^{\circ}C]$	160	180	200	220	260
$P_{vs} = 570 \text{ kp/cm}^2$					
$T_f = 30^{\circ}C$					
$\rho [p/cm^3]$	0,9528	0,9528	0,9531	0,9530	0,9530
$g [p]$	4,9583	5,0275	5,0638	5,0772	5,0909
$T_f = 70^{\circ}C$					
$\rho [p/cm^3]$	0,9561	0,9563	0,9564	0,9565	—
$g [p]$	4,9390	4,9971	5,0241	5,0378	—
$P_{vs} = 670 \text{ kp/cm}^2$					
$T_f = 30^{\circ}C$					
$\rho [p/cm^3]$	0,9531	0,9531	0,9531	0,9533	0,9533
$g [p]$	4,9856	5,0586	5,0897	5,1133	5,1224
$T_f = 70^{\circ}C$					
$\rho [p/cm^3]$	0,9562	0,9565	0,9566	0,9566	—
$g [p]$	4,9643	5,0312	5,0553	5,0773	—
$P_{vs} = 750 \text{ kp/cm}^2$					
$T_f = 30^{\circ}C$					
$\rho [p/cm^3]$	0,9534	0,9533	0,9534	0,9536	0,9534
$g [p]$	5,0055	5,0735	5,1157	5,1389	5,1501
$T_f = 70^{\circ}C$					
$\rho [p/cm^3]$	0,9566	0,9567	0,9568	0,9570	—
$g [p]$	4,9977	5,0598	5,0823	5,1055	—

6.8. Příloha 8

Tab.38. Závislost horní meze kluzu $\bar{\sigma}_{kt}$ tažnosti při pře-tržení ϵ_p a tažnosti na horní mezí kluzu ϵ_k zkusebních těles na podmínkách vstřikování; $du = 4$ mm

$T_{vs} [^{\circ}C]$	160	180	200	220	260
$P_{vs} = 570 \text{ kp/cm}^2$					
$T_f = 30^{\circ}C \quad \bar{\sigma}_{kt} [\text{kp/cm}^2]$	285,1	279,8	278,7	280,2	289,0
$\epsilon_p [\%]$	252	273	276	280	306
$\epsilon_k [\%]$	18,0	17,6	18,6	17,0	---
$T_f = 70^{\circ}C \quad \bar{\sigma}_{kt} [\text{kp/cm}^2]$	296,2	298,2	297,4	291,0	---
$\epsilon_p [\%]$	320	83	76	60	---
$\epsilon_k [\%]$	17,6	19,0	17,6	18,6	---
$P_{vs} = 670 \text{ kp/cm}^2$					
$T_f = 30^{\circ}C \quad \bar{\sigma}_{kt} [\text{kp/cm}^2]$	296,4	286,6	283,0	281,1	288,0
$\epsilon_p [\%]$	83	242	90	185	194
$\epsilon_k [\%]$	18,2	19,2	19,0	19,5	---
$T_f = 70^{\circ}C \quad \bar{\sigma}_{kt} [\text{kp/cm}^2]$	303,2	306,4	303,0	296,2	---
$\epsilon_p [\%]$	106	58	70	64	---
$\epsilon_k [\%]$	18,2	21,4	20,2	19,4	---
$P_{vs} = 750 \text{ kp/cm}^2$					
$T_f = 30^{\circ}C \quad \bar{\sigma}_{kt} [\text{kp/cm}^2]$	305,3	293,4	283,7	281,9	286,2
$\epsilon_p [\%]$	64	90	86	126	200
$\epsilon_k [\%]$	18,8	17,6	21,6	20,0	---
$T_f = 70^{\circ}C \quad \bar{\sigma}_{kt} [\text{kp/cm}^2]$	315,7	309,0	309,6	293,4	---
$\epsilon_p [\%]$	72	70	52	80	---
$\epsilon_k [\%]$	18,6	22,0	20,6	21,0	---

6.9. Příloha 2

Tab.39. Vliv poloměru r a úhlu odebrání mikrotělesa na horní mez kluzu σ_{kt} na kotoučích

Podmínky zhotovení kotouče :

