

Mechanické vlastnosti výrobků vstřikovaných z pryže

Bc. Jakub Huba

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Huba**

Osobní číslo: **T11160**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Mechanické vlastnosti výrobků vstříkovaných z pryže**

Zásady pro vypracování:

1. Provedte literární studii na dané téma.
2. Zjistěte závislost průřezu a délky tokového kanálu na koncové vlastnosti výrobku pomocí tokových analýz.
3. Na stroji REP V27/Y125 proveďte vstříknutí výrobku z elastomerní směsi.
4. Volbou vhodného dělicího zařízení připravte tělíska pro mechanické zkoušky.
5. Pomocí výsledků z mechanických zkoušek definujte vliv průřezu a délky tokového kanálu na vlastnosti výrobku.
6. Diskutujte a vyhodnoťte výsledky experimentu.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

SOMMER, John G. Engineered rubber products. Munich: Hanser, c2009, ix, 181 s. ISBN 978-1-56990-433-6.

JOHNSON, Peter S. Rubber processing: an introduction. Munich: Hanser, 2001, xiii, 145 s. ISBN 3446215786.

DUCHÁČEK, Vratislav. Přírodní a syntetické kaučuky, termoplastické elastomery. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín, 2006, 158 s. ISBN 80-02-01784-6.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Kamil Kyas

Ústav výrobního inženýrství


Datum zadání diplomové práce:

8. února 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

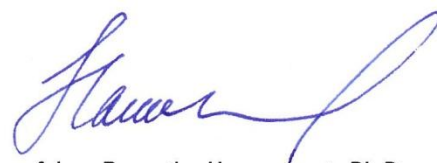
10. května 2013

Ve Zlíně dne 11. února 2013



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Huba Jakub

Obor: Konstrukce technologických zařízení

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 09. 05. 2013

.....
Jakub Huba

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práca pojednáva o využití kaučukovej zmesi ako materiálu na vstrekovanie.

Teoretická časť je zameraná na reologické vlastnosti zmesi, jej zloženie a prípravu. Rozoberá princíp spracovania kaučuku za pomoci technológie vstrekovania, uvádza základné materiálové skúšky zmesi a mechanické skúšky vulkanizátu.

Praktická časť hodnotí vplyv tokových kanálov a materiálových charakteristík na rýchlosť vulkanizácie a s tým spojený vývin teploty v rozvodnom systéme. Zaoberá sa meraním a vyhodnotením ako reologických, tak vulkanizačných vlastností zmesi pomocou prístroja RPA 2000. Mechanické skúšky majú za úlohu overiť predbežné predikcie simulácií a ukázať vplyv geometrie rozvodných kanálov na koncové, mechanické vlastnosti vulkanizátu.

Kľúčové slová: vstrekovanie kaučuku, RPA 2000, ťahová skúška, tvrdosť

ABSTRACT

Diploma thesis discusses a use of rubber as a material for injection molding.

Theoretical part is focused on rheological properties of rubber compound, its composition and mixing. This part deals with principles of processing by injection molding technology, shows a basic material tests of compound and mechanical tests of vulcanized rubber.

Practical part reviews an impact of runner system and material properties on cure rate and development of temperature field in runner system. It deals with measurement and evaluation of rheological and cure rate properties of compound by testing device RPA 2000. Primary purpose of mechanical tests has been validating preliminary prediction of simulations and shows an influence of runner system geometry on mechanical properties of cross-linked rubber.

Keywords: Injection molding of rubber, RPA 2000, tensile test, hardness test

Veľmi rád by som týmto chcel poďakovať svojmu vedúcemu diplomovej práce Ing. Kamilovi Kyasovi za venovaný čas, pripomienky, odborné informácie a vedenie.

Prehlasujem, že odovzdaná verzia diplomovej práce a verzia elektronická nahraná do IS/STAG sú totožné.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČASŤ	12
1 KAUČUK.....	13
1.1 ROZDELENIE KAUČUKOV	13
1.1.1 Prírodný kaučuk	14
1.1.2 Syntetický kaučuk	14
1.2 ZLOŽENIE KAUČUKOVÝCH ZMESÍ.....	15
1.2.1 Kaučuk	15
1.2.2 Plniva	16
1.2.3 Vulkanizačné činidla	16
1.2.4 Aktivátory a urýchlovače vulkanizácie.....	16
1.2.5 Zmäkčovadlá	17
2 REOLÓGIA KAUČUKOVÝCH ZMESÍ.....	18
2.1 ZÁKLADNÉ MATEMATICKÉ MODELY	18
2.1.1 Maxwellov model.....	18
2.1.2 Kelvinov model	19
2.1.3 Tuckettov model.....	19
2.2 TOKOVÁ KRIVKA.....	20
2.2.1 Relaxačný čas	21
2.2.2 Odklon od Newtonského chovania.....	21
3 TESTOVANIE VLASTNOSTÍ KAUČUKOVÝCH ZMESÍ.....	23
3.1 VSKOZITA MOONEY	23
3.1.1 Viskozimeter Mooney.....	24
3.2 VULKANIZÁCIA	24
3.2.1 Priebeh vulkanizácie	26
3.3 RUBBER PROCESS ANALYZER (RPA 2000).....	27
4 TVORBA A SPRACOVANIE KAUČUKOVÝCH ZMESÍ.....	29
4.1 MIEŠANIE.....	29
4.1.1 Distributívne miešanie	30
4.1.2 Disperzné miešanie.....	31
5 VSTREKOVANIE KAUČUKOVÝCH ZMESÍ.....	32
5.1 VSTREKOVACIA JEDNOTKA.....	32
5.2 UZATVÁRACIA JEDNOTKA.....	32
5.2.1 Hydraulické uzatváranie	33
5.2.2 Hydraulicko-mechanické uzatváranie	33
5.2.3 Elektro-mechanické uzatváranie	34
5.3 VSTREKOVACIA FORMA.....	34
5.3.1 Temperovanie formy	34
5.3.2 Vstrekovací cyklus	35
6 TESTOVANIE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PRYŽOVÝCH VÝROBKOV.....	36

6.1	JEDNOOSÍ ŤAH.....	36
6.1.1	Tvar skúšobných telies.....	37
6.1.2	Tvar čeľustí skúšobných strojov	38
6.2	TVRDOSŤ	39
6.2.1	Metóda Shore A.....	39
6.2.2	Príprava skúšobných vzorkov	40
6.2.3	Tvar a rozmery skúšobného vzorku.....	40
6.2.4	IRHD metóda	41
II	PRAKTICKÁ ČASŤ	43
7	CIELE DIPLOMovej PRÁCE	44
8	ZVOLENÉ METÓDY SPRACOVANIA	45
8.1	MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY	45
8.1.1	Spracovateľské vlastnosti.....	45
8.2	VSTREKOVACÍ STROJ A FORMA	46
8.3	ZADEFINOVANIE ANALÝZ	47
8.4	ZADEFINOVANIE PARAMETROV NA VSTREKOVACOM STROJI.....	49
8.5	MECHANICKÉ SKÚŠKY	50
8.5.1	Skúška tvrdosti	50
8.5.2	Ťahová skúška	52
9	MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY ZMESI	54
9.1	SIMFIT 5.0.....	54
10	ANALÝZA PROCESU VSTREKOVANIA.....	58
10.1	ÚLOHA Č. 1 – VPLYV INDEXU NENEWTONSKÉHO CHOVANIA	59
10.1.1	Rýchlosť piestu $v = 5$ mm/s	61
10.1.2	Rýchlosť piestu $v = 10$ mm/s	62
10.1.3	Rýchlosť piestu $v = 15$ mm/s	63
10.1.4	Rýchlosť piestu $v = 20$ mm/s	64
10.1.5	Rýchlosť piestu $v = 30$ mm/s	65
10.1.6	Diskusia výsledkov úlohy č. 1.....	66
10.2	ÚLOHA Č. 2 – VPLYV PRIEREZU TOKOVÉHO KANÁLU	67
10.2.1	Teplota 155 °C	69
10.2.2	Teplota 170 °C	71
10.2.3	Teplota 185 °C	73
10.2.4	Diskusia výsledkov úlohy č. 2.....	75
10.3	ÚLOHA Č. 3 – VPLYV DĹŽKY TOKOVÉHO KANÁLU	77
10.3.1	Teplota 155 °C	79
10.3.2	Teplota 170 °C	80
10.3.3	Teplota 185 °C	81
10.3.4	Diskusia výsledkov úlohy č. 3.....	82
11	VYHOTOVENIE SKÚŠOBNÝCH VZORIEK	84
11.1	PROCESNÉ PODMIENKY A GEOMETRIE ŠIROKÝCH ROZVODNÝCH KANÁLOV	85
11.2	PROCESNÉ PODMIENKY A GEOMETRIE ÚZKYCH ROZVODNÝCH KANÁLOV	86
12	DELIACE ZARIADENIE.....	88
13	SKÚŠKA TVRDOSTI.....	90

13.1	POROVNANIE ŠIROKEJ GEOMETRIE A A B PRI PROCESNÝCH PODMIENKACH 1.....	91
13.2	POROVNANIE ŠIROKEJ GEOMETRIE A A B PRI PROCESNÝCH PODMIENKACH 2.....	92
13.3	POROVNANIE ŠIROKEJ GEOMETRIE A A B PRI PROCESNÝCH PODMIENKACH 3.....	93
13.4	POROVNANIE ÚZKEJ GEOMETRIE A A B PRI PROCESNÝCH PODMIENKACH 4.....	94
13.5	POROVNANIE ÚZKEJ GEOMETRIE A A B PRI PROCESNÝCH PODMIENKACH 5.....	95
13.6	POROVNANIE ÚZKEJ GEOMETRIE A A B PRI PROCESNÝCH PODMIENKACH 6.....	96
13.7	DISKUSIA VÝSLEDKOV SKÚŠKY TVRDOSTI.....	97
14	ŤAHOVÁ SKÚŠKA.....	100
14.1	KRÁTKY KANÁL - ÚZKY PRIEREZ (PRÍLOHA PI).....	102
14.2	KRÁTKY KANÁL – ŠIROKÝ PRIEREZ (PRÍLOHA PII).....	102
14.3	DLHÝ KANÁL – ÚZKY PRIEREZ (PRÍLOHA PIII).....	103
14.4	DLHÝ KANÁL – ŠIROKÝ PRIEREZ (PRÍLOHA PIV).....	103
	DISKUSIA VÝSLEDKOV.....	104
	MOŽNOSTI ĎALŠIEHO VÝSKUMU.....	106
	ZÁVER.....	107
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY.....	108
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	111
	ZOZNAM OBRÁZKOV.....	113
	ZOZNAM TABULIEK.....	116
	ZOZNAM PRÍLOH.....	119

ÚVOD

Technológia vstrekovania patrí medzi najrozšírenejšie spôsoby spracovania termoplastov a reaktoplastov. Pri elastomérnych materiáloch si taktiež našla svoje uplatnenie, no keďže najväčším konzumentom kaučuku je automobilový priemysel, konkrétne plášte pneumatík, ktoré sú vyrábané konfekcionovaním a následným vulkanizovaním v lise, uplatnenie vstrekovania nie je až tak enormné ako v prípade termoplastov.

Snahou každej firmy je vykazovať zisk, preto financie stoja až na prvom mieste. Aby podnik vyrábal výrobky predpísanej kvality za nižšiu cenu, musí siahnuť po novších technológiách, skrátiť strojné časy, prípadne použiť iné, spravidla lacnejšie materiály pri zachovaní podobných, koncových vlastností.

Keďže polymérne materiály, vrátane kaučukových zmesí, sú radené do skupiny pseudo-plastických látok, ich tokové vlastnosti sú úzko zviazané s receptúrou a množstvom jednotlivých prísad. Reologické vlastnosti materiálu predpovedajú, ich zložitosť spracovania. Čím kladie materiál väčší odpor pri toku, tým je spracovanie zložitejšie, je potrebný väčší vstrekovací tlak, no tým taktiež podstupuje väčšie šmykové namáhanie, ktoré je pretransformované do tepelnej energie, do ohrevu zmesi.

Druhým zdrojom tepla pri vstrekovaní materiálov je získavanie tepla prestupom od steny formy. V tomto prípade je rozhodujúca rýchlosť vstrekovania, ktorá ovplyvňuje mieru zotrvania materiálu vo vtokovom systéme.

Keďže z celého výrobného cyklu je vulkanizácia najdlhšia, jej skrátenie sa najviac prejaví na úspore času a tým pádom aj na finančnej úspore. Na prebehnutie vulkanizácie je potrebný čas, teplota a tlak. Stagnáciou jedného parametra (napríklad tlaku) a zvýšením druhého (teploty), musí dôjsť k zníženiu tretej veličiny (času). Z tohto dôvodu je miera ohrevu materiálu už v vtokovom ústí, či už formou disipácie alebo prestupom tepla, rozhodujúca na vulkanizačný čas a tým pádom aj na samotnú cenu výrobku.

I. TEORETICKÁ ČASŤ

1 KAUČUK

Prvú zmienku o kaučuku je možné dohľadať v diele „Všeobecná história nesmierného kontinentu a ostrovom Ameriky“ španielskeho historika Herrera-Tordesillase. Opisuje v ňom amerických domorodcov, ktorí sa hrajú s pružnou guľou, plnou loptou. Tieto lopty si domorodci vyrábali z vyschnutej tekutiny, vytekajúcej z poranených stromov, voľne rastúcich stromov v subtropickom pásme Amerických ostrovov. Nazývali ich „Hheve“, čo v preklade znamená „Plačúci strom“. Do Európy sa kaučuk dostal už v roku 1736 a bol použitý k výrobe nepremokavých plachiet a vriec na prepravu pošty. Skutočný základ gumárskeho priemyslu položil v roku 1839 Charles Goodyear, ktorý spolu s Nathanielom Haywardom vypracovali postup modifikácie kaučuku založenej na solarizačnom ohreve. Goodyear zistil, že síra chemicky reaguje s kaučukom a neskôr experimentálne dokázal, že zmes kaučuku a síry poskytuje zahrievaním produkt nových vlastností, čím došlo k vulkanizácii, za ktorú mu bol v roku 1844 udelený patent. [1]

1.1 Rozdelenie kaučukov

Kaučuk je základnou zložkou, ktorý dáva zmesi aj z vulkanizovanej gume základné charakteristické vlastnosti. Existuje široká škála kaučukov s typickými vlastnosťami, podľa ktorých volíme vhodný kaučuk pre danú aplikáciu. [2]

Tab. 1 – Skratky a relatívna spotreba najbežnejšie používaných kaučukov [4]

Skratka	Názov	Spotreba [%]	Použitie
NR	prírodný kaučuk	32	pre všeobecné použitie
IR	izoprénový kaučuk	3	
SBR	butadienstyrenový kaučuk	37	
BR	butadienový kaučuk	10	
EPD EPDM	ethylénpropylénový kaučuk	7	
IIR	butylkaučuk	3	olejovzdorné
CR	chloroprénový kaučuk	3	
NBR	butadienakrylonitrilový kaučuk	3	
ACM	akrylátový kaučuk	0,5	
OT	polysulfidový kaučuk	0,1	teplovzdorné
MQ	silikónový kaučuk	0,1	
FPM	fluorouhlíkový kaučuk	0,1	

1.1.1 Přírodní kaučuk

Přírodní kaučuk je získavaný zo stromu *Havea brasiliensis*, ktorý sa vyskytuje v subtropickom až tropickom podnebnom pásme. S umelým pestovaním tohto stromu sa začalo po roku 1900 v Južnej Amerike, juhovýchodnej Ázii a Afrike. Po narezaní stromovej kôry začne vytekať biela kvapalina, nazývaná latex, ktorá obsahuje (30-40) % koloidných častíc kaučuku. Z jedného stromu je možné získať (5-25) kg kaučuku. Kaučuk sa vyzráža napríklad za pomoci kyseliny mravčej, vyperie vodou a vysuší. V závislosti od sušiacoho média vznikne biela krepa (teplý vzduch) alebo hnedá krepa (dym). [2]



Obr. 1 – Získavanie prírodného latexu

Väčšina dodávaných typov prírodného kaučuku má vzhľadom k vysokej molekulovej hmotnosti vysokú viskozitu. To znamená, že kaučuk musí byť pred procesom spracovania plastikovaný (lámanie, štiepenie dlhých reťazcov účinkom vzdušného kyslíku v miestach dvojných väzieb). Po plastikácii majú zmesi obvykle dobré spracovateľské vlastnosti, dobrú pevnosť pred vulkanizáciou, vysokú konfekčnú lepivosť a rýchlosť vulkanizácie. [2, 3]

1.1.2 Syntetický kaučuk

Hlavnými predstaviteľmi syntetických kaučukov pre bežne použitie sú homopolyméry a kopolyméry izoprénu a butadienu. Obsahujú v hlavných reťazcoch svojich makromolekúl dvojnú väzbu, sú teda nenasýtené. Preto k ich vulkanizácii je najčastejšie využívaná elementárna síra. Najbežnejším plnivom pre ne sú sadze. [1]

Veľký počet rôznych druhov priemyselne vyrábaných kaučukov si vyžiadala ich klasifikáciu a ich pomerne dlhé názvy často viedli k používaniu skratiek. Zaužívané medzinárodné skratky vychádzajú z triedenia kaučukov do ôsmich základných skupín podľa chemickej štruktúry. [4]

Tab. 2 – Medzinárodná klasifikácia kaučukov do základných skupín

Označenie skupiny	Chemická štruktúra makromolekulárneho reťazca
M	nasýtený uhľovodíkový reťazec
R	nenasýtený uhľovodíkový reťazec
N	reťazec obsahujúci atómy dusíku
O	reťazec obsahujúci atómy kyslíku
Q	reťazec obsahujúci siloxanové väzby (-Si-O-)
T	reťazec obsahujúci atómy síry
U	reťazec obsahujúci súčasne atómy dusíku a kyslíku
Z	reťazec obsahujúci súčasne atómy fosfóru a dusíku

1.2 Zloženie kaučukových zmesí

Pri vývoji receptúry je nutné podľa požiadaviek uvažovanej aplikácie najskôr vybrať vhodný kaučuk. Vlastnosti vybraného kaučuku je potom potrebné modifikovať pomocou prísad a chemikálií tak, aby výsledný produkt čo najviac vyhovoval zvoleným podmienkam, ktorým bude budúci výrobok vystavený. Radou pomocných látok je možné uľahčiť spracovateľnosť kaučukovej zmesi a inými prísadami redukovať cenu výslednej zmesi. [3]

Jednotlivé vlastnosti kaučukovej zmesi nie je možné hodnotiť izolovane, je nutné ich uvažovať vo vzťahu k podmienkam budúcej aplikácie, kde sa môžu rôzne vplyvy navzájom kombinovať (teplota, doba expozície, mechanické napätie, prítomnosť chemikálií a ich koncentrácia atď.). [3]

1.2.1 Kaučuk

Ich obsah môže byť (5-95) %. Druh kaučuku v kaučukovej zmesi môže byť jeden (napr. prírodný kaučuk), ktorý môže obsahovať jeden alebo viac druhov (podľa čistoty, kvality, dostupnosti atď.). Niektoré kaučukové zmesi sú zložené z prírodných aj syntetických kaučukov. Prírodný kaučuk má význačnú lepivosť a preto je najväčšia časť výrobkov z technickej gummy vyrobená zo zmesi prírodného a rôznych druhov syntetických kaučuku, ktoré majú síce výrazne horšiu lepivosť, ale celú radu lepších vlastností. Miešanie oboch druhov kaučukov sa nerealizuje teda iba z ekonomických dôvodov, ale aj z technických. [2, 5]

1.2.2 Plniva

Ich obsah môže byť až 80 %. Ovplyvňujú vlastnosti vulkanizátu, ale taktiež spracovateľnosť kaučukovej zmesi a ich cenu. Tzv. aktívne plniva veľmi významne zväčšujú odolnosť vulkanizátu voči oderu. Jednotlivé charakteristiky gumárenských plnív, vlastností kaučukových zmesí a vulkanizátu spolu navzájom súvisia. Obecne je možné usúdiť, že [2, 3, 4]:

- zmenšením veľkosti častíc plniva dôjde k zvýšeniu viskozity Mooney, pevnosti, odolnosti voči oderu, zníženiu odrazovej pružnosti;
- zvýšením aktivity povrchu plniva sa zvýši odolnosti voči oderu a modul pri deformácii > 300 %;
- zvýšením tvarového faktoru plniva sa docieli zvýšenie viskozity Mooney, modulu pri deformácii > 300 %, zníži sa odrazová pružnosť a zlepši sa rozmerová stálosť po vytlačovaní.

1.2.3 Vulkanizačné činidla

Sú to chemické látky alebo prírodniny, ktoré majú schopnosť chemickými väzbami spojiť jednotlivé kaučukové makromolekuly v relatívne krátkej dobe. Tým sa kaučuk mení na technicky použiteľný materiál. Pokiaľ sa pridá urýchľovač alebo zmes urýchľovačov, ktoré upravujú priebeh a stupeň vulkanizácie, aktivátory, zvýšená teplota, tlak v hmote a dostatok čas, je zmes schopná vulkanizácie. Obecne platí, že so vzrastajúcim množstvom síry narastá tvrdosť a klesá ťažnosť. Podľa množstva viazanej síry rozdeľujeme vulkanizáty na gumu [2, 5]:

- mäkkú: do 4 dsk síry, vyznačuje sa výraznou schopnosťou vratných deformácií;
- polotvrdú: (12-25) dsk, má zlé mechanické vlastnosti a obmedzené použitie;
- tvrdú: nad 25 dsk, má výraznú tvrdosť, nepatrnú ťažnosť a zlé ohybové vlastnosti.