1. $T_{vs} = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{vs} = 610\text{ kp/cm}^2$, $T_f = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $du = 2\text{ mm}$, $hk = 1,25\text{ mm}$					
$\sigma_{kt} [\text{kp/cm}^2]$					
Úhel $[\text{ }^{\circ}]$	0	30	45	60	90
$r [\text{mm}]$					
30	407	351	301	306	341
35	392	336	301	302	329
40	385	328	300	298	324
45	379	305	288	301	324
50	365	317	281	297	320
55	372	297	275	298	327
2. $T_{vs} = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{vs} = 530\text{ kp/cm}^2$, $T_f = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $du = 2\text{ mm}$, $hk = 1,30\text{ mm}$					
30	378	323	315	321	337
35	369	304	305	309	333
40	364	300	292	313	326
45	367	292	302	305	331
50	359	293	293	301	328
55	348	301	290	293	325
3. $T_{vs} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{vs} = 310\text{ kp/cm}^2$, $T_f = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $du = 2\text{ mm}$, $hk = 2,05\text{ mm}$					
30	300	287	281	291	294
35	297	285	288	294	293
40	293	281	282	287	291
45	292	297	278	283	290
50	293	279	281	284	288
55	285	278	282	281	285
4. $T_{vs} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{vs} = 530\text{ kp/cm}^2$, $T_f = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $du = 2\text{ mm}$, $hk = 2,25\text{ mm}$					
30	319	292	283	302	306
35	314	288	283	301	307
40	314	295	286	297	305
45	306	288	287	298	304
50	303	288	285	297	299
55	301	285	297	299	302

6.10. Příloha 10

Tab.40. Rozložení meze pevnosti ve střihu τ_s na deskách
ve směru obou uhlopříček

		τ_s [kp/cm ²]		
Podmínky vstřikování	T _{vs} [°C]	160	180	180
	T _f [°C]	10	50	90
r_s [mm]				
60		255	267	276
40		272	276	291
20		288	281	296
7,5		319	303	315
20		296	281	298
40		270	274	285
60		626	258	277
60		255	264	281
40		272	278	289
40		279	276	286
60		263	269	275

6.11. Příloha 11

Tab.41. Tvrdost HR 5/31/10 a HR 5/31/60 měřená na deskách

			HR [kp/cm ²]			
r_s [mm]			60	40	20	7,5
T_f [°C]	T_{vs} [°C]					
10	160	HR 5/31/10	1010	1025	1121	1270
		HR 5/31/60	832	878	921	1005
	180	HR 5/31/10	1058	1117	1152	1216
		HR 5/31/60	875	892	922	966
	200	HR 5/31/10	1042	1095	1127	1146
		HR 5/31/60	850	889	913	927
	220	HR 5/31/10	1009	1053	1117	1134
		HR 5/31/60	823	853	889	902
	240	HR 5/31/10	1001	1060	1088	1110
		HR 5/31/60	802	846	859	868
	160	HR 5/31/10	1025	1100	1128	1404
		HR 5/31/60	837	872	881	1062
	180	HR 5/31/10	1037	1070	1097	1201
		HR 5/31/60	824	861	876	973
	200	HR 5/31/10	1008	1063	1106	1154
		HR 5/31/60	824	864	885	916
50	220	HR 5/31/10	973	1027	1098	1098
		HR 5/31/60	813	855	875	879
	240	HR 5/31/10	967	1053	1100	1128
		HR 5/31/60	821	845	856	876
	160	HR 5/31/10	1127	1181	1257	1368
		HR 5/31/60	887	932	965	1104
	180	HR 5/31/10	1051	1128	1210	1250
		HR 5/31/60	860	886	905	956
	200	HR 5/31/10	1033	1134	1161	1217
		HR 5/31/60	856	884	897	925
	220	HR 5/31/10	1030	1098	1151	1181
		HR 5/31/60	846	874	929	947
	240	HR 5/31/10	1025	1112	1157	1181
		HR 5/31/60	841	890	916	938

6.12. Příloha 12

Tab.42. Poměr meze pevnosti ve střihu τ_s a tvrdosti HR pro různé poloměry desky a pro různé podmínky vytřikování

		$Z = \frac{\tau_s}{HR}$			
r_s [mm]		60	40	20	7,5
T_f [°C]	T_{vs} [°C]				
10	160	0,316	0,308	0,312	0,307
	180	0,296	0,297	0,300	0,311
	200	0,302	0,297	0,299	0,320
	220	0,316	0,307	0,303	0,325
	240	0,333	0,320	0,324	0,337
50	160	0,328	0,323	0,330	0,291
	180	0,334	0,323	0,325	0,315
	200	0,329	0,318	0,320	0,324
	220	0,334	0,322	0,321	0,335
	240	0,325	0,322	0,323	0,324
90	160	0,312	0,306	0,304	0,308
	180	0,320	0,317	0,312	0,310
	200	0,324	0,318	0,318	0,312
	220	0,348	0,338	0,318	0,330
	240	0,346	0,330	0,320	0,328

6.13. Příloha 13

Tab. 43. Závislost hustoty ρ na poloměru desky r_g
a na podmínkách vstřikování

		ρ [p/cm ³]			
r_g [mm]		60	40	20	0
Tf [°C]	Tvs [°C]				
10	160	0,9700	0,9703	0,9709	0,9733
	180	0,9700	0,9703	0,9707	0,9734
	200	0,9702	0,9706	0,9711	0,9734
	220	0,9703	0,9704	0,9714	0,9727
	240	0,9702	0,9704	0,9709	0,9727
50	160	0,9722	0,9725	0,9734	0,9750
	180	0,9722	0,9723	0,9736	0,9750
	200	0,9722	0,9727	0,9733	0,9750
	220	0,9722	0,9725	0,9730	0,9750
	240	0,9722	0,9724	0,9730	0,9750
90	160	0,9751	0,9757	0,9757	0,9785
	180	0,9757	0,9760	0,9768	0,9786
	200	0,9759	0,9766	0,9767	0,9786
	220	0,9764	0,9767	0,9771	0,9786
	240	0,9762	0,9767	0,9772	0,9786

7.1. Seznam symbolů

- a - teplotní vodivost
- a_n - rázová houževnatost
- A - konstanta v rovnici pro viskozitu taveniny plastické hmoty
- b - šifra tělesa
- B - poměr ^{horní} meze ^{kluzu} ~~pevnosti~~ (v tahu) a meze pevnosti ve střihu
- c_p - měrné teplo
- C - konstanta v rovnici pro viskozitu taveniny
- C_s - konstanta v rovnici pro rovnováhu sil
- d - průměr
- d_p - průměr průstřížníku
- d_R - průměr kuličky při zkoušce tvrdosti podle Rockwella
- d_u - průměr ústí vtoku
- e - základ přirozených logaritmů
- E - aktivační energie toku polymerní taveniny
- f - funkční vztah mezi měřenou vlastností výstřiku a vlastností vyjadřující vliv podmínek zpracování
- F - plocha
- F_o - Fourierovo číslo
- g - váha výstřiku
- G - modul pružnosti ve smyku
- h - tloušťka
- h_e - tloušťka ztuhlé povrchové vrstvy
- h_k - tloušťka kotouče
- h_R - hloubka vtlaku kuličky Rockwellova tvrdoměru
- HR - tvrdost podle Rockwella
- HV - mikrotvrdost podle Vickerse
- I - vlastnost vyjadřující vliv podmínek vstřikování
- K - konstanta

- K_s - konstanta v rovnici pro průběh napětí
- l - délka nebo vzdálenost od ústí vtoku
- n - exponent v mocninovém zákoně
- N - tenzor deformace
- m - střižná vále
- M - střední molekulová váha polyméru
- P - tlak nebo síla
- P_d - vstřikovací tlak měřený v tryse
- P_i - vnitřní vstřikovací tlak, tj. tlak v dutině formy
- P_{is} - vnitřní tlak uprostřed kotouče
- P_{ik} - vnitřní tlak na kraji kotouče
- P_R - zatěžovací síla při měření tvrdosti podle Rockwella
- P_s - maximální síla při střižové zkoušce
- P_t - maximální síla při tahové zkoušce
- P_V - zatěžovací síla při měření mikrotvrdosti
- P_{vs} - vstřikovací tlak, tj. tlak na jednotku čela pístu
- Q_a - rozdíl teplot mezi stěnou formy a teplotou taveniny na počátku ochlazování
- Q_m - rozdíl teplot mezi povrchem a střední osou ochlazené desky v čase t
- r - poloměr
- r_s - poloměr desky
- r_u - poloměr ústí vtoku
- R - Boltzmannova konstanta
- s - smrštění výstřiku
- S - tenzor napětí
- t - čas
- T - teplota
- T_f - teplota vstřikovací formy
- T_{vs} - vstřikovací teplota