1.2.4 Aktivátory a urýchlovače vulkanizácie

Sú látky, ktoré skracujú dobu vulkanizácie, znižujú vulkanizačnú teplotu a spomaľujú starnutie. Bez prídavku aktivátoru by bola síra veľmi málo účinným vulkanizačným činidlom. K dosiahnutiu potrebnej koncentrácie priečných väzieb by bolo treba v zmesi bez aktivátoru dávkovať podstatne viac síry, preto podstata aktivátoru pri vulkanizácii sírou spočíva v zvýšení sieťovacej účinnosti vulkanizačného systému. Ako aktivátory sa používajú rôzne oxidy kovov: ZnO, MgO, PbO a iné. Význam urýchlovačov vulkanizácie spočíva nie len v zrýchlení procesu, ale aj v zvýšení efektívnosti viazania síry a tým aj v zlepšení výsled-

ných vlastností vulkanizátu (teplovzdornost', odolnosť voči starnutiu). Všeobecne platí, že čím je urýchlovač vulkanizácie aktívnejší, tým menšie množstvo sa ho pridáva do zmesi, tým menšie množstvo síry zmes vyžaduje a tým je potrebná nižšia vulkanizačná teplota. Vyrábané urýchlovače je možné rozdeliť podľa rýchlosti vulkanizácie na [2]:

- pomalé (aminy, guanidiny);
- rýchle (tiazoly, sulfonamidy);
- veľmi rýchle (tiuramy)
- ultraurýchlovače (ditiokarbamáty, xantogenáty)

1.2.5 Zmäkčovadlá

Zmäkčovadlá zvyšujú plasticitu a uľahčujú mechanické spracovanie zmesi. Prenikajú medzi makromolekulárne látky, čím dochádza k zväčšeniu ich medziatómovej vzdialenosti, znižujú prepletenie, obmedzujú vnútorné trenie medzi molekulami a uľahčujú tak preskupovanie hmoty. Nevýhodou je, že prítomnosť zmäkčovadla znižuje mechanické vlastnosti vulkanizátu. Ďalšie dôvody použitia zmäkčovadiel sú [2]:

- zlepšenie disperzie plní a prísad;
- zníženie teploty a spotreby energie pri miešaní;
- úprava fyzikálnych a mechanických vlastností pryže.

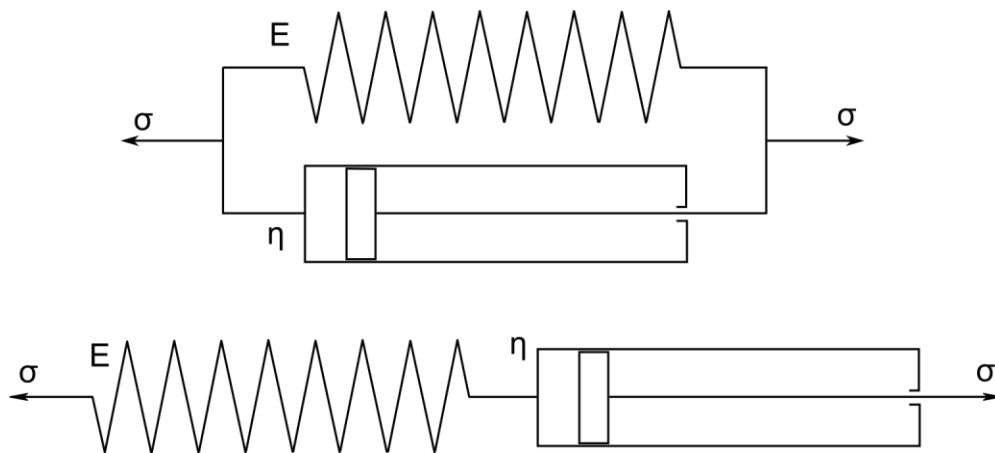
2 REOLÓGIA KAUČUKOVÝCH ZMESÍ

Materiály, ktoré sa za určitých okolností správajú ako kvapaliny a za iných ako pevné látky, sa nazývajú viskoelastické. Okolnosti, ktoré rozhodujú o ich poňatí sú predovšetkým dĺžka pozorovania materiálu Δt [s] a relaxačný čas materiálu λ [s], ktorý charakterizuje pamäť materiálu na jeho predchádzajúci stav. Obecne je možné tieto okolnosti charakterizovať tzv. Deboriným číslom [18]:

$$De = \frac{\lambda}{\Delta t} \quad (1.1)$$

2.1 Základné matematické modely

Pre popis viskoelastického chovania boli vypracované matematické modely, ktoré ho popisujú. Najjednoduchší viskózný model kvapaliny je Newtonský, ktorého mechanickým ekvivalentom je piest. Elastický model tuhej látky je Hookovský a jeho mechanický ekvivalent je pružina. [19]



Obr. 2 – Kelvinov (hore) a Maxwellov (dole) matematický model

2.1.1 Maxwellov model

Maxwellov model popisuje tok, ktorý je komplikovaný elasticitou materiálu alebo naopak, elasticitu, ktorá odznieva s tokom. Keďže sa jedná o sériové zapojenie, napätie je v oboch prvkoch rovnaké a celková deformácia sa rovná súčtu deformácií prvkov. [20]

$$\sigma_{pruž.} = \sigma_{piest} = \sigma \quad (2.1)$$

$$\gamma_{pruž.} + \gamma_{piest} = \gamma \quad (2.2)$$

2.1.2 Kelvinov model

Pri paralelnom zapojení pružiny s piestom, je prechod pružiny z jedného deformačného stavu do druhého brzdený prítomnosťou viskózneho prvku. Kelvinom model sa teda deformuje vratne, ale jeho elasticita je závislá na čase. Pri Kelvinovom modeli je deformácia oboch prvkov rovnaká a napätia prispievajú aditívne k celkovému napätiu. [20]

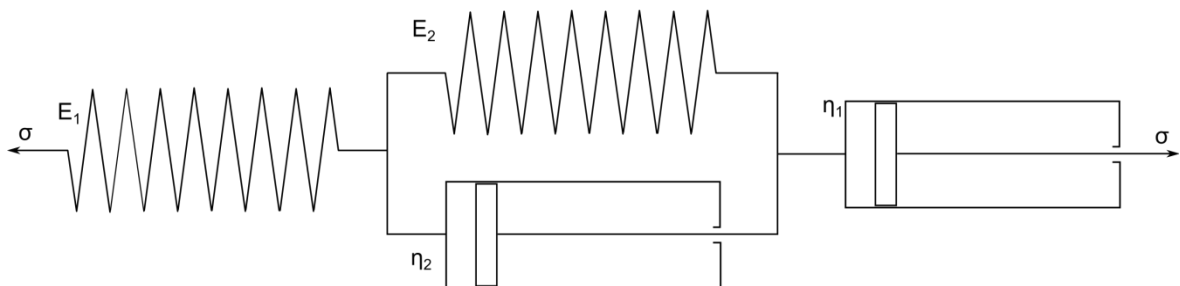
$$\sigma_{pruž.} + \sigma_{piest} = \sigma \quad (2.1)$$

$$\gamma_{pruž} = \gamma_{piest} = \gamma \quad (2.2)$$

2.1.3 Tuckettov model

Aby sa mechanický model čo najpresnejšie priblížil chovaniu elastoméru v silovom poli, je potrebné oba modely kombinovať. Medzi členy zapojené v sérii (Maxwellov model) sú zaradené nové dva prvky zapojené paralelne (Kelvinov model). Deformácia je určovaná tromi základnými molekulárnymi mechanizmami [20, 21]:

- ideálne elasticitou okamžitou deformáciou valenčných uhlov, väzieb a medzimolekulárnymi vzdialenosťami;
- oneskoreným elastickým posuvom polymérnych kĺbek;
- nevratným presunom kĺbek – tokom.

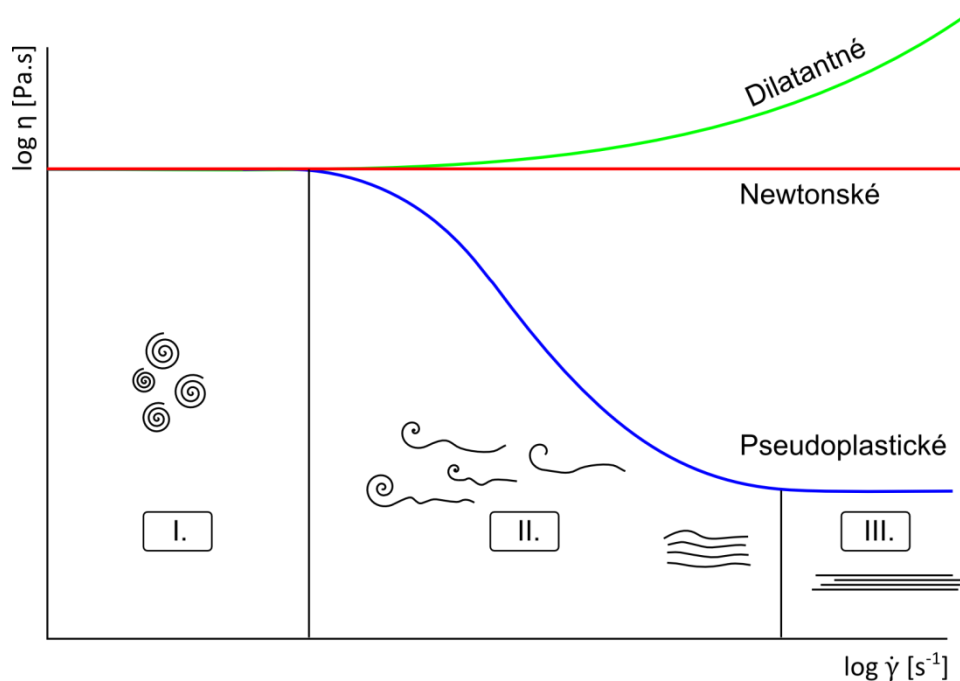


Obr. 3 – Tuckettov matematický model

2.2 Toková krivka

Toková krivka udáva závislosť viskozity na rýchlosti šmykovej deformácie. Tokovú krivku je možné pomocou zmeny viskozity na rýchlosti šmykovej deformácie rozdeliť na tri typy látok a to na [30]:

- Newtonské, ktorých viskozita je bez ohľadu na rýchlosť šmykovej deformácie v celom rozsahu konštantná;
- dilatantné, ktorých viskozita s intenzitou šmykového namáhania rastie (príkladom je zmes škrobu s vodou v pomere 3:2);
- pseudoplastické, ktorých viskozita klesá s rastúcou rýchlosťou šmykovej deformácie (polymérne taveniny).



Obr. 4 – Tokové krivky

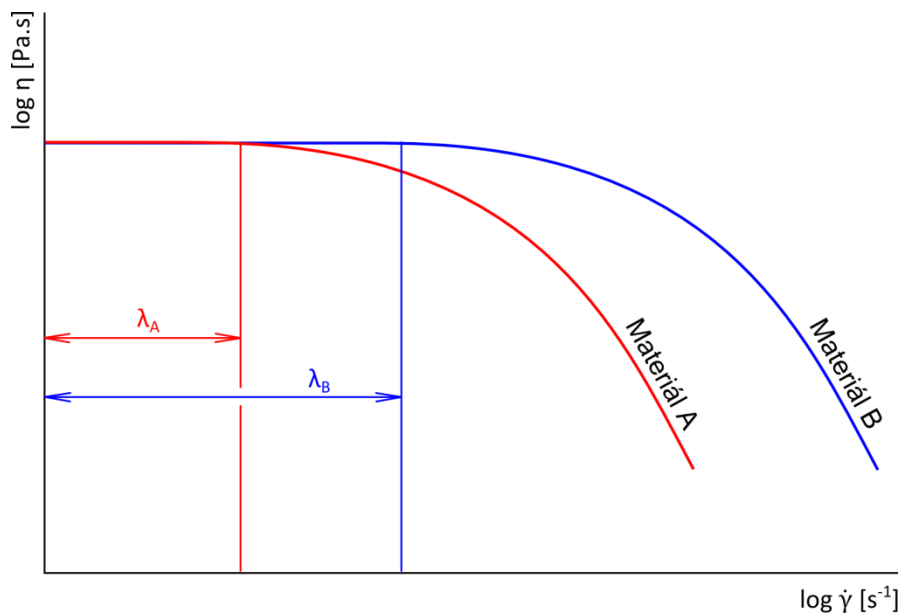
Pseudoplastickú oblasť je možné rozdeliť na tri zóny [31]:

- I. oblasť maximálnej Newtonskej viskozity, kde je viskozita konštantná, rovná Newtonskej viskozite. Makromolekuly zaujímajú tvar, ktorý odpovedá maximálnej entropii systému a pri toku sa premiestňujú ako celok.
- II. oblasť štruktúrnej viskozity, kde viskozita s rastúcou intenzitou šmykového toku klesá. Pokles viskozity je reakciou na rozbaľovanie sa makromolekulových klbkov v smere toku, čím je ich pohyb uľahčený.

- III. oblasť nekonečného šmyku, kedy pri extrémne vysokých rýchlostiach šmykovej deformácie sa viskozita stáva nezávislou na intenzite toku. Je to z dôvodu dokonalého rozbalenia makromolekulových klobiek.

2.2.1 Relaxačný čas

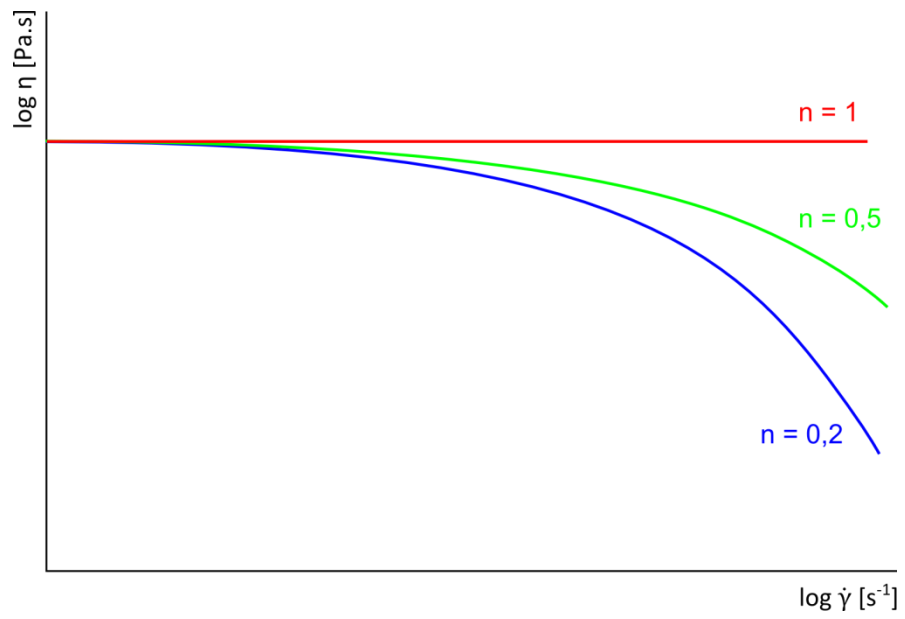
Relaxačný čas predstavuje čas potrebný na vykonanie na prechod systému z daného stavu do rovnovážneho, ustáleného stavu, za podmienky, že prejde sa uskutoční v materiáli 63 % všetkých napäťových zmien. Na tokovej krivke je relaxačný čas reprezentovaný dĺžkom Newtonského platá. Na *Obr. 5* je znázornená zmena tokovej krivky pri zmene parametru λ , relaxačného času materiálu.



Obr. 5 – Znázornenie vplyvu relaxačného času

2.2.2 Odklon od Newtonského chovania

Polymérna tavenina sa radí, medzi látky pseudoplastické tzn. klesajúcu hodnotu viskozitou s narastaním rýchlosti šmykovej deformácie. Index nenenewtonského chovania charakterizuje mieru odklonu od látky Newtonskej, ktorej je priradený index $n = 1$. S klesajúcim indexom nenenewtonského chovania klesá tlak a napätie pri toku. *Obr. 6* znázorňuje, že čím je odklon on newtonského chovania väčší, tým je odpor taveniny proti tečeniu pri vyšších rýchlostiach menší.



Obr. 6 – Znážornenie vplyvu indexu neneutonského chovania

3 TESTOVANIE VLASTNOSTÍ KAUČUKOVÝCH ZMESÍ

Z hľadiska poznania chovania kaučukovej zmesi pri spracovaní je potrebné poznať celú radu jej vlastností. Medzi najčastejšie hodnotené veličiny patrí viskozita Mooney a hodnoty vulkanizačných charakteristík.

3.1 Viskozita Mooney

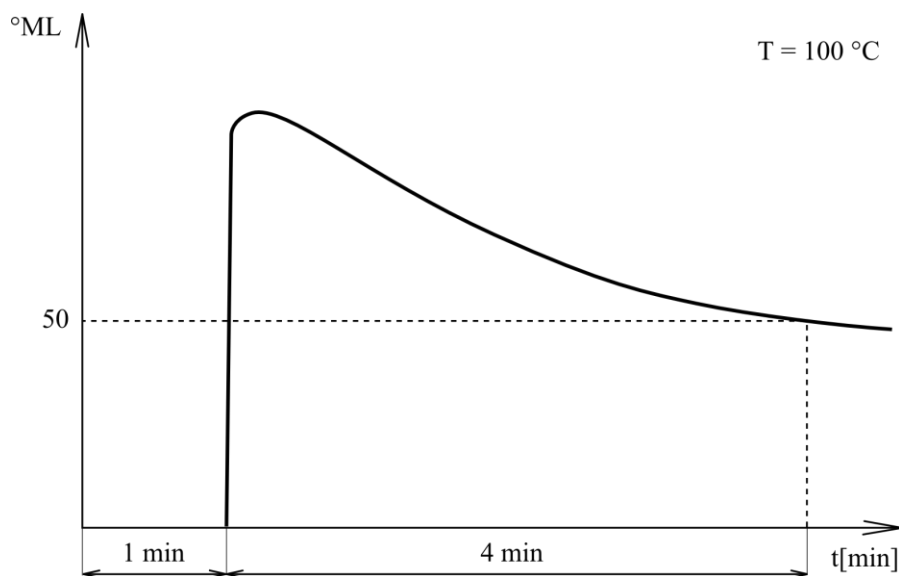
Podstatou skúšky viskozity Mooney je stanovenie krútiaceho momentu, v jednotkách Mooney pri otáčaní rotoru v komore naplnenej skúšobným materiálom. [2]

Skúšobná vzorka je tvorená z dvoch kaučukových diskov o priemere 50 mm a hrúbke 6 mm, čo dostatočne k tomu, aby bola dutina viskozimetru vyplnená. Jeden kaučukový disk má v strede vyseknutý kruhový otvor, ktorý umožňuje vloženie hriadeľa rotoru. [6]

Viskozita Mooney je hodnota na krivke pri 100°C odčítaná po 4 minútach od spustenia rotácie rotoru. Celá skúška trvá zvyčajne 5 minút, pred spustením rotoru je kaučukovej zmesi poskytnutá 1 minúta, čím sa skúšobná vzorka prehreje, vyrovná sa teplotné pole, po čom je možné porovnávať viskozity Mooney z viskozimetrov rôznych konštrukcií. Typická viskozita Mooney môže byť vyjadrená vzťahom [6]:

$$50 \text{ ML } (1 + 4) \text{ } 100^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

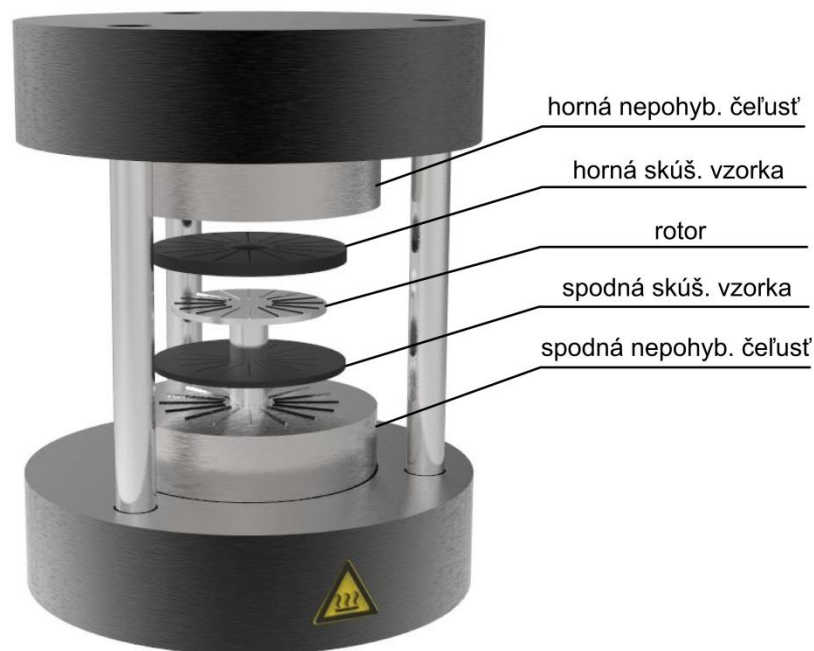
Kde 50 M reprezentuje viskozitu Mooney, L značí typ použitého rotoru (L = large = štandardný), 1 je doba predhrevu, 4 doba činnosti rotoru a 100°C je teplota pri testovaní. [6]



Obr. 7 – Meranie viskozity Mooney

3.1.1 Viskozimeter Mooney

Rozmery viskozimetru Mooney sú štandarizované pomocou normy ISO 289-1. Rotor aj dutina formy je presne definovaná, rovnako aj drážky na ich povrchu, ktorých úlohou je zamedziť sklzu na stene. Otáčky rotoru sú normou dané na $2 \pm 0,02 \text{ ot. min}^{-1}$. Vyhrievacie zariadenie musí udržať teplotu v rozmedzí $\pm 0,5^\circ\text{C}$ a uzatváracie zariadenie vyvinúť počas testu uzatváraciu silu danú normou na $11,5 \pm 0,5 \text{ kN}$. [6]



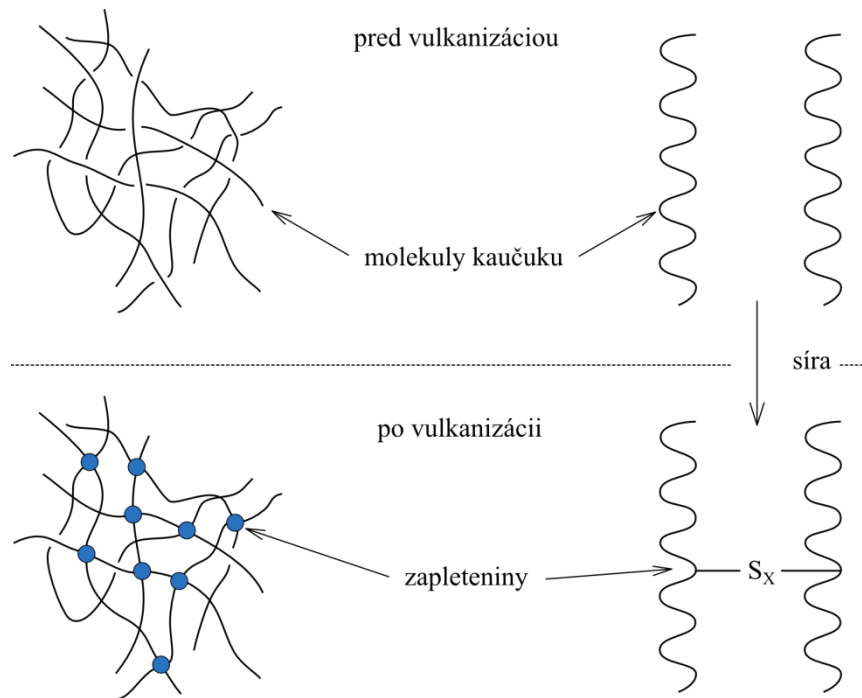
Obr. 8 – Viskozimeter Mooney

3.2 Vulkanizácia

Proces premeny lineárnych makromolekúl kaučuku na priestorovo zosieťované makromolekuly sa nazýva vulkanizácia. Väčšina komerčne využívaných gumených výrobkov podstúpila proces vulkanizácie, ktorá značne zlepšuje výsledné vlastnosti produktu, či už sú to mechanické vlastnosti ako zvýšenie tuhosti, zníženie trvalej deformácie, tak aj chemické vlastnosti, ako napríklad redukcia citlivosti na bobtnanie v rozpúšťadlách. [8]

Vulkanizácia je posledný technologický postup výroby gumeného produktu. Zaisťuje tvar a kvalitu výrobku, ktorá je v rôznej miere ovplyvňovaná predchádzajúcou technológiou a zložením zmesi. Optimálna hustota vytvorenej priestorovej siete je zaisťovaná dvomi na sebe závislými parametrami – teplotou a časom. Vyjadruje sa tzv. teplotným koeficientom vulkanizácie, ktorý udáva vzrast rýchlosti vulkanizácie pri zvýšení teploty o 10°C . Hodno-

ty koeficientu sa pohybujú v rozmedzí 1,8 – 2,5 a ovplyvňuje ho druh použitého kaučuku a zloženie zmesi. [2]



Obr. 9 – Princíp vytvorenia priečnej siete [11]

Teplotná stálosť väzby je daná väzbovou energiou. Najslabšie spojenie siete tvorí polysulfidická väzba (zlá tepelná odolnosť), no dosahujú najvyššiu pevnosť. Príčinou je jednak ich rôznorodá dĺžka a schopnosť tzv. kĺzania (rekombinácia rozštiepených väzieb) [10].

Tab. 3 – Väzbová energia chemických väzieb [10]

Typ chemickej väzby		Väzbová energia kJ.mol ⁻¹
polysulfidické	-C-S-...-S-C-	< 262
disulfidické	-C-S-S-C-	262
monosulfidické	-C-S-C-	280
uhlík - uhlík	-C-C-	344
kremík - kyslík	-Si-C-	373

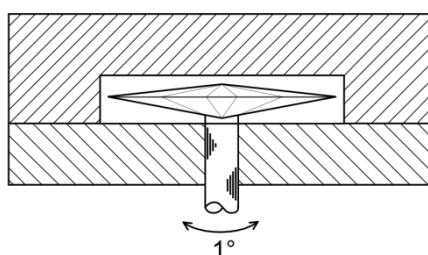
Laboratórne meranie vulkanizačných charakteristík kaučukovej zmesi bolo podporené zavedením vulkametrov, tzv. „curemeters“, v polovici 20. storočia. Tieto prístroje sa rýchlo stali obľúbenými pre svoju jednoduchosť až tak, že používanie prístrojov Mooney bolo postupne zmenšené. [6]

Vulkametre zaznamenávajú dynamický šmykový modul (odpor krútiaceho momentu v závislosti od času) cyklicky namáhaného skúšobného telesa počas vulkanizácie. Dokážu

zaznačiť celý priebeh vulkanizácie a využívajú sa pri vývoji nových zmesí alebo priamo vo výrobe na hodnotenie spracovateľských vlastností. [9]

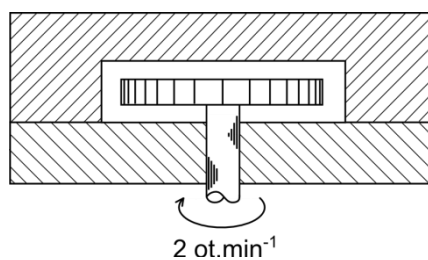
Po značnú dobu boli bežne používané tieto typy vulkametrov [2, 6]:

- Wallace-Shawbury;
- Monsanto (*Obr. 10*); pri ktorom disk osciluje konštantným uhlom pootočenia a vyvolaný krútiaci moment vplyvom zmeny šmykového modulu je zaznamenaný do grafu. Oscilačný pohyb rotoru vykonáva excenter usadený na hriadeli a osciluje s frekvenciou 1,67 Hz (100 oscilácií/min.)



Obr. 10 – Vulkanometer Monsanto

- Mooney (*Obr. 11*); podmienky sú totožné ako pri meraní viskozity Mooney, jediný zmenený parameter je teplota formy. Jej zvýšením začne materiál v dutine formy vulkanizovať. Rýchlosť vulkanizácie je daná ako podiel 30 jednotiek Mooney a rozdielu času potrebného k zvýšeniu krútiaceho momentu z 5 °ML na 35 °ML.



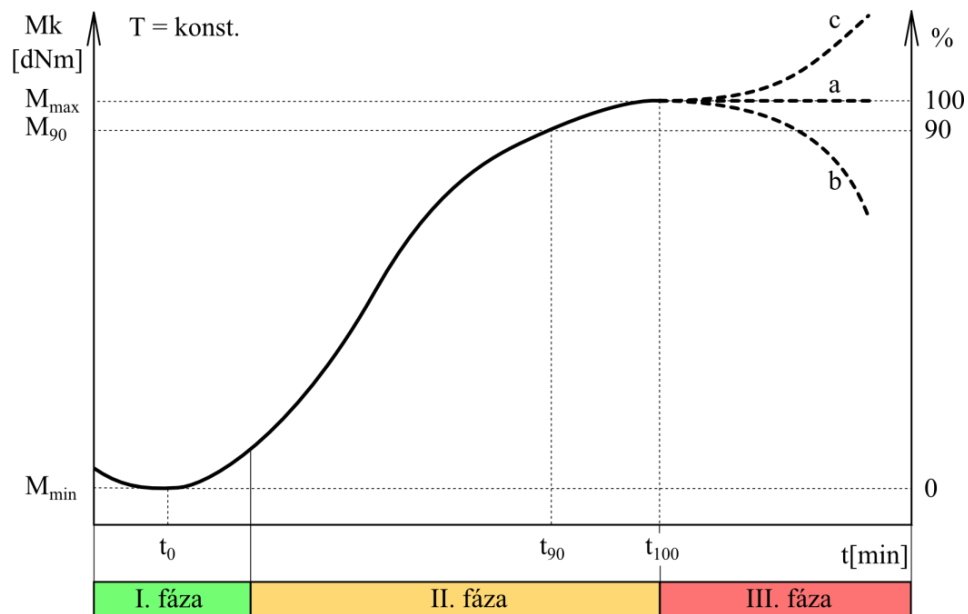
Obr. 11 – Vulkanometer Mooney

3.2.1 Priebeh vulkanizácie

Vulkanizačnú krivku je možné rozdeliť na tri časti (*Obr. 12*) [9]:

- **I. indukčnú periodu**; prebieha akcia vulkanizačných činidiel s kaučukom. Dĺžka tejto akcie závisí od podmienok reakcie a výberu vulkanizačného systému.
- **II. vlastnú sieťovacia reakciu**; určuje dobu sieťovania polyméru a súčasne zmenu fyzikálnomechanických hodnôt, vlastnosti zmesi. Počas vlastnej sieťovacej reakcie dochádza k úbytku vulkanizačného činidla a nastáva pokles rýchlosti reakcie.

- **III. zmenu v štruktúre vzniknutej siete;** kedy môžu nastať tri situácie. Ak si vulkanizát pri vulkanizácii zachová rovnakú hodnotu krútiaceho momentu, vzniká vulkanizačné plató (a); v prípade klesania krútiaceho momentu po dosiahnutí maxima vzniká reverzia – rozpad sírnych väzieb (b); ak krútiaci moment neustále rastie, vulkanizačná krivka disponuje kráčajúcim modulom (c).



Obr. 12 – Priebeh vulkanizácie

Z priebehu vulkanizačnej krivky sa stanoví maximálny krútiaci moment zmesi M_{max} [dNm] a minimálny krútiaci moment M_{min} [dNm]. Optimálny čas vulkanizácie sa stanoví ako čas potrebný na vytvorenie 90 % priečných väzieb, čomu odpovedá určitý krútiaci moment podľa vzorca [2, 9]:

$$M_{90} = M_{min} + 0,9 (M_{max} - M_{min}) \quad (2)$$

Hodnota M_{90} je dosiahnutá v čase t_{90} , v čase dosiahnutia 90 % zosieťovania výrobku. Dokončenie procesu vulkanizácie väčšinou prebieha mimo formu za pomoci akumulovaného tepla vo výrobku [2, 9].

3.3 Rubber Process Analyzer (RPA 2000)

Vulkameter využívajúci oscilujúci disk bol predstavený priemyslu v roku 1960. Keďže vulkameter využívajúci rotor popísaný v norme ASTM D 2084 disponoval mnohými problémami, ako napríklad [16]:

- prítomnosťou nevyhriateho kovového rotoru nebolo prostredie izotermálne. Niekedy k vyrovnaniu teplotného pola je potrebných 4 – 5 minút;

- signál vyvolaný krútiacim momentom musí byť meraný cez hriadeľ vulkametra. Vplyvom prirodzeného trenia spojeného s pohybom rotoru, vzniká v signáli šum, čo má za následok zníženie citlivosti testu;
- vzhľadom k vzniknutému treniu je veľmi o zložité merať skutočné dynamické vlastnosti.

Prístroj RPA patrí do skupiny bezrotorových reometrov, no čo ho robí odlišným od bežných reometrov je využívanie špeciálneho motoru s priamym pohonom, ktoré môžu byť naprogramované tak, aby došlo k zmene frekvencie alebo napätia sínusovej oscilácie spodnej základne, hlavy. Zariadenie bolo vyvinuté za účelom testovania celej rady materiálov. Je možné na ňom testovať surové polyméry prichádzajúce do výrobného reťazca, pripravené zmesi, ale taktiež výsledné vulkanizáty. [16, 17]

Pripravená vzorka elastoméru, prípadne zmesi, o hmotnosti okolo 5 g je umiestnená do meracieho zariadenia, ktoré je uzatvorené silou 15 kN. Teplota oboch častí formy prebieha s presnosťou $\pm 0,3$ °C. V prípade nutnosti formu chladiť je možné tak urobiť pomocou prúdiaceho vzduchu, kedy je teplotný spád približne 30 °C/min. Krútiaci moment je prenášaný cez vzorku zo spodnej oscilujúcej časti do hornej, v ktorej je umiestnený senzor. Zmena krútiaceho momentu je zaznamenávaná a pomocou softwaru sú vyhodnocované merané veličiny. Konštrukcia typu kužel – kužel je zvolená z dôvodu dodržania konštantného šmykového namáhania vzorku. [17]

Na základe možnosti meniť celú radu parametrov je možné merať rôzne vlastnosti. Všetky veličiny je možné medzi sebou kombinovať a získať tým unikátne výsledky, na základe ktorých je možné odhaliť príčiny vzniku problémov v procese výroby. Medzi parametre, ktoré je možné meniť patrí [17]:

- teplota (30 – 230) °C;
- frekvencia oscilácie (0,03 – 33) Hz;
- uhol oscilácie (0,05 – 90) °;
- čas (0 – 9 999) min.

4 TVORBA A SPRACOVANIE KAUČUKOVÝCH ZMESÍ

Kaučuky nie je možné bezprostredne spracovávať v hotové výrobky. Musia najskôr prejsť procesom prípravného spracovania, to znamená, že musia do nich byť pridané a rozptýlené rôzne prísady, občas musia byť odstránené prchavé látky (rozpúšťadlá), prípadne ďalšie nehomogenity (mechanické nečistoty). [15]

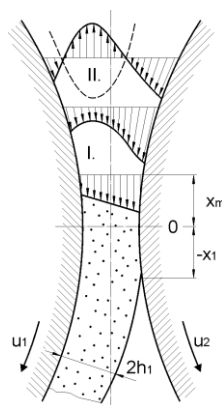
4.1 Miešanie

Je prvým procesom pri spracovaní kaučukových zmesí, ktorým sa pridáva do kaučuku vopred predurčené množstvo rozličných komponentov v zariadení, ktorým je hnetací stroj, dvojvalec alebo vytlačovací stroj. Miešanie zmesi predstavuje základ kaučukovej technológie. Problémy vzniknuté zlou prípravou zmesí sa prenášajú postupne cez jednotlivé procesy až ku konečnému produktu. Miešanie môže byť rozdelené na tri časti [9]:

- preprava surovín a ich prísad s potrebným navažovaním;
- miešací proces (príprava zmesi);
- spracovanie pripravenej zmesi (valcovanie, chladenie, skladovanie, balenie).

Mnoho dodávaných komponentov je zložité dávkovať a materiály sú dodávané do miešacieho procesu vo všetkých možných formách, ako balíky kaučuku, oleje, prášky, tvrdé živice, granule, pasty. Na prípravu hmoty s vysokým stupňom homogenity sa používajú rôzne typy miešania [12]:

- distributívne;
- disperzné;
- laminárne.

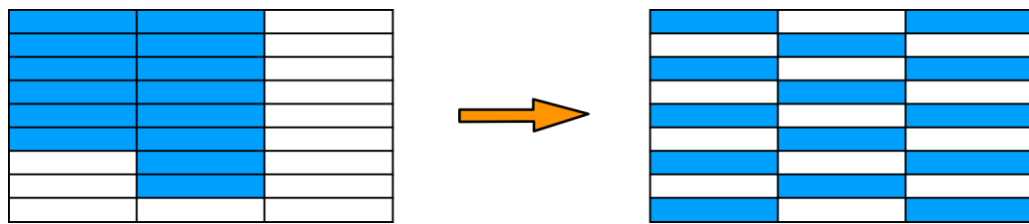


Obr. 13 – Miešanie
na dvojválci

4.1.1 Distributívne miešanie

Pomocou distributívneho miešania je dosiahnutá homogenita zmesi. V prípade ideálneho distributívneho miešania, nie je porušená žiadna častica (počas procesu je veľkosť častice nemenná), a pomer jednotlivých komponentov je v každom mieste zmesi rovnaký [12].

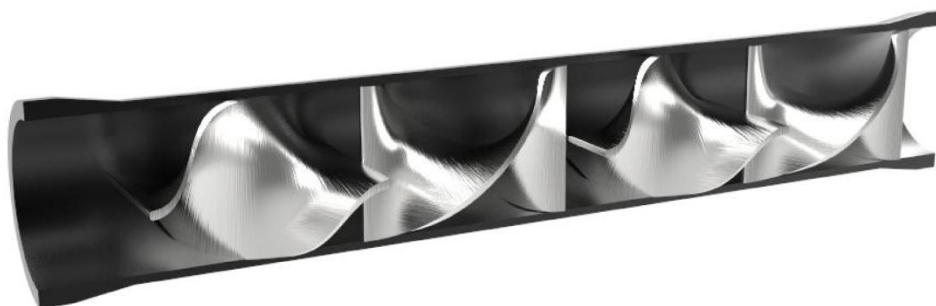
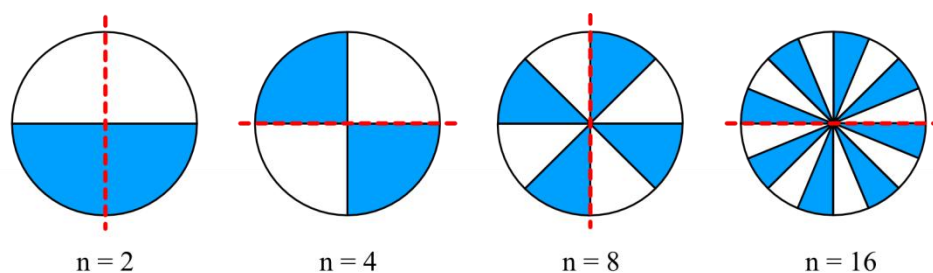
Hnacou silou zmeny polohy častíc je teda rotácia materiálu v miešacej komore, intenzita s ktorou dochádza k zmene polohy materiálu a celkový počet otáčok aplikovaný na miešajúcu dávku [12].



Obr. 14 – Distribučné miešanie

Príkladom jednoduchého distributívneho miešania realizuje statický mixér Kenics, ktorý má tvar skrutkových plôch. [13]

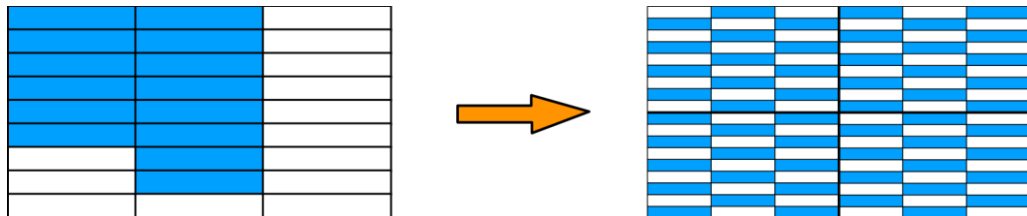
Do potrubia sa umiestňujú striedavo za sebou elementy s pravou a ľavou skrutkovicou tak, aby nábežné hrany susedných elementov zvierali uhol 90° . Používa sa na miešanie systémov plyn – kvapalina, kvapalina – kvapalina a kvapalina – pevná fáza. Statický mixér kontinuálne rozdeľuje prúdiace médium, ktoré sa po prebehnutí nerovnako dlhých dráh znovu spoja [14].



Obr. 15 – Princíp miešania pomocou statického mixéra Kenics

4.1.2 Disperzné miešanie

Pri tomto type, na rozdiel od distributívneho miešania, dochádza k zmene tvaru a veľkosti častíc. K zmene veľkosti väčšinou dochádza aplikovaním šmykovej alebo tlakovej sily. Rozhodujúcim faktorom pre tento typ miešania je aplikovaná sila a čas jej pôsobenia, čiže je silno závislí na krútiacom momente alebo príkone hnetiča. [12]



Obr. 16 – Disperzné miešanie

5 VSTREKOVANIE KAUČUKOVÝCH ZMESÍ

Vstrekovaním kaučukových zmesí sa označuje taký spôsob tvárenia polymérnych materiálov, pri ktorom sa plastikovaný materiál plní vysokou rýchlosťou do uzatvorenej dutiny formy, ktorá je temperovaná. Materiál sa plastikuje v plastikačnej jednotke, ktorá je súčasťou vstrekovacieho stroja. Plastikáciou sa rozumie prevedenie materiálu do plastického stavu, spravidla účinkom tepla. [22]

Kaučukové zmesi pre vstrekovanie musia mať dobré vtokové vlastnosti, pretože majú pri vstrekovaní vždy väčšiu viskozitu ako termoplasty. Z tohto dôvodu je obmedzené aj dávkovanie stužujúcich plnív, ktorých prítomnosť zhoršuje tokové vlastnosti. Zvláštne nároky sú kladené na vulkanizačný systém zmesi. Požaduje sa dostatočne dlhá bezpečnosť zmesi a vysoká rýchlosť vulkanizácie, čo znamená, že zmes môže zotrvať relatívne dlhšiu dobu pri zvýšenej teplote, vyvinutej pri plastikácii, bez toho, aby došlo k navulkanizovaniu materiálu. Kaučuková zmes sa preto skladá z vhodného množstva urýchľovačov a retardérov vulkanizácie. [25]

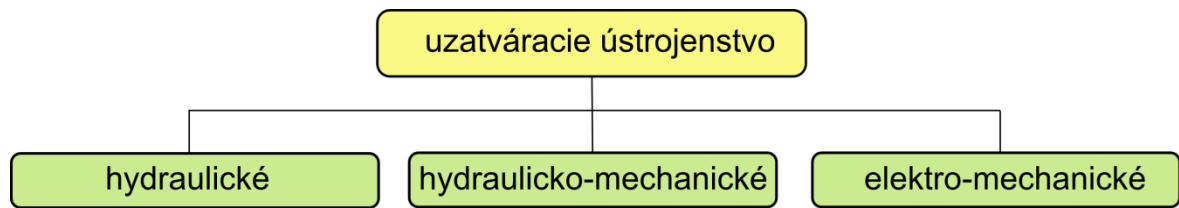
5.1 Vstrekovacia jednotka

Úlohou vstrekovacej jednotky je pripraviť požadované množstvo materiálu a s predpísanými technologickými vlastnosťami zabezpečiť jeho dopravu do dutiny formy. Maximálne vstrekované množstvo by nemalo prekročiť 90 % kapacity jednotky, pretože je nutná rezerva, pre prípadné doplnenie materiálu vo fázy dotlaku. Optimálne množstvo predstavuje 80 % kapacity vstrekovacieho stroja. [24]

V súčasnej dobe sa používajú vstrekovacie jednotky rôznych konštrukcií, ktoré majú zaisťovať dostatočne veľký vstrekovací tlak, ale taktiež primeranú plastikačnú kapacitu.

5.2 Uzatváracia jednotka

Uzatváracia jednotka zaisťuje bezpečné uzatvorenie a otvorenie formy. Potrebná uzatváracia sila je závislá na veľkosti stroja, resp. na veľkosti plochy prierezu výrobku v deliacej rovine a na veľkosti vstrekovacieho tlaku. Usporiadanie a tuhosť uzatváracjej jednotky majú rozhodujúci vplyv na tesnosť formy. [26]



Obr. 17 – Druhy konštrukcií uzatváracích jednotiek [27]

5.2.1 Hydraulické uzatváranie

Výhodou tohto usporiadania je jeho jednoduchosť. K dosiahnutiu veľkých síl je potrebný veľký rozmer hydraulického valca a k zaisteniu dostatočne vysokých uzatváracích rýchlostí veľké množstvo hydraulickej kvapaliny. Problémom je aj utesnenie piestov veľkých priemerov [26]

5.2.2 Hydraulicko-mechanické uzatváranie

Hydraulický valec môže byť umiestnený v ose alebo mimo osu. V oboch prípadoch má valec malý priemer a tým aj malú spotrebu hydraulickej kvapaliny. Pohyb piestnej tyče je prenášaný pákami na pohyblivú upínaciu dosku. Kinematickým usporiadaním mechanizmu je možné doceliť veľmi priaznivých ako silových, tak aj rýchlostných pomerov. [26, 28]



Obr. 18 – Princíp hydraulicko-mechanického uzatvárania formy [27]

5.2.3 Elektro-mechanické uzatváranie

Princíp je podobný ako pri hydraulicko-mechanickom uzatváraní s tým rozdielom, že potrebnú energiu dodáva elektromotor a nie hydromotor. K ich veľkým výhodám patrí jednoduchosť celého systému, veľká rýchlosť uzatvárania a ľahká automatizácia celého výrobného cyklu. [28]

5.3 Vstrekovacia forma

Vstrekovacia forma je temperovaná a uzatváranú uzatváracou silou. Počas procesu vstrekovania a dotlaku je forma pridržiavaná pridržiovacou silou, ktorá musí zabezpečiť jej tesnosť. [22]

Dutina formy môže byť definovaná ako časť formy, ktorá prepožičia svoj tvar budúcemu výrobku a je definovaná dvomi členmi vstrekovacej formy [23]:

- tvárnica, negatívna (ženská) časť formy, ktorá dáva výrobku jeho vonkajšiu podobu, negatívny tvar;
- tvárnik, pozitívna (mužská) časť formy, ktorý dáva výrobku jeho vnútornú podobu, pozitívny tvar.