- v - smyková rychlost
- V - variační koeficient měřené vlastnosti
- $\bar{V}$ - průměrný variační koeficient vyjadřující homogenitu desek
- W_0 - vlastnost výstřiku z plastické hmoty bez vnitřního pnutí
- W_s - vlastnost výstřiku obsahujícího vnitřní pnutí
- x - libovolný bod kanálu, kterým protéká tavenina, měřený kolmo ke směru vtoku
- z - podélná osa výstřiku
- Z - poměr meze pevnosti ve stříhu a tvrdosti
- α - exponent v rovnici závislosti viskozity na smykovém napětí
- β - exponent ve vztahu pro závislost viskozity na molekulové váze polyméru
- f - zkos
- E - tažnost zkušebních těles při tahové zkoušce
- E_k - tažnost těles na horní mezi kluzu
- E_p - tažnost těles při přetržení
- η - viskozita taveniny polyméru
- h - hloubka vpichu jehly na penetrometrickém přístroji
- λ - tepelná vodivost
- μ - průměr uhlopříčky vtisku při stanovení mikrotvrdosti
- ρ - hustota
- σ_k - mez kluzu taveniny polyméru
- σ_{kt} - horní mez kluzu při tahové zkoušce
- σ_{ktr} - horní mez kluzu při tahové zkoušce v radiálním směru
- σ_{ktt} - horní mez kluzu při tahové zkoušce v tangenciálním směru
- σ_r - radiální napětí
- σ_t - tangenciální napětí

τ - smykové napětí

τ_s - mez pevnosti ve střihu

φ - úhel

ϕ - fluidita stanovená na vytlačovacím plastoměru

7.2. Seznam literatury a použitých pramenů

- [1] ABRAMOV, V.V. - KANAVEC, I.F. - MAMEDOV, R.I.:
Isledovanie režimov litija termoplastov pod davle-
nijem s ispolzovanijem mnogomestnoj formy. = "Plasti-
českije massy", 1965, č.7; 30-34.
- [2] AŠKENAZI, E.K.: -K voprosu ob anizotropii mehaničeskich
svojstv adnocno ~ or'entirovannyh plenok kristalli-
českich polimerov. = "Plastičeskije massy", 1964,
č.2: 67.
- [3] BALLMANN, R.L. - TOOR, H.L.: Orientation in Injection Mol-
ding. = "Modern Plastics", 1960 : 113, 114, 117, 120-
-122, 124, 205, 206, 207.
- [4] BALLMANN, R.L. - TOOR, H.L.: Stampaggio ed iniezione e sua
interpretazione reologica. = "Materie Plastiche",
1960, č.5: 445-453 a č.7: 706-715.
- [5] BARIET, CH.S.: Štruktura kovů, Nakladatelství ČSAV, Praha
1959.
- [6] BARTĚŇEV, G.M.: Über die Aktivierungsenergie des zähen
Fließens von Polymeren. = "Plaste und Kautschuk",
10, 1963: 587-589.
- [7] BARTĚŇEV, G.M.: Zakonomernosti i mehanizm vjazkovo tše-
nija liničnyh polimerov. = "Plastičeskije massy",
1964, č.12: 20-26.
- [8] BAUER, W.: Der Formfüllvorgang beim Spritzguss von Thermo-
plasten. = "Kunststoffe", 53, 1963: 210-217.
- [9] BECK, H.: Polystyrol. = "Kunststoffe", 49, 1959: 209-212.
- [10] BERNHARDT, E.C.: Processing of Thermoplastic Materials.
Reinhold Publishing Corporation, New York, 1963.
- [11] BILLMEYER, F.W.: Textbook of Polymer Chemistry, ruský
překlad. = Izdatělstvo inostrannoj literatury,
Moskva, 1968.
- [12] BOUKAL, I.: Výzkum vnitřního pnutí a jeho stanovení
v neprůhledných plastických hmotách, výzkumná zprá-
va Z-66-1645, 1966, SVUM Praha.
- [13] CORNELY, J.: Einführung in die Spritzgusstechnologie,
Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1965.
- [14] DIXON, R.R.: Determination of Stresses in Formed Plastics
Parts. = "Polymer Engineering and Science", 1966,
č.4; 156-157.
- [15] EULITZ, W.: Gesetzmässigkeiten beim Spritzguss von Ther-
moplasten. = "Plastverarbeiter", 10, 1956: 377-382.