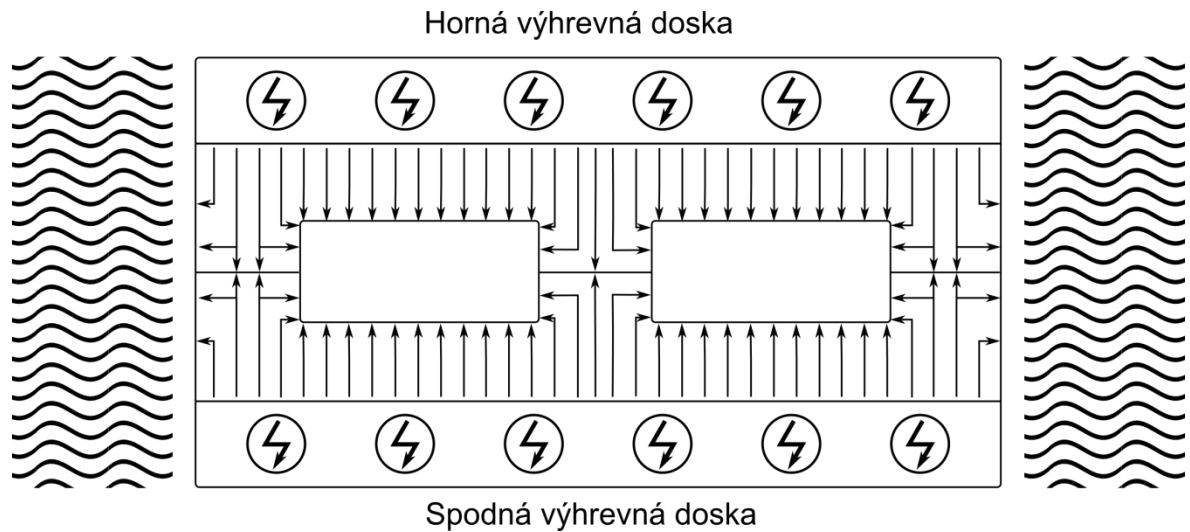
Výroba dielov vstrekovaním vzniká pri pôsobení tlaku, teploty a ďalších potrebných parametrov. Z tohto plynú základné požiadavky na stroj a formu, ktoré spolu úzko súvisia. Pri forme sa vyžaduje [24]:

- vysoká presnosť a požadovaná kvalita funkčných plôch zhotovenej dutiny formy a ostatných funkčných dielov;
- maximálna tuhosť a pevnosť jednotlivých častí formy aj celku pre zachytenie potrebného tlaku;
- správna funkcia formy, vhodný vtokový systém, vyhadzovanie, odvzdušnenie, temperovanie a podobne;
- optimálna životnosť zaručená konštrukciou, materiálom ale aj výrobou.

5.3.1 Temperovanie formy

Podmienkou dobrých tepelných pomerov v dutine formy je nutnosť umiestniť tvarovú dutinu formy nie v menšej vzdialenosti od okraja formy, ako je polovičná hodnota hrúbky formy samotnej. Nerovnomerná teplota formy spôsobuje nehomogenitu kvality výrobku,

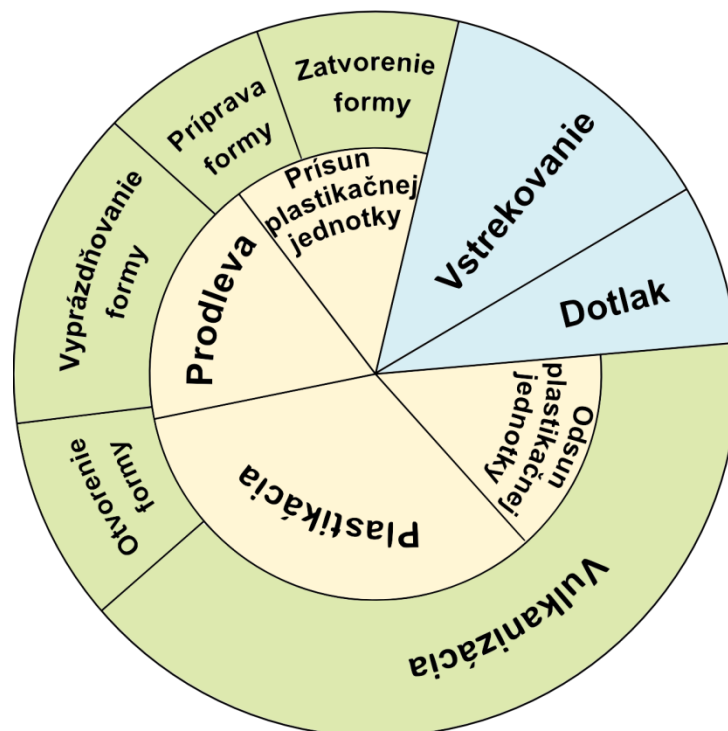
ako aj predlžovanie vulkanizačných časov. Preto je z technologického hľadiska potrebné dodržiavať teplotu formy v rozsahu $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. [36]



Obr. 19 – Šírenie tepla prierezom formy

5.3.2 Vstrekovací cyklus

Vstrekovací cyklus je delený na dve časti. Prvá časť pojednáva o činnostiach, ktoré súvisia s formou, druhá časť súvisí s plastikačnou jednotkou. Najdlhšou časťou vstrekovacieho cyklu je vulkanizácia.



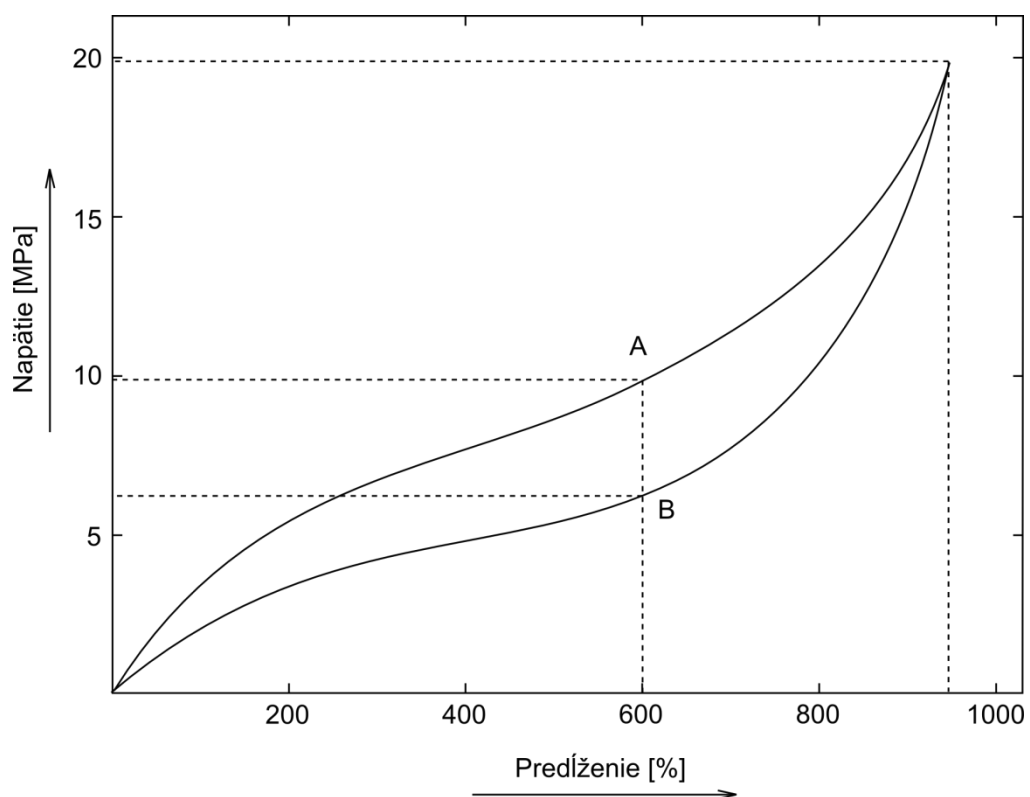
Obr. 20 – Vstrekovací cyklus

6 TESTOVANIE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PRYŽOVÝCH VÝROBKOV

Mechanické vlastnosti pryžových výrobkov sú silno zviazané s podmienkami jednotlivých testov, ako je napríklad teplota prostredia, čas pôsobenia sily. Z tohto dôvodu, by sa všetky uskutočňované testy mali vykonávať za podmienok, ktoré budú vierohodne reprezentovať prostredie, do ktorého je výrobok určený. [6]

6.1 Jednoosí ťah

Ťahové skúšky dávajú celkový hrubý obraz o vlastnostiach pryžového materiálu. Okrem toho sa pomocou nich kontroluje pravidelnosť technologických postupov, ako je napríklad stupeň vulkanizácie. Pre každú pryž je závislosť zaťaženia na predĺžení charakteristická. Je možné pomocou nej zistiť nie len konečné zaťaženie – pevnosť, a konečné predĺženie – ťažnosť, ale aj zaťaženie potrebné k určitému predĺženiu – modul, ktorý veľmi často slúži ako merítko pri hodnotení pryže. Tento modul sa nestotožňuje s Youngovým modulom, ktorý udáva silu potrebnú k zdvojnásobeniu pôvodnej dĺžky. [29]

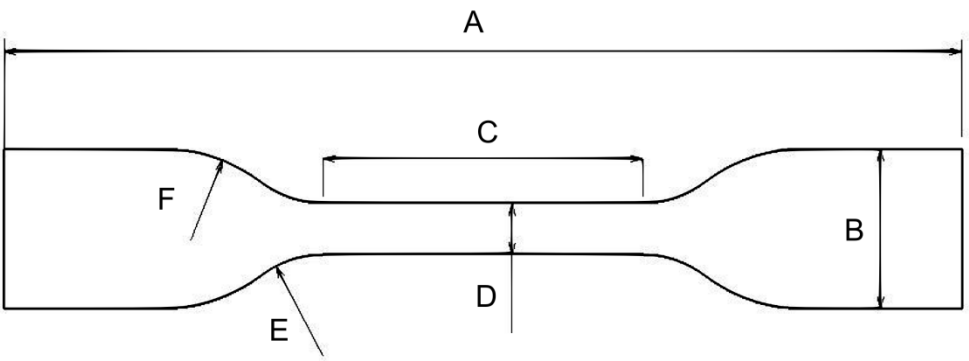


Obr. 21 – Ťahový diagram pryže (rozdielne moduly – rovnaká ťažnosť)

6.1.1 Tvar skúšobných telies

Rozmery skúšobných telies sú normované. Využívajú sa dva tvary skúšobných teliesok: lopatky a krúžky. Pri tvare lopatky u tuhých materiálov s ťažnosťou len niekoľko percent, nastáva deformácia prevažne len v zúženej časti a neprenáša sa do rozšíreného tvaru. U pryže, ktorá je silne deformovaná, dochádza k prenášaní napätia aj do rozšírených častí. Tie sa deformujú a vznikajú nepresnosti v odčítaní závislosti napätia na deformácii. Pri veľkých preťaženiach sú deformované aj upínacie časti a tým vzniká problém s uchytením vzorku. [2]

Tab. 4 – Normalizované rozmery skúšobných teliesok (lopatky) [6]



Rozmer	Typ 1	Typ 1A	Typ 2	Typ 3	Typ 4
A Celková dĺžka	115	100	75	50	35
B Šírka koncov	25 ± 1,0	25 ± 0,5	12,5 ± 1,0	8,5 ± 0,5	6 ± 0,5
C Dĺžka úzkej časti	33 ± 2,0	20 ± 2,0	25 ± 1,0	16 ± 1,0	12 ± 0,5
D Šírka úzkej časti	6 ± 0,4	5 ± 0,1	4 ± 0,1	4 ± 0,1	2 ± 0,1
E Prechodový polomer	14 ± 1,0	11 ± 1,0	8 ± 0,5	7,5 ± 0,5	3 ± 0,1
F Prechodový polomer	25 ± 2,0	25 ± 2,0	12,5 ± 1,0	10 ± 0,5	3 ± 0,1
Vyhodnoc. dĺžka	25 ± 0,5	20 ± 0,5	20 ± 0,5	10 ± 0,5	10 ± 0,5

S odstránením problému upnutia boli zavedené skúšobné telieska v tvare krúžkov. Odčítanie deformácie je taktiež s určitou nepresnosťou. Napätie je nerovnomerne rozložené v priereze krúžku, svoje maximum dosahuje na vnútornom obvode, zatiaľ čo minimum na vonkajšom obvode. Z tohto dôvodu keď ťahové napätie dosiahne hodnotu medze pevnosti, zaznamenaná sila pri pretrhnutí nekorešponduje so skutočným ťahovým napätím. [2, 6]

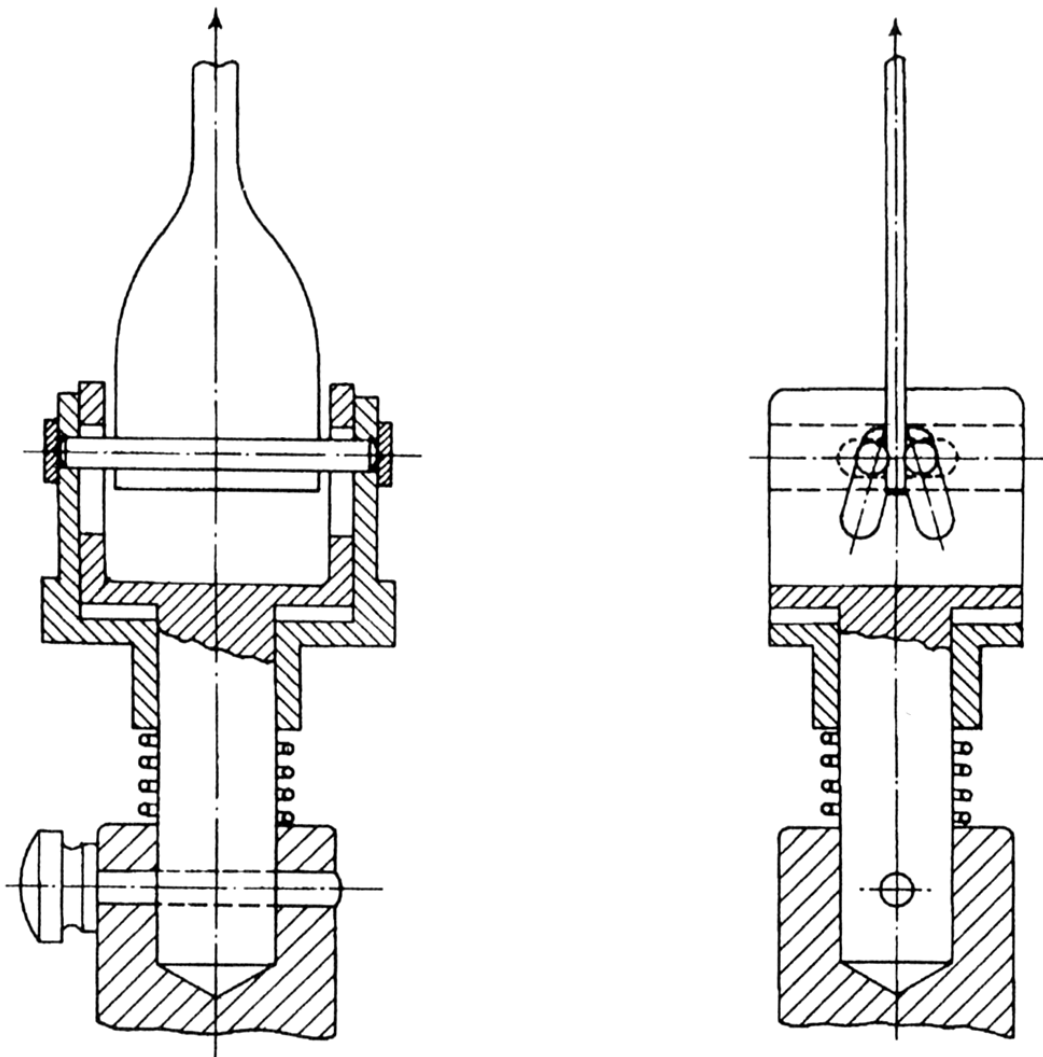
Tab. 5 – Reecem zaznamenané predĺženie skúšobného krúžku [6]

predĺženie na D₁	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
predĺženie na D₂ [%]	80	163	247	331	415	499	584	668	752	857

6.1.2 Tvar čelustí skúšobných strojov

Z dôvodu použitia rozdielnych tvarov skúšobných teliesok, je potrebný rôznych spôsob upnutia. Krúžky sa nasadzujú na pár kladiek osadených guľôčkovým ložiskom. Keďže plochy v kontakte s kladkou budú rozdielne namáhané vplyvom zamedzeniu preklzovania na kladke, mechanizmu je poskytnutá možnosť automaticky otáčať s jednou alebo oboma kladkami automaticky. [6]

Upnutie skúšobných teliesok v tvare lopatky je o niečo jednoduchšie. Je potrebné dodržať podmienku konštantného tlaku upnutia po celej šírke lopatky aby sa zabránilo preklzovaniu. Základným rysom správneho upnutia je to, že čelusť by sa mala zatvárať, a tým zvyšovať tlak, počas testu, kedy narastá napätie v skúšobnom teliesku. [6]



Obr. 22 – Tvar čelustí trhacieho stroja [6]

6.2 Tvrdosť

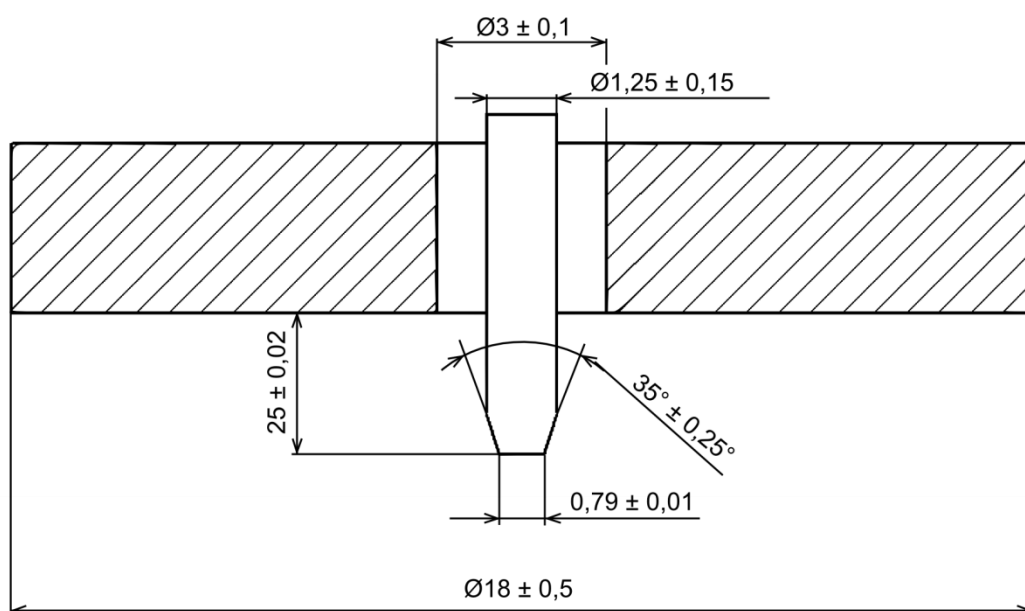
Pokiaľ je predmet vtlačovaný do povrchu tuhej hmoty, vznikne na povrchu priehlбина. U kovov alebo im podobným materiálom, vzniká trvalá deformácia a priehlбина zostane v povrchu otláčená aj po odstránení indentoru v podobe odpovedajúceho jeho obrysu. U pryžových materiálov tomu tak nie je, takže deformácia povrchu sa musí merať počas vtlačovania. Teoreticky platí, že odolnosť pryže proti vtlačovaniu závisí pri malých deformáciách na module pružnosti, rozmeru skúšobného telesa a na rozmere telesa, ktoré je vtlačované. [29]

Sila vnikania indentoru do materiálu môže byť aplikovaná tromi spôsobmi [6]:

- aplikácia konštantnej sily, kedy je vyhodnocovaná hĺbka vniknutia indentoru;
- aplikácia premenlivej sily, ktorá vyvolá konštantné vniknutie indentoru;
- použitie odporu pružiny, čo má za následok zmenu vnikajúcej sily v závislosti na hĺbke vniknutia.

6.2.1 Metóda Shore A

Je vhodná pre meranie tvrdosti pryže v rozsahu (20 – 90) jednotiek ShA. Meranie nižších alebo vyšších tvrdostí nie je možné považovať za správne, iba za smerné. (pre meranie nižších hodnôt je vhodné použiť metódu DVM, pre tvrdšie vulkanizáty zase metódu Shore D). Mernou jednotkou je jeden dielik na Shoreovej stupnici, pričom vyššie číslo značí tvrdšiu pryž. [29, 32]



Obr. 23 – Schéma tvrdomeru Shore A a rozmery podľa ČSN ISO 7619-1

Prístroj k stanoveniu tvrdosti Shore A sa skladá z týchto častí [29, 33]:

- indentoru, ktorý musí byť zhotovený z tyčinky kalenej ocele o priemere $1,25 \text{ mm} \pm 0,15 \text{ mm}$, ktorej vyčnievajúci koniec má tvar zrezaného kužeľa s vrcholovým uhlom $35^\circ \pm 0,25^\circ$ a s priemerom otupenej špičky $0,79 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Hrot vyčnieva z pätky prístroja $2,50 \text{ mm} \pm 0,02$ (vysunutie je platné pre odpočet 0 ShA). Pri meraní vplyvom odporu materiálu proti vnikaniu indentoru ustupuje hrot do vlastného tvrdomeru a prevodom (napr. mechanickým, zmenou indukovaného napätia) je hodnota tvrdosti zobrazená na vyhodnocovacom zariadení;
- pätky, základovej doštičky tvrdomeru, ktorej priemer musí byť $18 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ a stredový otvor pre indentor o priemere $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. Jej úlohou je zaručiť, aby indentor vnikal do meraného materiálu kolmo.

6.2.2 Príprava skúšobných vzorkov

V prípade nutnosti upraviť hrúbku skúšobného vzorku alebo je potrebné z jedného vzorku vytvoriť niekoľko plátov skúšobných telies, je možné toho doceliť pomocou [34]:

- *zariadenia s rotujúcim nožom*; ktoré pracuje na princípe komerčného rezacieho stroja. Skladá sa z rotoru alebo ručne poháňaného rezného nástroja vhodného priemeru a pohyblivého rezacieho stolu, na ktorom je vzorka posúvaná smerom rezacej hrane;
- *štíepacieho stroja*; ktoré pracuje na princípe komerčného zariadenia určeného na štiepanie usní. Bežné typy sú schopné štiepať pásy 50 mm široké s celkovou hrúbkou až do 12 mm.

6.2.3 Tvar a rozmery skúšobného vzorku

Každá metóda tvrdosti si vyžaduje odlišnú hrúbku skúšobného telesa. Zisťovaná tvrdosť na tvrdomeri Shore s indentorom typu A si vyžaduje skúšobnú vzorku hrubú minimálne 6 mm. Pri menších hrúbkach môže byť skúšobné teleso zložené z niekoľkých vrstiev. [33]

Tab. 6 – Tolerancia hrúbky skúšobného telesa [34]

hrúbka skúšobného telesa [mm]	tolerancia [mm]
1,0	$\pm 0,1$
2,0	$\pm 0,2$
4,0	$\pm 0,2$
6,3	$\pm 0,3$
12,5	$\pm 0,5$

Ostatné rozmery skúšobného telesa musia byť pre metódu Shore A také, aby umožňovali meranie vo vzdialenosti minimálne 12 mm od každého okraja a jednotlivé merané body musia byť od seba vzdialené minimálne 6 mm. Od povrchu skúšobného telesa sa vyžaduje rovnosť a rovnobežnosť na dostatočnej ploche, aby sa operná päťka dotýkala skúšobného telesa na ploche o polomere najmenej 6 mm od špičky indentoru. [33]

6.2.4 IRHD metóda

Patrí medzi medzinárodne uznávanú skúšku tvrdosti (IRHD – International Rubber Hardness Degrees). Štandardný vyhodnocovací rozsah je v rozmedzí (35 – 85) IRHD, no často sa využíva (10-100) IRHD. Keďže pri častom používaní dochádza taktiež k opotrebovaniu indentoru, pre túto metódu, vďaka svojej dobrej dostupnosti, bola zvolená oceľová guľôčka presného rozmeru. Podľa priemeru indentoru, predzaťaženia a celkového zaťaženia sa metóda IRHD delí na [6, 29, 35]:

- *metódu N*; kedy skúšobné teleso musí mať hrúbku (8 – 10) mm a musí byť tvorené jednou alebo viacerými vrstvami pryže, pričom najtenšia vrstva nesmie byť tenšia ako 2 mm. Merací rozsah metódy N je (35 – 85) IRHD.
- *metódu H*; ktorej podmienky sú totožné s metódou N s tým rozdielom, že je odlišný priemer indentoru a tým pádom aj využitie zariadenia. Metóda H sa využíva pri vulkanizátoch s vysokou tvrdosťou v rozsahu (85 – 100) IRHD.
- *metódu L*; pri ktorej je hrúbka skúšobného telesa v rozmedzí (10 – 15) mm pričom taktiež platí, že musí byť tvorené jednou alebo viacerými vrstvami s najtenšou vrstvou o minimálnej hrúbke 2 mm. Metóda L sa uplatňuje pri vulkanizátoch, ktorým tvrdosť je nižšia než 35 IRHD.
- *metódu M*; hrúbka skúšobného vzorku je $2 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$. Jedná sa o tzv. mikrometódu, kedy indentor vniká do materiálu silou rádovo v mN.

Tab. 7 – Podmienky metódy M podľa normy ČSN EN ISO 48 [35]

Skúška	Rozmery [mm]	Sila pôsobiaca na guľôčku [mN]			Sila pôsobiaca na pätku [mN]
		Kontaktná	Vtlačovacia	Celková	
Metóda M (mikrometóda)	Gulôčka $0,395 \pm 0,005$	8,30	145,00	153,30	235,00
	Päťka $3,35 \pm 0,15$	$\pm 0,50$	$\pm 0,50$	$\pm 1,00$	$\pm 3,00$
	Otvor $1,00 \pm 0,15$				

Tab. 8 – Rozdelenie metód meraní IRHD (N, H, L), podľa normy ČSN EN ISO 48 [35]

Skúška	Rozmery [mm]	Sila pôsobiaca na guľôčku [N]			Sila pôsobiaca na pätku [N]
		Kontaktná	Vtlačovacia	Celková	
Metóda N (35-85) IRHD	Gulôčka $2,50 \pm 0,01$	0,30 $\pm 0,02$	5,40 $\pm 0,01$	5,70 $\pm 0,03$	8,30 $\pm 1,50$
	Pätka $20,00 \pm 1,00$				
	Otvor $6,00 \pm 1,00$				
Metóda H (85-100) IRHD	Gulôčka $1,00 \pm 0,01$	0,30 $\pm 0,02$	5,40 $\pm 0,01$	5,70 $\pm 0,03$	8,30 $\pm 1,50$
	Pätka $20,00 \pm 1,00$				
	Otvor $6,00 \pm 1,00$				
Metóda L (10-35) IRHD	Gulôčka $5,00 \pm 0,01$	0,30 $\pm 0,02$	5,40 $\pm 0,01$	5,70 $\pm 0,03$	8,30 $\pm 1,50$
	Pätka $22,00 \pm 1,00$				
	Otvor $10,00 \pm 1,00$				

Pri meraní metódou M (mikrotvrdoť) musí byť zaručené, že najmenšia vzdialenosť meraného bodu nebude bližšie než 2 mm od kraja, zatiaľ čo pri metódach N, H a L najmenšia vzdialenosť možného meraného bodu daná závislosťou hrúbky skúšobného materiálu, ako je uvedené v Tab. 9. [35]

Tab. 9 – Minimálna vzdialenosť bodu merania od kraja skúšobného telesa [35]

Celková hrúbka skúšobného telesa [mm]	Minimálna vzdialenosť meraného bodu od kraja telesa [mm]
4	7,0
6	8,0
8	9,0
10	10,0
15	11,5
25	13,0

II. PRAKTICKÁ ČASŤ

7 CIELE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Diplomová práca si kladie za cieľ zistiť závislosť dĺžky a tvaru tokových kanálov na výsledné mechanické vlastnosti vulkanizátu ako aj závislosť dĺžky, tvaru a prierezu tokového kanálu na výslednú rýchlosť vulkanizácie.

Postup riešenia diplomovej práce je nasledovný:

- určenie materiálových charakteristík vstrekovanej zmesi poskytnutou spoločnosťou Continental Barum s.r.o.;
- vypracovanie počítačových analýz v programe Cadmould 3D-F pri zmene základných reologických charakteristík materiálu a ich závislosť na dobu vulkanizácie a rozvoj teplotného pola po dĺžke tokového kanálu;
- počítačová analýza závislosti tvaru a prierezu tokového kanálu, teploty formy a rýchlosti vstrekovania na vývine teplotného profilu a rýchlosti vulkanizácie;
- simulácia procesu vstrekovania pri krátkom (100 mm) a dlhom (200 mm) tokovom kanále a následný pohľad na generáciu šmykového napätia a teplotného pola vo vtokovom ústi.
- vyhotovenie skúšobných teliesok pri zvolených procesných podmienkach;
- voľba vhodného deliaceho zariadenia na prípravu skúšobných vzoriek pre mechanické skúšky (tvrdosť a pevnosť v ťahu);
- samotná realizácia mechanických skúšok na trhacom stroji, pre zistenie ťažnosti, modulu pružnosti a pevnosti vzoriek. Tvrdosť zistiť pomocou vhodne vybranej metódy skúšky tvrdosti.

8 ZVOLENÉ METÓDY SPRACOVANIA

8.1 Materiálové charakteristiky

Keďže každá kaučuková zmes má svoju receptúru a je zložená z jednotlivých komponentov, ktorých množstvo ovplyvňuje viac či menej vlastnosti zmesi pri spracovaní, tak aj mechanické vlastnosti finálneho vulkanizátu. Z materiálových charakteristík je potrebné zistiť ako reologické vlastnosti zmesi, jej správanie sa pri zmene teploty a závislosť viskozity na intenzite šmykového namáhania, tak vlastnosti vulkanizačné, určujúce rýchlosť vzniku priečných väzieb.

8.1.1 Spracovateľské vlastnosti

Kaučuk je radený medzi pseudoplastické látky, ktorých viskozita s narastajúcou rýchlosťou šmykovej deformácie klesá. Pred samotným spracovaním je potrebné poznať jeho tokovú krivku a rýchlosť vulkanizácie pri rôznych teplotách. Tieto vlastnosti boli zisťované vo firme Alfa Technologies na prístroji RPA 2000. Rýchlosť vulkanizácia bola zisťovaná pri teplote (140, 150, 160, 170) °C, rovnako ako aj viskozita zmesi.



Obr. 24 – Rubber Process Analyzer RPA 2000

8.2 Vstrekovací stroj a forma

Samotný proces výroby skúšobných teliesok prebiehal v dielni Ústavu výrobného inžinierstva, kde sa nachádza vertikálny vstrekovací stroj REP V27 Y125. Maximálna uzatváracia sila stroja je 57 kN, plastikačná jednotka používa šnek o priemere 20 mm, vstrekovacia jednotka má kapacitu 125 cm³ a do stroja je možné upnúť formu o maximálnych rozmeroch 300x300x495 mm.



Obr. 25 – REP V27 Y125

Tvarové časti formy boli vyrobené zo zliatiny hliníka EN AW-7022. Materiál je zliatinou hliníku, zinku, horčíku a medi (AlZnMgCu), ktorá je radená k najpevnejším zliatinám hliníku, preto disponuje vysokou pevnosťou no napriek tomu veľmi dobrou obrobiteľnosťou. Nedostatkom materiálu je sklon ku korózii pod napätím a nižšia lomová húževnatosť. V priemysle sa využíva na výrobu foriem, ako na priame vstrekovanie tak na vyfukovanie dutých výrobkov, pri výrobe rôznych upínok a prípravkov.

Tab. 10 – Obsah chemických prvkov v materiálu EN AW 7022

[%]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti + Zr
min.	---	---	0,5	0,1	2,6	0,1	4,3	---
max.	0,5	0,5	1	0,4	3,7	0,3	5,2	0,2

Tab. 11 – Vlastnosti EN AW 7022

Hustota:	2,76 g/cm ³
Youngov modul pružnosti:	72 000 Mpa
Koeficient tep. rozťažnosti (20-100) °C:	23,6 · 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Koeficient tep. vodivosti:	120 - 150 W/m.K
Pevnosť v ťahu Rm:	550 Mpa
Tvrdość podľa Brinella:	170 HB

Dosky na vstrekovacie formy sú dodávané v tepelnom stave označovanom ako T6, čo znamená, že materiál bol zohriaty na rozpúšťaciu teplotu a následne podstúpil precipitačné vytvrdzovanie.

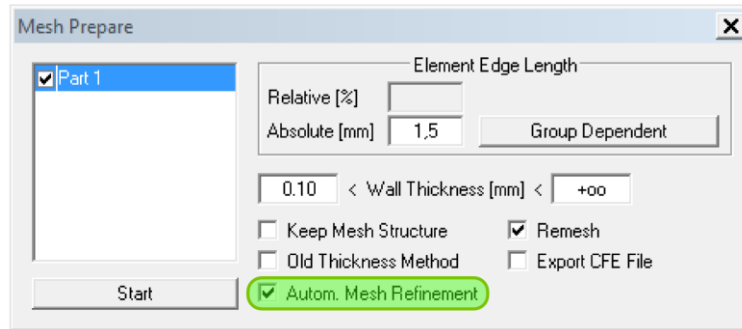


Obr. 26 – Tvarové dosky vstrekovacej formy

8.3 Zadefinovanie analýz

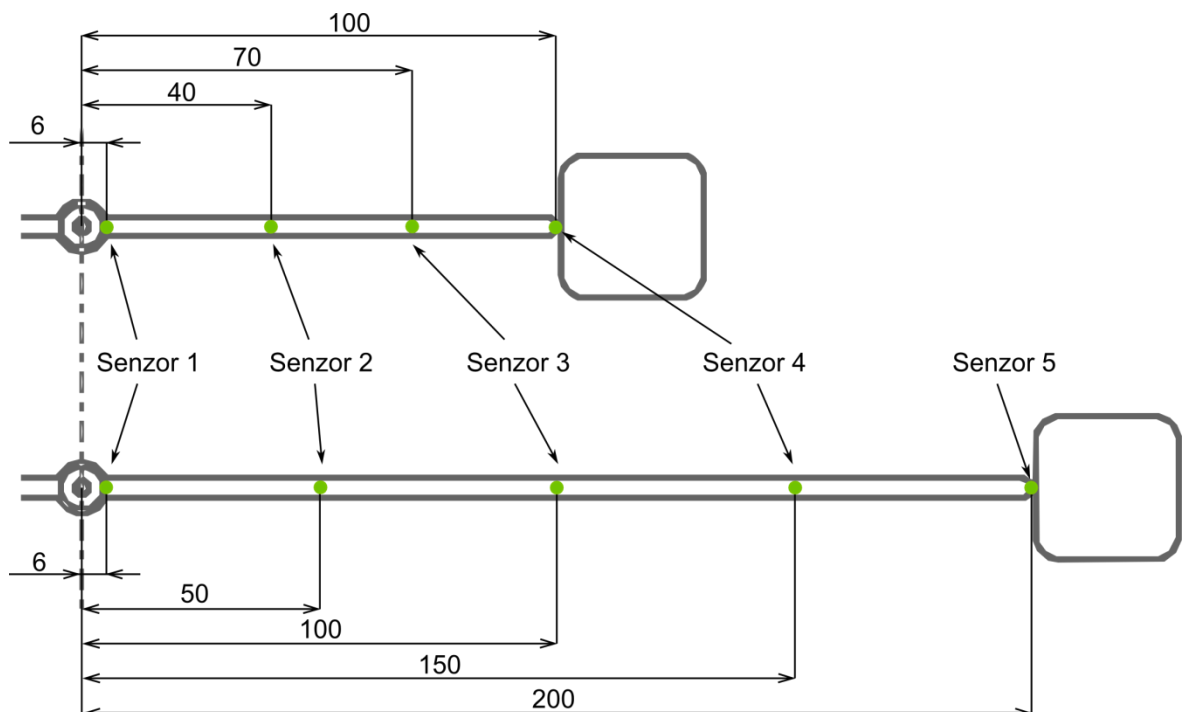
Keďže program Cadmould 3D-F využíva metódu konečných prvkov, je potrebné, aby priestor, v ktorom je simulácia počítaná, tzn. model výrobku, bol diskretizovaný. Týmto krokom sa model pokryje imaginárnou sieťou s pevne danými uzlovými bodmi, v ktorých sú zisťované veličiny počítané. Presnosť výsledku závisí od hustoty uzlových bodov a s narastajúcim počtom uzlových bodov úloha konverguje k reálnemu stavu. Pre výpočet bola

použitá vzdialenosť uzlových bodov, rozmer siete, 1,5 mm. Program taktiež disponuje možnosťou automatického upravenia siete (Automatic Mesh Refinement) pridaním nodálnych bodov, bez zmeny ostatných uzlových bodov a tým pádom aj geometrie siete. Táto možnosť bola pri využitá.



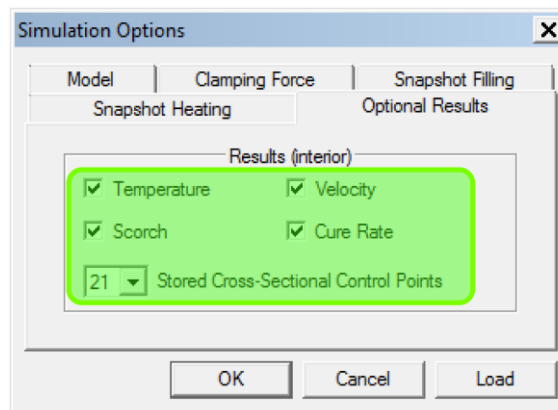
Obr. 27 – Zvolené podmienky v Mesh Prepare

Každý model, bez ohľadu na geometriu, bol osadený senzormi, ktorých množstvo sa líšilo od dĺžky tokových kanálov. Pre rozvodný kanál dlhý 100 mm boli zvolené 4 senzory z toho jeden vo vtokovom ústí a pre kanál o dĺžke 200 mm 5 senzorov, z toho jeden vo vtokovom ústí.



Obr. 28 – Rozmiestnenie senzorov pri krátkych a dlhých kanáloch

Keďže v záujme práce je zistiť vývoj teplotného pola po hrúbke kanálu, je potrebné výsledky, ktoré sa týkajú vnútra modelu, vypočítať a sprístupniť. Model bol po hrúbke rozdelený na 21 rezov, pričom každý rez sa stal nositeľom výsledku teploty, rýchlosti, miery vulkanizácie a bezpečnosti zmesi.



Obr. 29 – Sprístupnenie vnútorných výsledkov

8.4 Zadefinovanie parametrov na vstrekovacom stroji

Dostupný vstrekovací stroj REP V27 Y125 je schopný vyvinúť maximálny vstrekovací tlak 200 bar. Vstrekovávaná dávka je v mm/s a určuje posuv piestu vstrekovacej jednotky, pričom 1 mm posuvu piestu = 0,152 cm³ zmesi. Po spustení je potrebné vytemperovať vstrekovaciu formu, plastikačnú a vstrekovaciu jednotku, uzatvoriť formu a určiť uzatváraciu silu. Jednotlivé parametre sú ukryté pod dvojmiestnym kódovým označením. Tab. 12 ukazuje význam nastavovaných parametrov.

Tab. 12 – Parametre stroja a ich význam

Parameter	Popis činnosti	Jednotky
21	Rýchlosť vstrekovania (dráha piestu za sekundu)	[mm/s]
30	Celková dávka zmesi (dĺžka dráhy piestu)	[mm]
41	Vstrekovací tlak udávaný v baroch (maximálne 200 bar)	[bar]
51	Bod na dráhe piestu od ktorej pôsobí vstrekovací tlak	[mm]
56	Doba vulkanizácie od skončenia vstrekovania	[min]
61	Teplota plastikačnej komory	[°C]
62	Teplota vstrekovacej komory	[°C]
65	Teplota hornej výhrevnej dosky	[°C]
67	Teploty spodnej výhrevnej dosky	[°C]

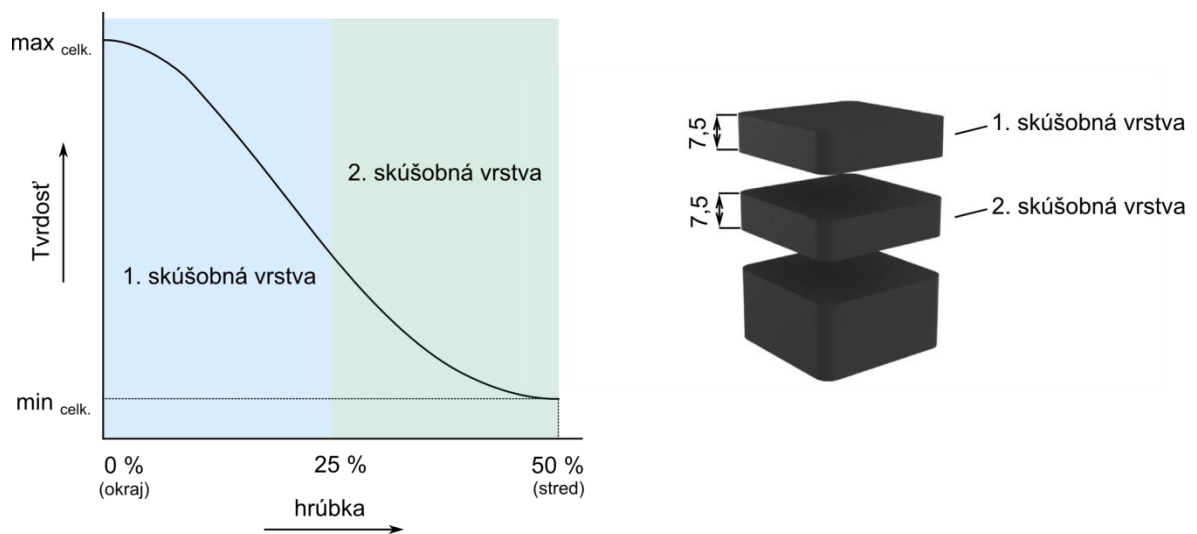
8.5 Mechanické skúšky

8.5.1 Skúška tvrdosti

Tvrdosť vulkanizátu bolo možné v rámci Ústavu výrobného inžinierstva merať pomocou dvoch metód:

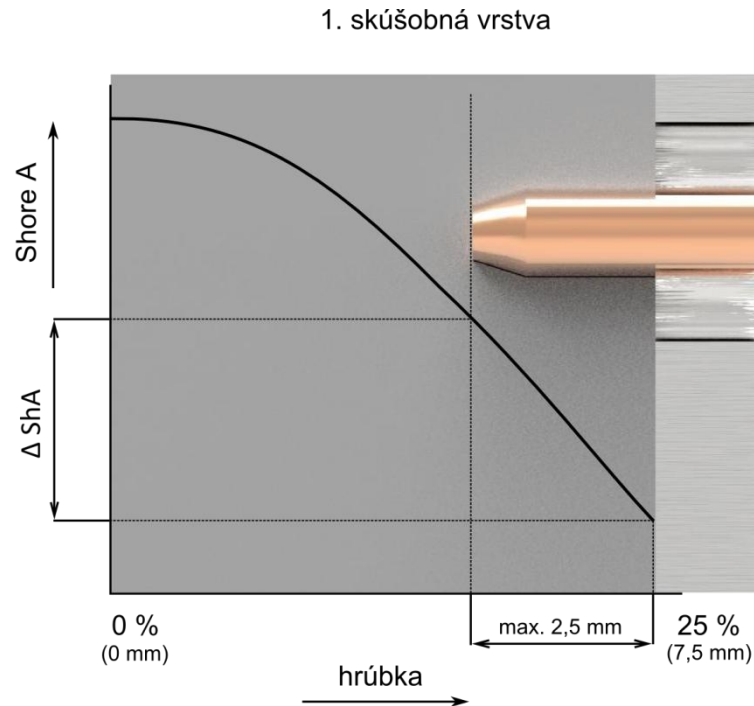
- Shore A (ČSN EN ISO 7619-1)
- IRHD (ČSN EN ISO 48)

Vzhľadom k faktu, že vystreknutá kocka nebola zámerne plne zvulkanizovaná (nie všetky miesta dosiahli po vybratí z formy 90 % vzniknutých priečných väzieb), nebola jej tvrdosť homogénna. Nami predpokladaná tvrdosť je najnižšia v strede skúšobnej kocky a najvyššia na povrchu, kde je materiál plne zvulkanizovaný. Z čoho vyplýva, že tvrdosť je silne podmienená na počte vzniknutých priečných väzieb a tým pádom krivka závislosti množstva priečných väzieb na hrúbke a krivka závislosti tvrdosti na hrúbke budú mať veľmi analogický tvar.