- [16] GÄTH, R. - ORTHMANN, H.J. - SCHMITT, B.: Normwerte und Formteileigenschaften. = "Kunststoffe", 55, 1965 : 709-711.
- [17] GILMORE, G.D. - SPENCER, R.S. : Photographic Study of the Polymer Cycle in Injection Moulding. = "Plastics", 1951, 4.4: 116, 118, 120, 122, 124, 180, 183, 185.
- [18] HOFFMANN, O. - SACHS, G.: Introduction to the Theory of Plasticity for Engineers, ruský překlad. Gosudarstvennoje naučno - techničeskoe izdatelstvo mašinostroji- telnoj literatury, Moskva 1957.
- [19] HÖGBERG, H.: Einfluss der Oberflächenschicht auf die Festig- keit von Polystyrol-Spritzgussteilen. = "Kunststoffe", 47, 1957: 371-375.
- [20] HORSLEY, R.A. - LEE, D.J.A.: The Influence of Flow Orienta- tion and Injection Temperature on the Strength of Injection Mouldings. = "British Plastics", 1956, 8.4: 134-137, 152.
- [21] JACOBI, H.L.: Grundlagen der Extrudertechnik, Carl Hauser Verlag, München, 1960.
- [22] JUST, G.: Über die Rolle einiger Verarbeitungsparameter beim Spritzguss von Polyäthylen. = "Plaste und Kautschuk" 9, 1962: 16-23.
- [23] KANAVEC, I.F. - BALATOVA, L.G.: Teplovoje razširenije i šli- majemost termoplastov. = "Plastičeskije massy", 1964, 8.9: 50-55.
- [24] KNAPPE, W.: Die Festigkeit thermoplastischer Kunststoffe in Abhängigkeit von der Verarbeitungsbedingungen. = "Kunststoffe", 51, 1961: 562-569.
- [25] KREBS, J.: Vnitřní prnutí ve výrobcích z plastických hmot. = "Kaučuk a plastické hmoty", 1959, 8.10: 357-351.
- [26] KREBS, J. - VELIKOVSKÁ, E.: Zpracování nových druhů plastic- kých hmot, závěrečná zpráva 1-05/62, Plasti-mat n.p. Jablonec n.N.
- [27] KREBS, J.: Určování stupně vytvrzení výlisků z bakelitu penetrometrickým způsobem. = "Kaučuk a plastické hmo- ty", 1961, 8.7: 226-230.
- [28] KREBS, J.: Vliv počínání vstřikování na hustotu výstřiků z polyetylenu a polystyrénu. = "Plastické hmoty a kaučuk", 3, 1966: 1-4.
- [29] KVVATKOVSKAJA, G.F. - LAPŠIN, V.V.: Vlijanije technologičes- kich parametrov litja pod davlenijem i posledujuščej teplovoj obrabotki na plotnost polietilena nizkovo- davlenija. = "Plastičeskije massy", 1964, 8.3: 26-29.

- [30] KVATKOVSKAJA, G.F. - LAPŠIN, V.V.: Vlijanije technologičeskich parametrov processa litija pod davlenijem i posledujuščej teplovoj obrabotki na mehaničeskije svojstva polietilena nizkovo davlenija. = "Plastičeskije massy", 1964, č.4: 30-33.
- [31] LAPŠIN, V.V. - KOZLOV, P.M.: Vlijanije uslovij litija pod davlenijem na vnutrennije napraženijsa v detalach iz polietilola. = "Chimičeskaja promyslenost", 1958, č.4: 18-22.
- [32] MAMEDOV, R.I. - KANAVEC, I.F.: Vlijanije davlenija i skorosti vpryska na svojstva izděl' iz polipropilena. = "Plastičeskije massy", 1964, č.1: 27-35.
- [33] MAMEDOV, R.I. - KANAVEC, I.F.: Vlijanije temperatury litija na svojstva izděl'ij. = "Plastičeskije massy", 1964, č.2: 30-37.
- [34] NORTHMANN, D. - SEYFAHRT, P.: Einführung in die Verarbeitung der Plaste, 3. Teil, VEB Verlag Technik, Berlin 1963.
- [35] ORTHMANN, H.J.: Probleme und Aufgaben der Kunststoffprüfung. = "Kunststoffe", 55, 1965: 167-170.
- [36] ORTHMANN, H.J.: Einfluss der Moleküllorientierung und der eingefrorenen inneren Spannungen auf die Eigenschaften von Polystyrol-Formteilen. = "Kunststoffe", 55, 1965: 361-362.
- [37] ORTHMANN, H.J. - SCHMITT, B.: Das mechanische Niveau thermoplastischer Formmassen. = "Kunststoffe", 35, 1965: 779-784.
- [38] ORTHMANN, H.J.: Bedeutung und Grenzen der gegenwärtigen Standardprüfmethoden, referát na konf. enci v Liberci, 1965.
- [39] OTTO, H.W.: Orientierung und Schlagzähigkeit von Styrolpolymerisaten. = "Kunststoffe", 55, 1965: 170-172.
- [40] PEŠINA, E.: Základy teorie plasticity, učební texty vysokých škol, SNTL, Praha 1965.
- [41] PEŠINA, E.: Základy užité teorie plasticity, SNTL, Praha 1966.
- [42] RYBNÍKÁŘ, F.: Analýza a zloučení plastických hmot, SNTL, Praha 1965.
- [43] SEYFAHRT, P.: Zur Bestimmung der Zykluszeit beim Spritzgießen von Thermoplasten, referát na VSST, listopad 1965.
- [44] SCHMITT, B. - SCHÜSTER, R. - ORTHMANN, H.J.: Das mechanische Niveau thermoplastischer Formmassen. = "Kunststoffe", 54, 1964: 643-647.

- [45] SCHMITT, K.: Spritzgussherstellung grossflächiger Teile dargestellt an Beispielen von Transport und Flaschenkästen, referát na konferenci v Liberci, Červenec 1965.
- [46] SCHÖNBORN, H.H.: Die technik des Spritzgiessens und ihre Probleme, I. Teil. = "Plastverarbeiter", 10, 1959: 124-131.
- [47] SCHREIBER, B.: Výzkum metody kontroly jakosti textitových ložiskových pouzder, výzkumná zpráva 2-63-1231, SVUMT, Praha 1964.
- [48] SMĚLÝ, Z.: Způsoby přibližného výpočtu a praktické zjišťování minimální doby pro vyhřátí nebo ochlazení masivních výrobků z pryže, plastických hmot a jiných materiálů, zprávy VUGPT, 1965, č.1: 12-16.
- [49] STAUB, R.B.: An Analysis of Injection Mold Filling of Polyethylene. = "SPE Journal", 1960, č.4: 429-434.
- [50] STOCKMAIER, W.: Einfluss des Temperns auf Struktur und Dichte (Kristallinität) von gespritzten Polyäthylen-Stäben. = "Kunststoffe", 52, 1962: 522-531.
- [51] STOCKMAIER, W.: Einfluss des Temperns auf mechanische Eigenschaften von gespritzten Polyäthylen-Stäben. = "Kunststoffe", 52, 1962: 593-599.
- [52] "Alkathene", prospekt fy ICI, Anglie.
- [53] The Injection of Polythene, Information Service, ICI, Anglie.
- [54] ČSN 640001 a další.
- [55] DIN 53456 Härteprüfung durch Eindruckversuch, DBR, Januar 1963, 3 s.
- [56] VDE 0302/III. 43Leitsätze für mechanische und thermische Prüfungen fester Isolierstoffe, Berlin, 6 s.
- [57] ASTM D 732-46 Shear Strength of Plastics.
- [58] KOMÁRKOVÁ, O.: diplomová práce DP 252 VŠST Liberec, 1964.
- [59] PINKA, M.: diplomová práce DP 225 VŠST Liberec, 1966.
- [60] STRAKA, J.: diplomová práce DP 405 VŠST Liberec, 1965.
- [61] ŠÍDA, V.: diplomová práce DP 521 VŠST Liberec, 1966.
- [62] ODSTRČIL, B. - HORYNA, J.: Způsob zkoušení tvrdosti tuhých nekovových materiálů. = PV 6071-66

u 37 S