Obr. 30 – Závislosť tvrdosti na hrúbke

Pri meraní tvrdosti metódou Shore A môže indentor vniknúť do materiálu maximálne do hĺbky 2,5 mm (tento stav odpovedá tvrdosti 0 ShA). Keďže skúšobné vrstvy nie sú homogénne, čo sa tvrdosti týka, vnikaním indentoru sa mení, klesá/narastá, tvrdosť a tým aj odpor materiálu proti vnikaniu cudzieho telesa.



Obr. 31 – Znáznorná zmena tvrdosti (metóda Shore A)

Keďže hĺbka vniknutia indentoru je závislá na tvrdosti skúšaného materiálu, bolo by veľmi nepresné určiť vzdialenosť meranej a vyhodnocovanej vrstvy od steny kocky. Z toho dôvodu bola metóda Shore A označená ako nevyhovujúca a tvrdosť ďalej vyhodnocovaná pomocou normy ČSN EN ISO 48 a tvrdomeru IRHD od spoločnosti Affri System. Podľa predpokladaného rozsahu tvrdosti bola vybraná metóda merania *N*.

Tab. 13 – Tvrdomer IRHD

výrobca:	Affri System
typ merania:	IRHD
princíp fungovania:	podľa normy ISO 48
merateľné metódy:	metóda L (10 - 35) IRHD metóda N (30 - 85) IRHD metóda H (85 - 100) IRHD metóda M (mikrotvrdosť)
rozsah prístroja:	10 - 100 IRHD
rozlišiteľnosť prístroja:	0,1°
presnosť prístroja:	0,2°



Obr. 32 – Affri Systém tvrdoměr IRHD

8.5.2 Ťahová skúška

Ťahová skúška bola realizovaná v spoločnosti Continental Barum. K rezaniu vrstiev došlo na stroji Fortuna UAF 470, ktorý je schopný oddeľovať vrstvy hrubé už od 0,2 mm. Potrebná hrúbka na skúšobné teliesko je 1 mm, preto aj vrstvy boli hrubé 1 mm a boli odobrané na povrchu, v strede kocky a v polovičnej vzdialenosti medzi povrchom a stredom.

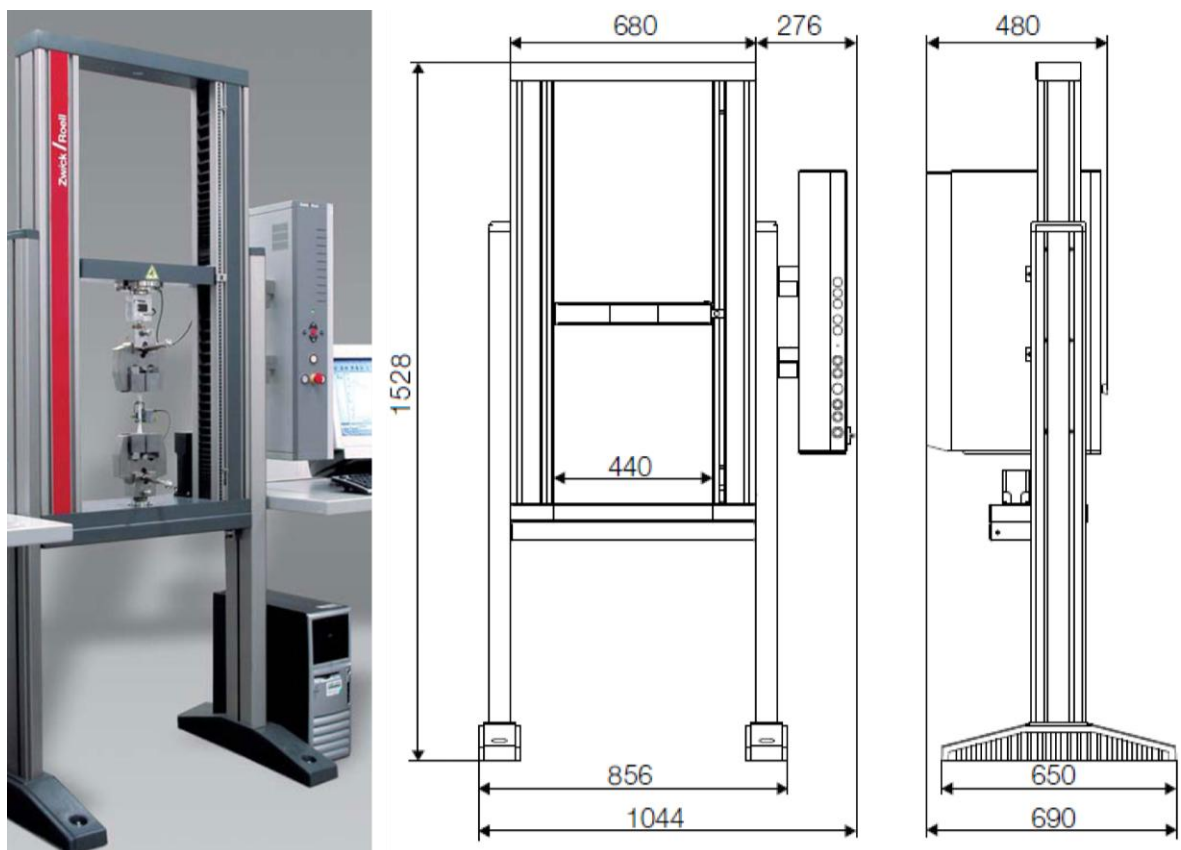


Obr. 33 – Deliaci stroj Fortuna UAF 470

Samotná ťahová skúška bola realizovaná na stroji Zwick/Roell Z005, pričom predĺženie skúšobných teliesok bolo merané extenziometrom na laserovom princípe. Po vyseknutí bola skúška realizovaná po 24 hodinách, počas ktorých došlo k relaxácii, uvoľneniu, napätí vo vzorke.

Tab. 14 – Technické dáta k prístroju Zwick/Roell Z005

Záťažová sila FN:	[kN]	5
Šírka pracovného priestoru:	[mm]	440
Výška pracovného priestoru:	[mm]	1070
Max. posuv pohyblivej čeľuste:	[mm]	1000
Celková výška stroja:	[mm]	1528
Celková šírka stroja:	[mm]	1044
Celková hĺbka stroja:	[mm]	690
Celková hmotnosť stroja:	[kg]	161
Minimálna rýchlosť čeľustí:	[mm/s]	0,001
Normalizovaná rýchlosť čeľustí:	[mm/s]	500
Presnosť rýchlosti (z nastavenej):	[%]	0,05



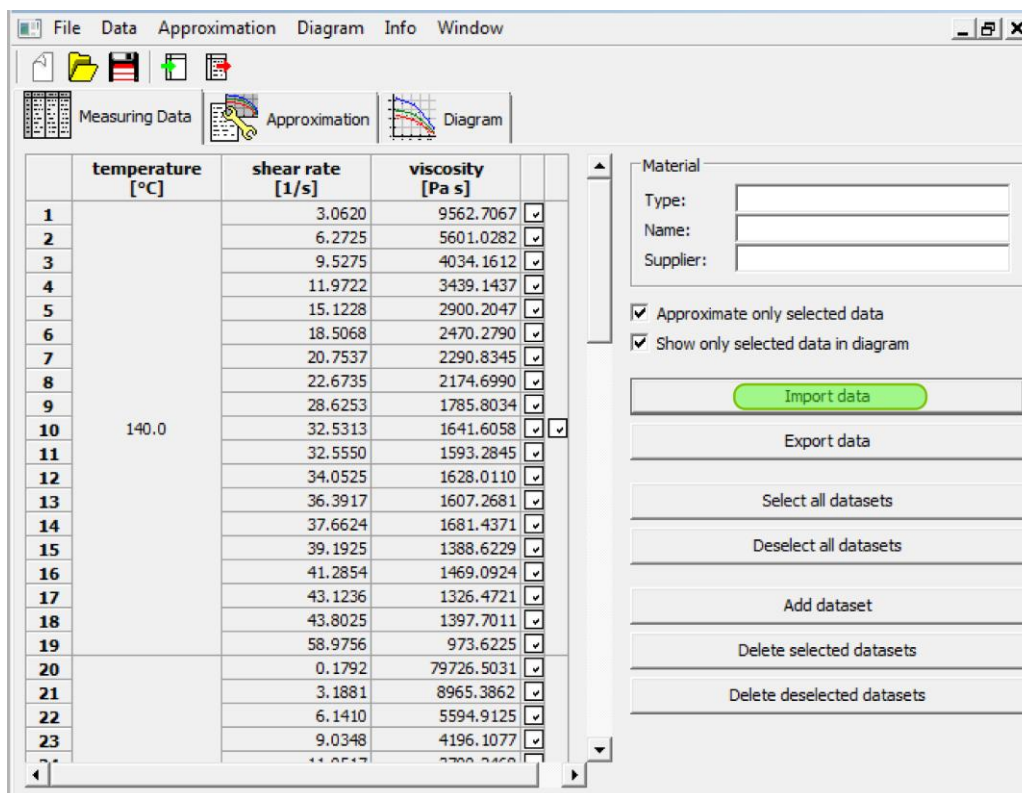
Obr. 34 – Základné rozmery stroja Zwick/Roell Z005

9 MATERIÁLOVE CHARAKTERISTIKY ZMESI

Dodaný materiál firmou Continental Barum podstúpil meranie na prístroji RPA 2000 v demoroome firmy Alfa Technologies. Vyhodnocované boli ako tokové, tak vulkanizačné vlastnosti materiálu, pre jeho ďalšie možné použitie v počítačových analýzach. Pri reologických vlastnostiach boli zisťovanými veličinami rýchlosť šmykovej deformácie a viskozita, pričom hodnoty boli snímané pri teplote (140, 150, 160, 170) °C. Vulkanizačné vlastnosti zmesi boli zisťované z odporu vo forme krútiaceho momentu, ktorý materiál kládol voči rotoru, v určitom čase pri teplotách (140, 150, 160, 170) °C. Dáta boli pre ďalšie spracovanie uložené vo formáte *.csv (text oddelený čiarkou), ktorý vyžaduje program na vytvorenie materiálov pre Cadmould 3D-F – Simfit.

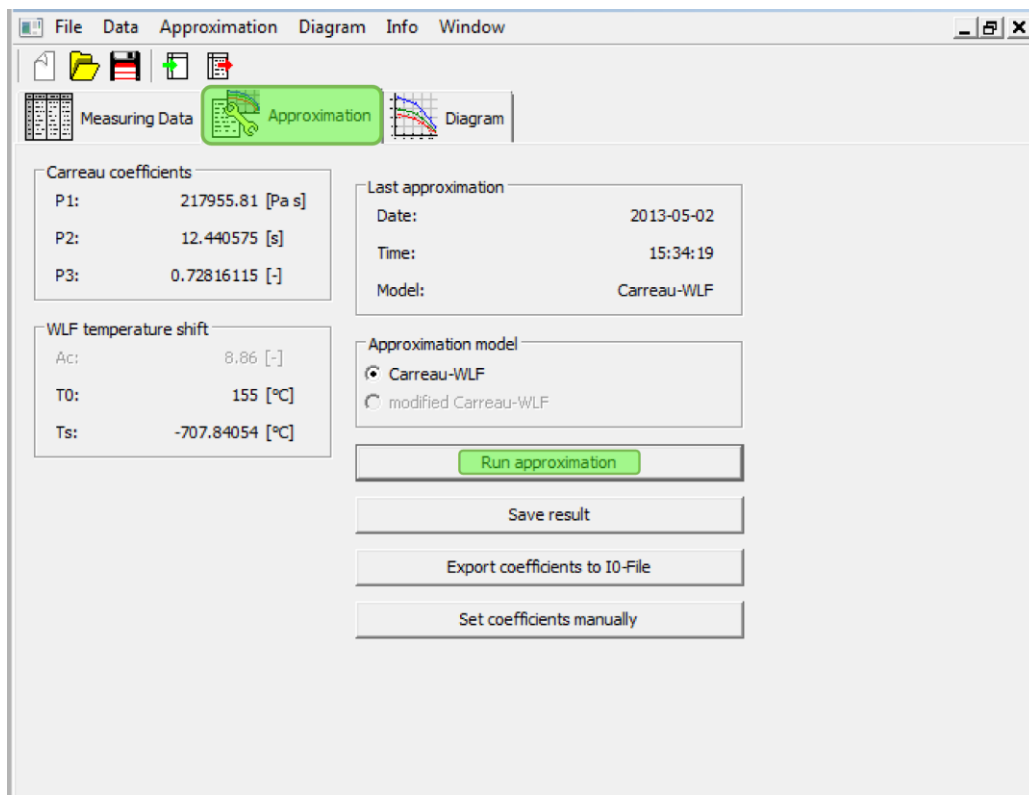
9.1 Simfit 5.0

Program Simfit 5.0 je charakteristický svojim jednoduchým ovládaním. Pre zistenie potrebných parametrov potrebných na spustenie analýz je potrebné vybrať príkaz „Viscosity approximation“ a „Cure rate approximation“. Po výbere príkazu je importovaný súbor s nameranými údajmi vo formáte *.cvs.



Obr. 35 – Import nameraných dát do programu Simfit 5.0

V záložce „Approximation“ stačí spustiť príkaz „Run approximation“ čím sa spustí výpočet potrebných materiálových parametrov.



Obr. 36 – Aproximácia vstupných dát v podobe potrebných parametrov

Pre vstrekaný materiál boli zistené nasledujúce reologické vlastnosti, ktoré sú popísané v Tab. 15.

Tab. 15 – Reologické vlastnosti

Carreau - William Landel Ferry model		
P_1	[Pa.s]	217955,81
P_2	[s]	12,441
P_3	[-]	0,728
P_4	[Pa.s]	0
T_0	[°C]	155
T_s	[°C]	-707,841

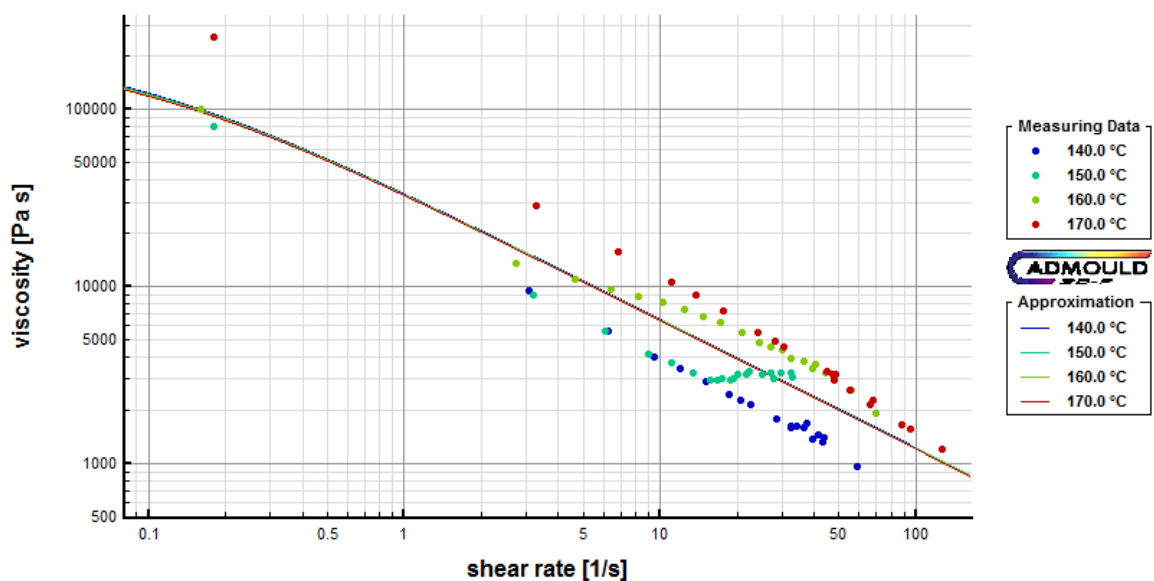
Kde P_1 (η_0) je viskozita pri veľmi nízkych šmykových napätíach, P_4 zase pri extrémne vysokom šmykovom napätí. P_2 ($\frac{1}{\lambda}$) je relaxačný čas materiálu, P_3 parameter, ktorý určuje index neneutonského chovania ($n = 1 - P_3$). Referenčná teplota je určená parametrom T_0 .

Carreau – William Landel Ferry model viskozity je daný vzťahom:

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \frac{\eta_0 \cdot a_T}{(1 + \lambda \cdot a_T \cdot \dot{\gamma})^{1-n}} \quad (3)$$

Pričom ostrosť prechodu z newtonskej do pseudoplastickej oblasti je vyjadrená vzťahom:

$$a_T = \left(\frac{8,86 \cdot [T_0 - T_S]}{101,6 + T_0 - T_S} - \frac{8,86 \cdot [T - T_S]}{101,6 + T - T_S} \right) \quad (4)$$



Obr. 37 – Diagram závislosti viskozity na intenzite šmykového toku v meranej zmesi

Rovnaký postup je opakovaný taktiež na zistenie vulkanizačných vlastností zmesi. Vulkanizačné vlastnosti zmesi popisuje Tab. 16.

Tab. 16 – Vulkanizačné vlastnosti

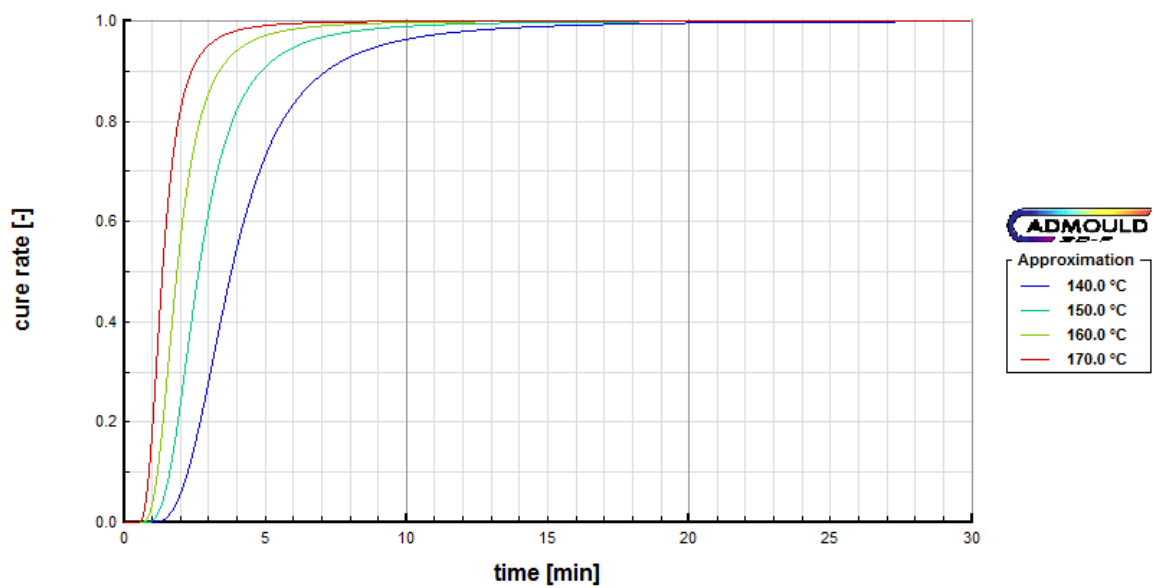
Deng/Isayev model vulkanizácie			
Bezpečnosť zmesi	$\log_{10}(T_0)$	[min]	-4,529
	T_0	[°K]	4273,221
Vulkanizačný systém	$\log_{10}(K_0)$	[1/min ⁿ]	20,034
	E_a	[J/mol]	168675,822
	n	[-]	2,828

Program Cadmould 3D-F na vyjadrenie prebiehajúcej vulkanizácie využíva Deng – Isayev model vulkanizácie, ktorý má tvar:

$$\alpha = \frac{K \cdot t^n}{1 + K \cdot t^n} \quad (5)$$

Pričom rýchlosť prebiehajúcej chemickej reakcie je vyjadrená Arrheniovou rovnicou:

$$K(T) = K_0 e^{\left(\frac{-E}{R \cdot T}\right)} \quad (6)$$

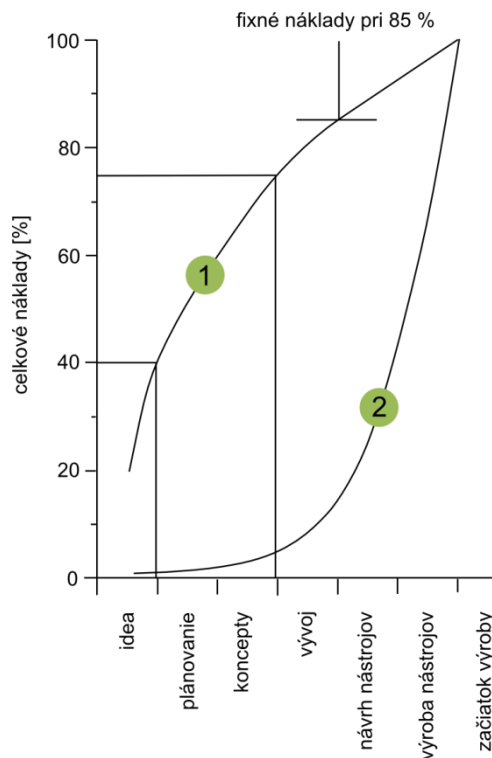


Obr. 38 – Diagram závislosti rýchlosti vulkanizácie na čase v meranej zmesi

10 ANALÝZA PROCESU VSTREKOVANIA

Každá spoločnosť pred započatím realizácie nového produktu stojí na prahu rozhodnutia, ktoré ovplyvní celý jej postup. Existujú dve potencionálne cesty:

- realizácia vývoja výrobku, štúdie, vytvorenie prototypov, vyhľadanie kritických miest a ich odstránenie pred výrobou;
- eliminácia predbežného vývoja, tzv. metóda „pokus – omyl“.



Obr. 39 – Štúdie výšky nákladov realizovaných Wolfgangom Altmannom

Všetky simulácie boli realizované pri zhodných procesných podmienkach. Menenými veličinami bola geometria vtokových systémov, teplota formy a rýchlosť vstrekovania.

Všetky analýzy boli spúšťané na tej istej počítačovej zostave s parametrami Tab. 17.

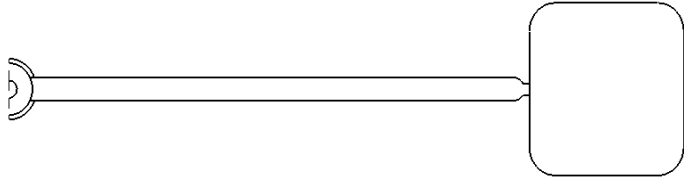
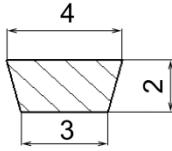
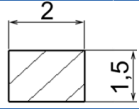
Tab. 17 – Informácie o výpočtovom zariadení

procesor	Intel® Core 2 Quad Q6600 2,40 GHz
RAM	2048 MB
HDD	500 GB
grafická karta	NVIDIA Quadro FX 570 1010 MB
operačný systém	Windows 7 Professional 64-bit

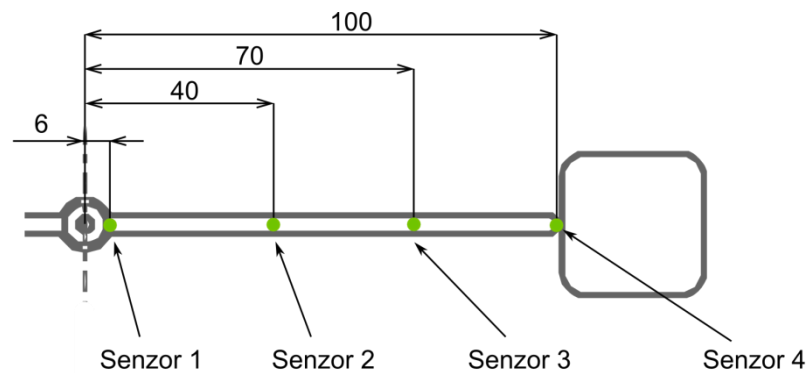
10.1 Úloha č. 1 – vplyv indexu neneutonského chovania

Prvá časť simulácií vstrekovania sa venuje vplyvu reologických vlastností, konkrétne indexu neneutonského chovania materiálu, na vzniku tepla vplyvom disipovanej energie. Simulácie boli realizované na jednom type modelu pri jednej teplote formy a viacerých rýchlostiach vstrekovania.

Tab. 18 – Geometria tokového kanálu a procesné podmienky

Trajektória kanálu	
Geometria	
Prierez kanálu	
Vtokové ústie	
Rýchlosť [mm/s]	5; 10; 15; 20; 30
Teplota [°C]	170 °C

Geometria tokového kanálu bola po dĺžke osadená 4 senzormi na zistenie vnútorných výsledkov v priereze kanálu (Obr. 40).



Obr. 40 – Umiestnenie senzorov na tokovom kanále

Ako materiál bol zvolený NBR 60 Shore. Jedná sa o už preddefinovaný materiál, ktorého index newtonského chovania bol následne upravený.

Tab. 19 – Reologické vlastnosti zmesi

Carreau - William Landel Ferry model		
P_1	[Pa.s]	16486,1
P_2	[s]	0,0626
P_3	[-]	0,8; 0,5; 0,3; 0,0
n	[-]	0,2; 0,5; 0,7; 1,0
P_4	[Pa.s]	0
T_0	[°C]	90
T_5	[°C]	-88,44

Index newtonského chovania bol menený v rozmedzí (0,2 – 1,0) a v programe Cadmo-uld 3D-F je zadaný ako $n = 1 - P_3$.

Tab. 20 – Vulkanizačné vlastnosti zmesi

Deng/Isayev model vulkanizácie			
Bezpečnosť zmesi	$\log_{10}(T_0)$	[min]	-4,529
	T_0	[°K]	4273,221
Vulkanizačný systém	$\log_{10}(K_0)$	[1/min ⁿ]	20,034
	E_a	[J/mol]	168675,822
	n	[-]	2,828

Z procesných podmienok sa menila jedine rýchlosť vstrekovania. Bola zvolená jedna teplota formy, $T = 170$ °C.

Tab. 21 – Procesné podmienky I. úlohy

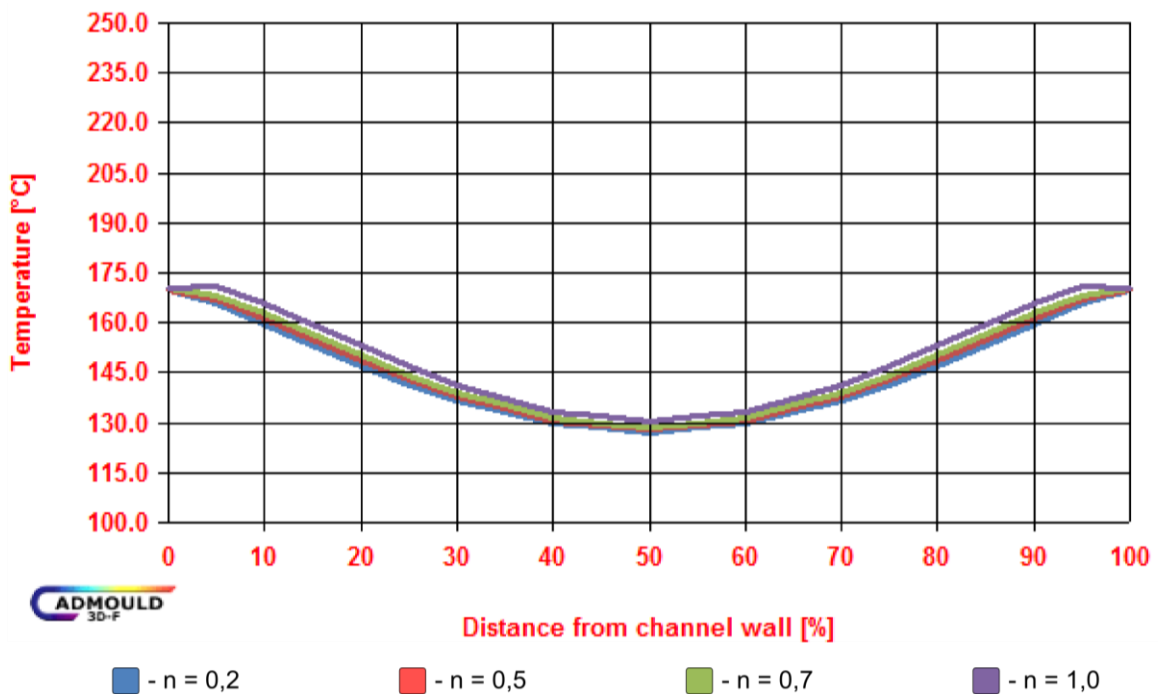
Veličiny	Jednotky	Varianta				
		I.	II.	III.	IV.	V.
Rýchlosť piestu stroja REP	[mm/s]	5	10	15	20	30
Prietokové množstvo	[cm ³ /s]	0,7	1,5	2,3	3,0	38,0
Tlakom riadené plnenie pri	[%]	99				
Teplota taveniny	[°C]	100				
Teplota formy	[°C]	170				
Vulkanizácia vo forme	[s]	600				
Vulkanizácia mimo formu (T = 20 °C)	[s]	200				

10.1.1 Rýchlosť piestu $v = 5 \text{ mm/s}$

Tab. 22 – Výsledky zo simulácií pri rýchlosti (piestu) $v = 5 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$

	Čas vstrekovania [s]	Potrebný tlak [bar]	Teplota vo vtok.ústi [°C]	Vulkanizácia [s]
n=0,2	80,0	347	144,5	383
n=0,5	80,0	533	146,0	378
n=0,7	80,1	703	147,1	374
n=1,0	80,1	1065	149,5	364

Čas potrebný na tok materiálu od trysky ku vtokovému ústiu je približne 6,0 s, po ktorých najvyšší teplotný rozdiel činí zhruba 5 °C . Vulkanizácia je týmto teplotným navýšením skrátená o asi 19 s.



Obr. 41 – Priebeh teploty po hrúbke vtokového ústia pri zmene P_3 ($T = 170 \text{ °C}$, $v = 5 \text{ mm/s}$)

Pri malých rýchlostiach vstrekovania je miera disipačného tepla malá. Výhodou pomalého toku materiálu cez rozvodný kanál je fakt, že materiál je prehriaty po celej svojej hrúbke, vrátane stredu rozvodného kanálu (cca 130 °C).

Tab. 23 – Generované šmykové napätie vo vtokovom ústi ($T = 170 \text{ °C}$)

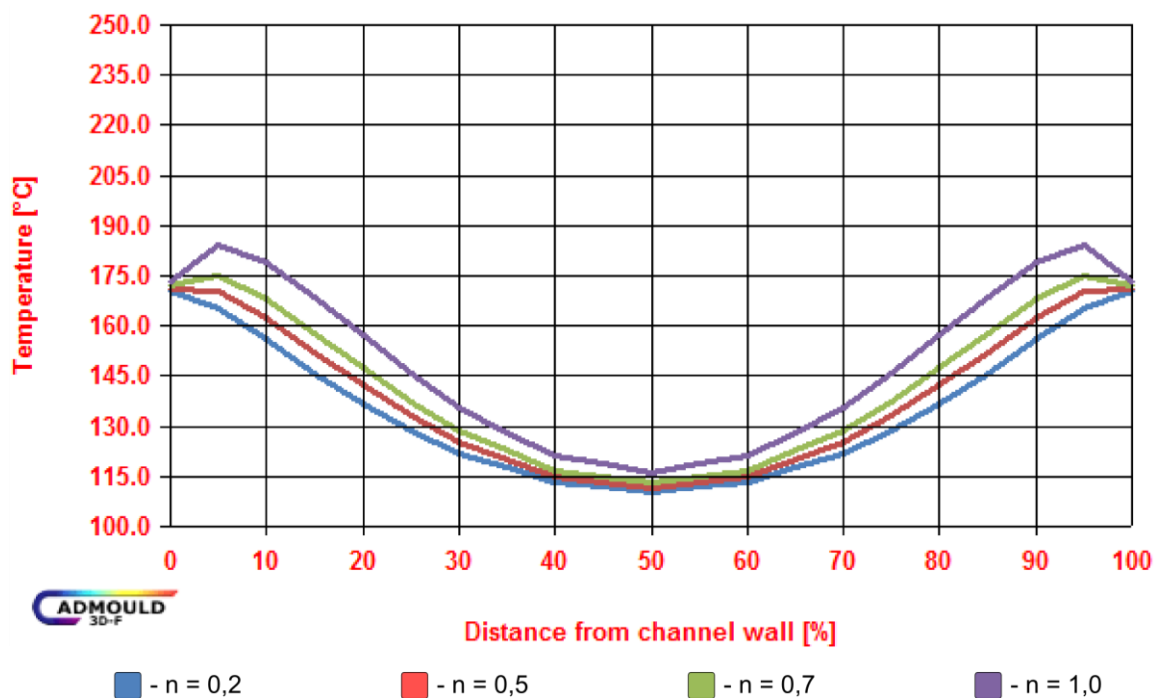
	n = 0,2	n = 0,5	n = 0,7	n = 1,0
τ [kPa]	455	886	1276	2271

10.1.2 Rýchlosť piestu $v = 10$ mm/s

Tab. 24 – Výsledky zo simulácií pri rýchlosti (piestu) $v = 10$ mm/s, $T = 170$ °C

	Čas vstrekovania	Potrebný tlak	Teplota vo vtok.ústi	Vulkanizácia
	[s]	[bar]	[°C]	[s]
n=0,2	37,2	468	133,9	397
n=0,5	37,4	867	137,9	387
n=0,7	37,3	1261	141,8	378
n=1,0	37,4	2100	149,2	352

Dráhu od trysky stroja k vtokovému ústi materiál prekoná za cirka 2,9 s. Najväčší rozdiel teploty vo vtokovom ústi je medzi materiálmi s indexom nennewtonského chovania 0,2 a 1,0 a to približne 15 °C, pričom tento nárast teploty skráti čas vulkanizácie o zhruba 45 s.



Obr. 42 - Priebeh teploty po hrúbke vtokového ústia pri zmene P_3 ($T = 170$ °C, $v = 10$ mm/s)

Zvyšovaním vstrekovacieho tlaku dôsledkom zmeny parametru P_3 , postupne narastá hodnota vzniknutého šmykového napätia (Tab. 25), čím dochádza ku zvýšenému zahrievaniu materiálu vplyvom disipácie a tým pádom aj k skráteniu času vulkanizácie.

Tab. 25 – Generované šmykové napätie vo vtokovom ústi ($T = 170$ °C)

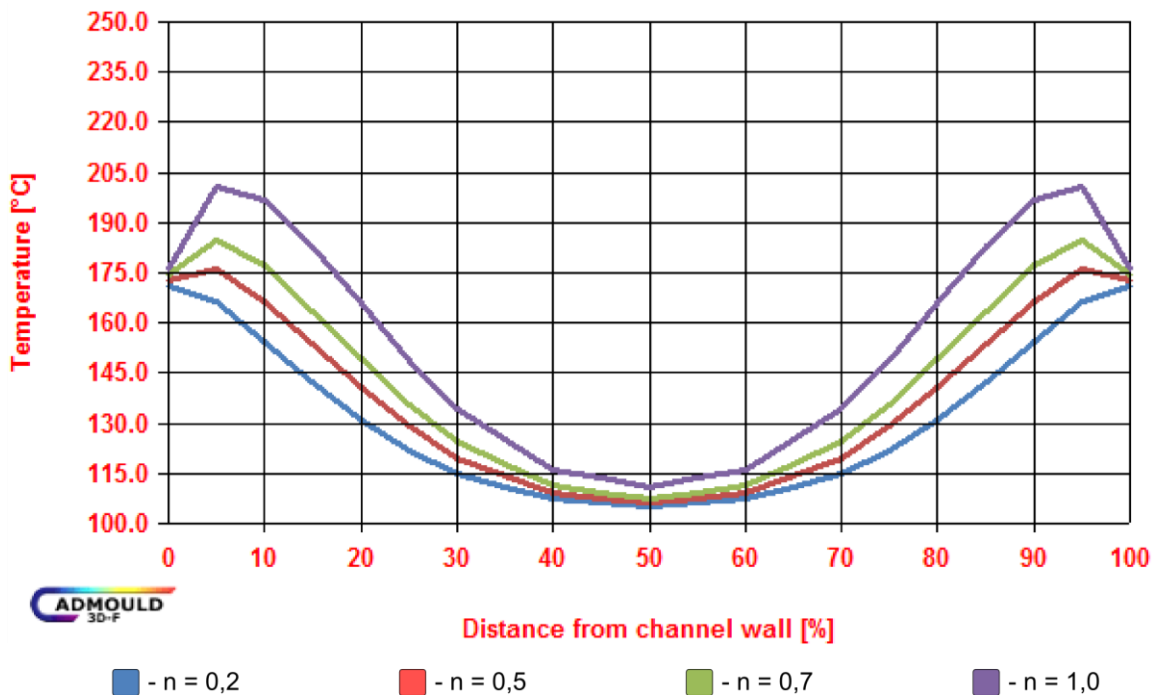
	n = 0,2	n = 0,5	n = 0,7	n = 1,0
τ [kPa]	566	1418	2376	4360

10.1.3 Rýchlosť piestu $v = 15 \text{ mm/s}$

Tab. 26 – Výsledky zo simulácií pri rýchlosti (piestu) $v = 15 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$

	Čas vstrekovania [s]	Potrebný tlak [bar]	Teplota vo vtok.ústi [°C]	Vulkanizácia [s]
$n=0,2$	24,3	537	129,7	403
$n=0,5$	24,3	1100	136,1	388
$n=0,7$	24,4	1670	142,3	373
$n=1,0$	24,3	2836	153,9	341

Čas potrebný na dosiahnutie vtokového ústia čelom taveniny je približne 1,9 s. Najväčšia diferenciacia teplôt vo vtokovom ústí je opäť medzi materiálom s $n = 0,2$ a $n = 0,1$ – približne 24 °C , čím sa opäť skráti vulkanizačný čas okolo 62 s.



Obr. 43 - Priebeh teploty po hrúbke vtokového ústia pri zmene P_3 ($T = 170 \text{ °C}$, $v = 15 \text{ mm/s}$)

Z Obr. XX je zrejmé, že množstvo disipovanej energie narastá s klesajúcim odklonom od newtonského chovania. Čím je hodnota indexu nenewtonského chovania väčšia, tým je vyššie šmykové napätie pri toku materiálu (Tab. 27).

Tab. 27 – Generované šmykové napätie vo vtokovom ústí ($T = 170 \text{ °C}$)

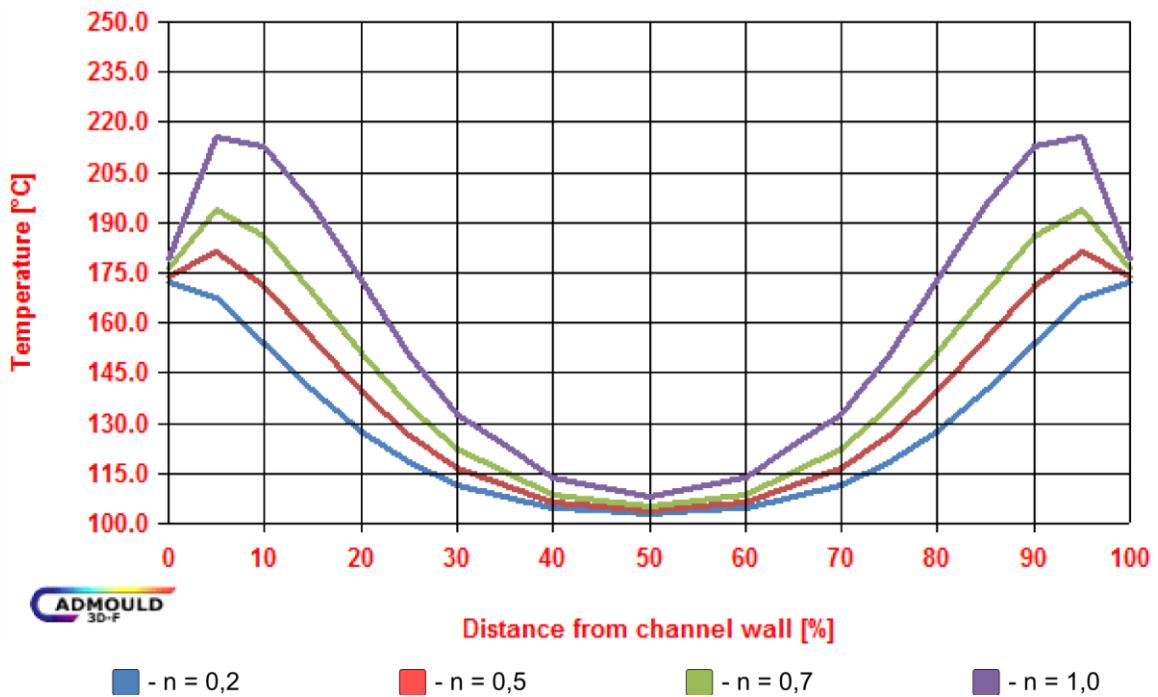
	$n = 0,2$	$n = 0,5$	$n = 0,7$	$n = 1,0$
τ [kPa]	661	1769	2957	5528

10.1.4 Rýchlosť piestu $v = 20$ mm/s

Tab. 28 – Výsledky zo simulácií pri rýchlosti (piestu) $v = 20$ mm/s, $T = 170$ °C

	Čas vstrekovania	Potrebný tlak	Teplota vo vtok.ústi	Vulkanizácia
	[s]	[bar]	[°C]	[s]
n=0,2	18,6	580	127,8	406
n=0,5	18,7	1260	135,8	390
n=0,7	18,7	1949	144,2	371
n=1,0	18,6	3340	158,9	333

Čelo taveniny dosiahne úroveň senzoru 4, vtokového ústia za približne 1,4 s. Znova najväčší rozdiel priemernej teploty vtokovom ústi je medzi materiálom s $n = 0,2$ a $n = 0,1$ a činí okolo 31 °C, ktoré urýchlia vulkanizáciu o asi 73 s.



Obr. 44 – Priebeh teploty po hrúbke vtokového ústia pri zmene P_3 ($T = 170$ °C, $v = 20$ mm/s)

Rovnaká tendencia ako v predchádzajúcich prípadoch, index newtonského chovania ovplyvňuje množstvo disipovaného tepla a tým pádom aj šmykové napätie (Tab 29.), teplotu, potrebný tlak na zaplnenie dutiny formy a čas vulkanizácie.

Tab. 29 – Generované šmykové napätie vo vtokovom ústi ($T = 170$ °C)

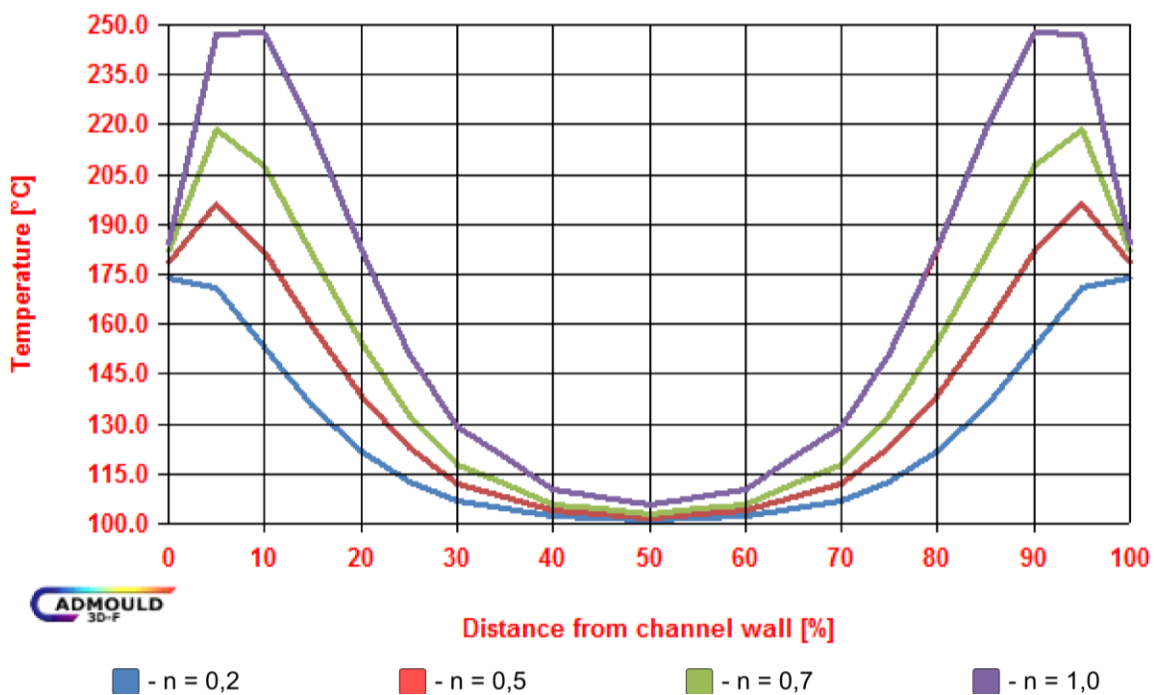
	n = 0,2	n = 0,5	n = 0,7	n = 1,0
τ [kPa]	695	1958	3386	6204

10.1.5 Rýchlosť piestu $v = 30$ mm/s

Tab. 30 – Výsledky zo simulácií pri rýchlosti (piestu) $v = 30$ mm/s, $T = 170$ °C

	Čas vstrekovania	Potrebný tlak	Teplota vo vtok.ústi	Vulkanizácia
	[s]	[bar]	[°C]	[s]
n=0,2	12,2	652	125,0	410
n=0,5	12,2	1537	137,2	388
n=0,7	12,2	2418	148,0	367
n=1,0	12,2	4228	167,0	322

Materiál zostáva v rozvodnom kanále pred vstupom do tvarovej dutiny budúceho výrobku približne 0,9 s. Najväčší rozdiel priemernej teploty vo vtokovom ústi je asi 42 °C, čím sa zníži vulkanizačný čas o skoro 90 s.



Obr. 45 – Priebeh teploty po hrúbke vtokového ústia pri zmene P_3 ($T = 170$ °C, $v = 30$ mm/s)

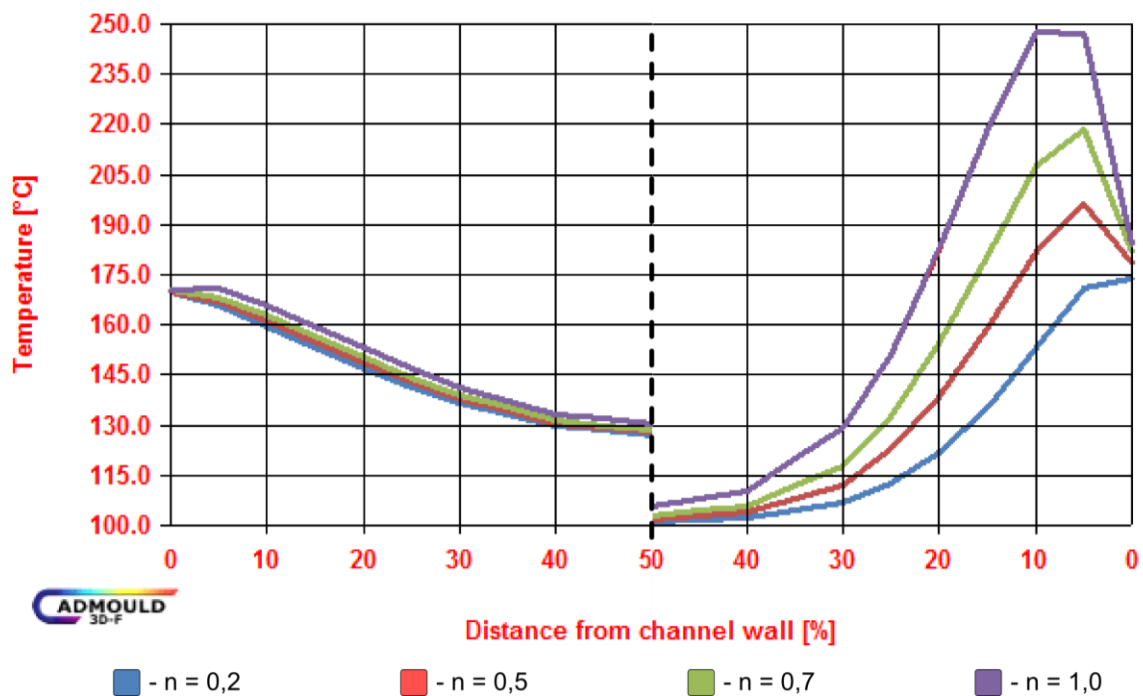
S narastajúcou rýchlosťou vstrekovania narastá taktiež podiel disipačnej energie. Najväčšie šmykové napätie (Tab. 31) je opäť pri materiáli s indexom newtonského chovania $n = 1,0$, pri ktorom je taktiež potrebný najväčší tlak na zaplnenie dutiny formy.

Tab. 31 – Generované šmykové napätie vo vtokovom ústi ($T = 170$ °C)

	n = 0,2	n = 0,5	n = 0,7	n = 1,0
τ [kPa]	758	2281	3952	6976

10.1.6 Diskusia výsledkov úlohy č. 1

Čím je odklon od neneutonského chovania väčší, tým narastá potrebný tlak na zaplnenie dutiny formy. S narastajúcim tlakom a stagnujúcim časom vstrekovania, podstupuje materiál väčšie šmykové namáhanie, čo má za následok nárast teploty a tým pádom aj skrátenie vulkanizačného času.



Obr. 46 – Porovnanie teplotných profilov pri $v = 5$ (vľavo) a $v = 30$ (vpravo)

Pokiaľ je materiál s výrazným odklonom od newtonského chovania, je výhodnejšie ho spracovať pri nižších rýchlostiach vstrekovania. V tomto prípade dominuje ohrev materiálu vplyvom prestupu tepla. Naopak ak materiál má mierny odklon od newtonského chovania, je výhodnejšie, aby bol vstrekaný pri vyšších rýchlostiach, kedy prevažuje ohrev zmesi pomocou disipácie – premeny mechanickej energie na tepelnú, avšak za cenu vysokého vstrekovacieho tlaku.

Tab. 32 – Tabuľka hodnôt vybraných indexov neneutonského chovania pri $v = (5, 30)$ mm/s

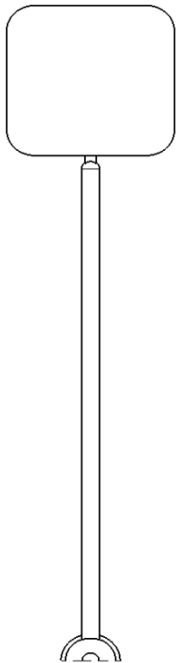
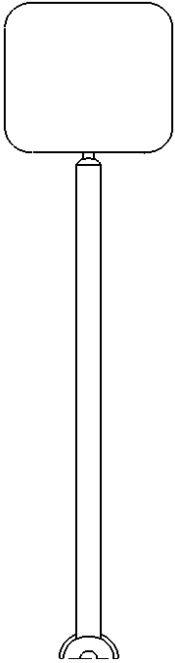
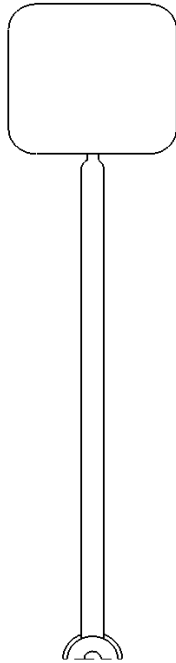
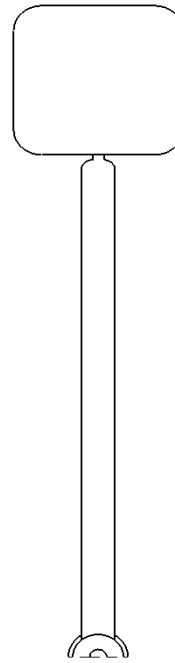
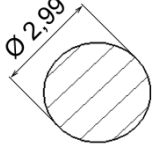

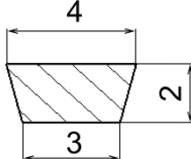
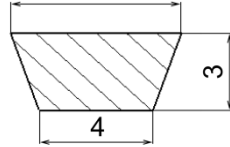
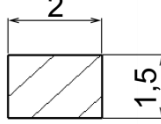
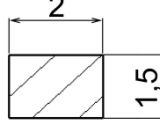
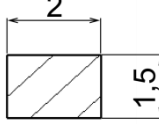
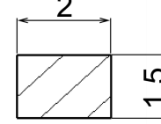
170 °C	vulkanizácia [s]			\bar{T} senzor 4 [°C]			vstrekovací tlak [bar]		
	v = 5	v = 30	Δ	v = 5	v = 30	Δ	v = 5	v = 30	Δ
n = 0,2	383	410	+27	144,5	125	-19,5	347	652	+305
n = 1,0	364	322	-42	149,5	167	+17,5	1065	4228	+3163

Diferencia (Δ) ukazuje zmenu vyhodnocovaného údaju pri $v = 30$ mm/s oproti $v = 5$ mm/s.

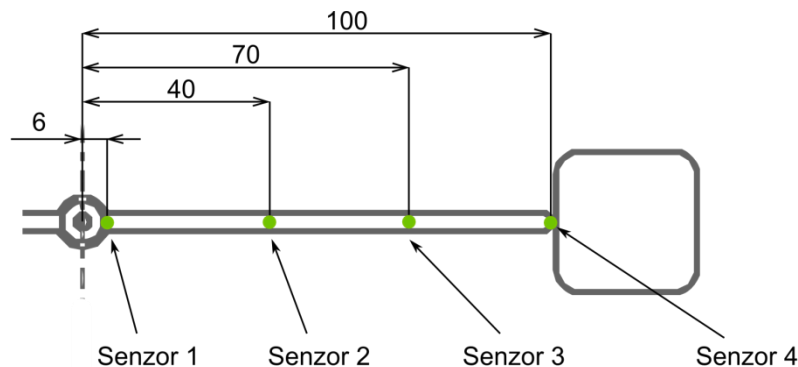
10.2 Úloha č. 2 – vplyv prierezu tokového kanálu

V druhej časti bol podrobený vplyv prierezu kanálu a tvare kanálu na samotný priebeh vulkanizácie. Štúdie boli realizované v simulačnej podobe. Tab. 33 znázorňuje geometriu skúmaných kanálov a uvádza označenie kanálov a teplôt.

Tab. 33 – Geometria vtokových kanálov

	A	B		C	D
Geometria vtokového kanálu					
Prierez					
Vtokové ústie					
Plocha	7 mm ²	15 mm ²		7 mm ²	15 mm ²
Teploty	155 °C	155 °C	1	155 °C	155 °C
	170 °C	170 °C	2	170 °C	170 °C
	185 °C	185 °C	3	185 °C	185 °C

Prierez vtokového ústia bol v každom prípade rovnaký. Modely boli obsadené štyrmi senzormi, ktoré slúžili na znázornenie vývinu teplotného pola (Obr. 47).



Obr. 47 – Umiestnenie senzorov na tokovom kanále

Menými faktormi v procesných podmienkach bola rýchlosť vstrekovania, ktorá je v analýzach vyjadrovaná pomocou prietokového množstva materiálu prechádzajúceho cez trysku, a teplota formy. Množstvo vstrekovanej materiálu sa mení v rozmedzí (0,7 – 38) cm^3/s a teplota formy je parameter menení v rozsahu (155 – 185) $^{\circ}\text{C}$. Zadefinované procesné podmienky sú zhrnuté v Tab. 34.

Tab. 34 – Procesné podmienky 2. úlohy

Veličiny	Jednotky	Varianta				
		I.	II.	III.	IV.	V.
Rýchlosť piestu stroja REP	[mm/s]	5	10	50	150	250
Prietokové množstvo	[cm^3/s]	0,7	1,5	7,6	22,8	38,0
Tlakom riadené plnenie pri	[%]	99				
Teplota taveniny	[$^{\circ}\text{C}$]	100				
Teplota formy	[$^{\circ}\text{C}$]	155; 170; 185				
Vulkanizácia vo forme	[s]	600				
Vulkanizácia mimo formu (T = 20 $^{\circ}\text{C}$)	[s]	200				

Materiál definovaný v analýzach prebral vlastnosti od reálneho materiálu poskytnutého firmou Continental Barum, ktorý bol meraný na prístroji RPA 2000 a vyhodnocovaný pomocou softwaru SimFit.

10.2.1 Teplota 155 °C

Teplota formy stanovená na 155 °C, vypočítaných 5 variant rýchlosti vstrekovania.

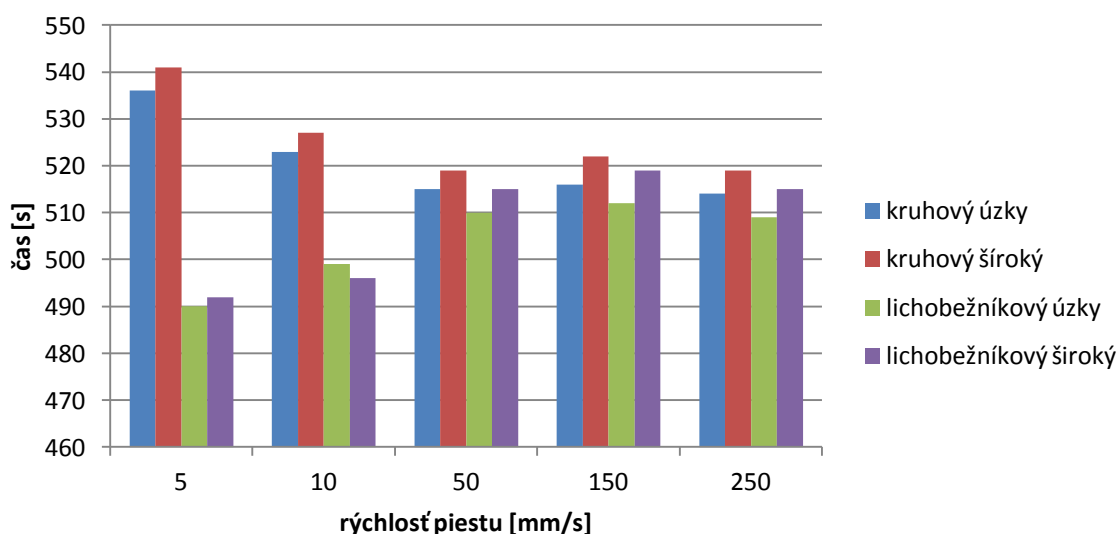
Tab. 35 – Čas vstrekovania pri 155 °C

T=155°C	VSTREKOVANIE [s]			
	úzký		široký	
v [mm/s]	kruhový	lichobež.	kruhový	lichobež.
5	79,7	79,9	81,8	82,0
10	37,2	37,3	38,2	38,3
50	7,3	7,4	7,5	7,5
150	2,5	2,5	2,5	2,5
250	1,5	1,5	1,5	1,5

Tab. 36 – Čas potrebný na vytvorenie 90% priečných väzieb

T=170°C	VSTREKOVANIE + VULKANIZÁCIA [s]			
	úzký		široký	
v [mm/s]	kruhový	lichobež.	kruhový	lichobež.
5	536	490	541	492
10	523	499	527	496
50	515	510	519	515
150	516	512	522	519
250	514	509	519	515

Čas vstrekovania + vulkanizácie (90% priečných väzieb)



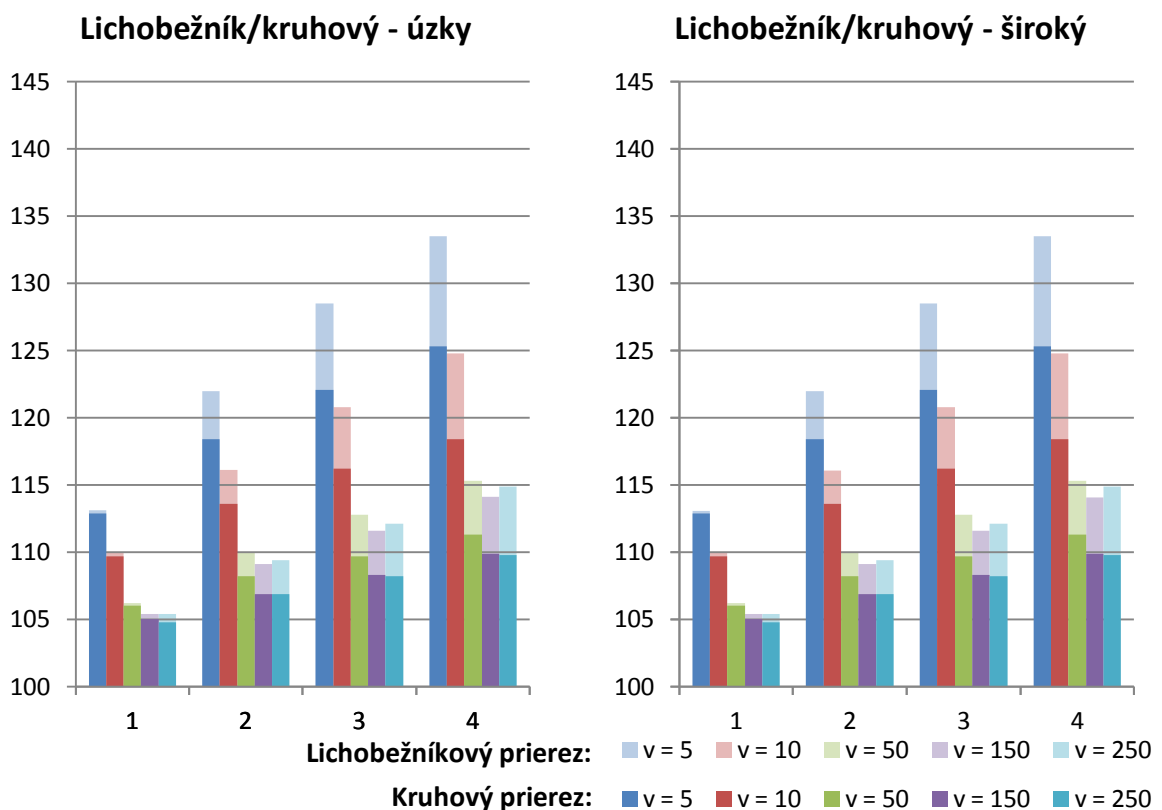
Obr. 48 – Graf závislosti prierezu tokového kanálu na čase vulkanizácie (155 °C)

Tab. 37 – Vývin teplotného poľa vo vtokovom systéme (úzke prierezy – 155 °C)

155 °C		KRUHOVÝ - ÚZKY				155 °C		LICHOBĚŽNÍKOVÝ - ÚZKY			
v [mm/s]	Číslo senzoru				v [mm/s]	Číslo senzoru					
	1.	2.	3.	4.		1.	2.	3.	4.		
5	113,2	119,2	122,8	125,8	5	113,1	121,9	129,6	134,2		
10	110,0	114,4	116,9	119,1	10	110,0	116,6	122,2	126		
50	106,4	109,2	111,0	112,5	50	106,9	111,4	114,9	117,9		
150	105,6	108,5	110,4	112,0	150	105,7	111,8	115,3	119,1		
250	105,6	108,7	110,9	112,8	250	105,8	112,9	116,8	121,5		

Tab. 38 – Vývin teplotného poľa vo vtokovom systéme (široké prierezy – 155 °C)

155 °C		KRUHOVÝ - ŠIROKÝ				155 °C		LICHOBĚŽNÍKOVÝ - ŠIROKÝ			
v [mm/s]	Číslo senzoru				v [mm/s]	Číslo senzoru					
	1.	2.	3.	4.		1.	2.	3.	4.		
5	112,9	118,4	122,1	125,3	5	113,1	122,0	128,5	133,5		
10	109,7	113,6	116,2	118,4	10	110,0	116,1	120,8	124,8		
50	106,0	108,2	109,7	111,3	50	106,2	110,0	112,8	115,3		
150	105,0	106,9	108,3	109,9	150	105,4	109,1	111,6	114,1		
250	104,8	106,9	108,2	109,8	250	105,4	109,4	112,1	114,9		



Obr. 49 – Porovnanie teploty v jednotlivých senzoroch pri úzkom a širokom priereze (155 °C)

10.2.2 Teplota 170 °C

Podmienky ako v predchádzajúcom prípade, došlo k zvýšeniu teploty formy na 170 °C.

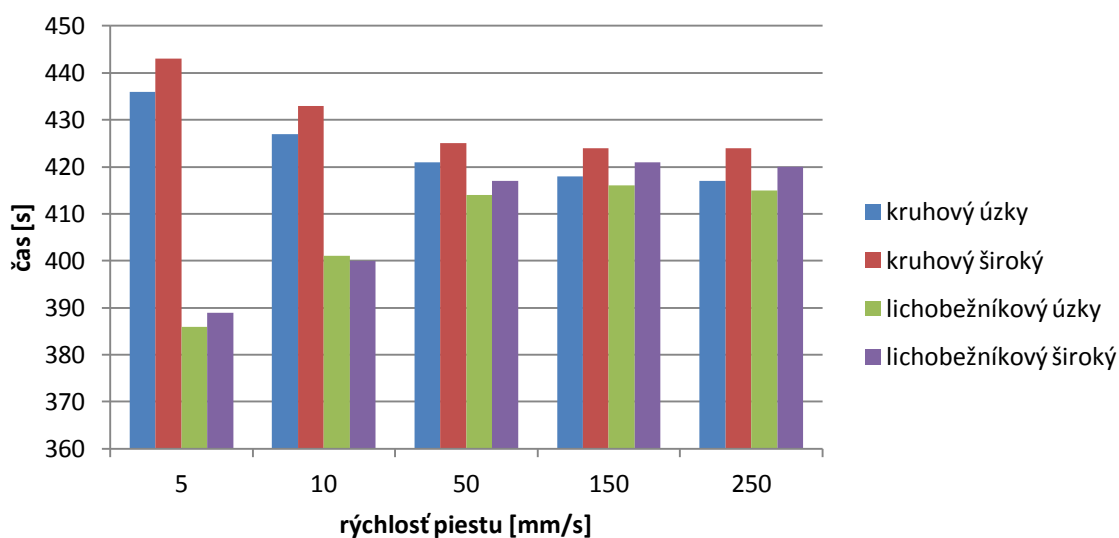
Tab. 39 – Čas vstrekovania pri 170 °C

T=170°C	VSTREKOVANIE [s]			
	úzky		široký	
v [mm/s]	kruhový	lichobež.	kruhový	lichobež.
5	79,7	79,9	81,9	82,0
10	37,2	37,3	38,2	38,3
50	7,3	7,3	7,5	7,6
150	2,5	2,5	2,5	2,5
250	1,5	1,5	1,5	1,5

Tab. 40 – Čas potrebný na vytvorenie 90% priečných väzieb

T=170°C	VSTREKOVANIE + VULKANIZÁCIA [s]			
	úzky		široký	
v [mm/s]	kruhový	lichobež.	kruhový	lichobež.
5	436	386	443	389
10	427	401	433	400
50	421	414	425	417
150	418	416	424	421
250	417	415	424	420

Čas vstrekovania a vulkanizácie (90% priečných väzieb)



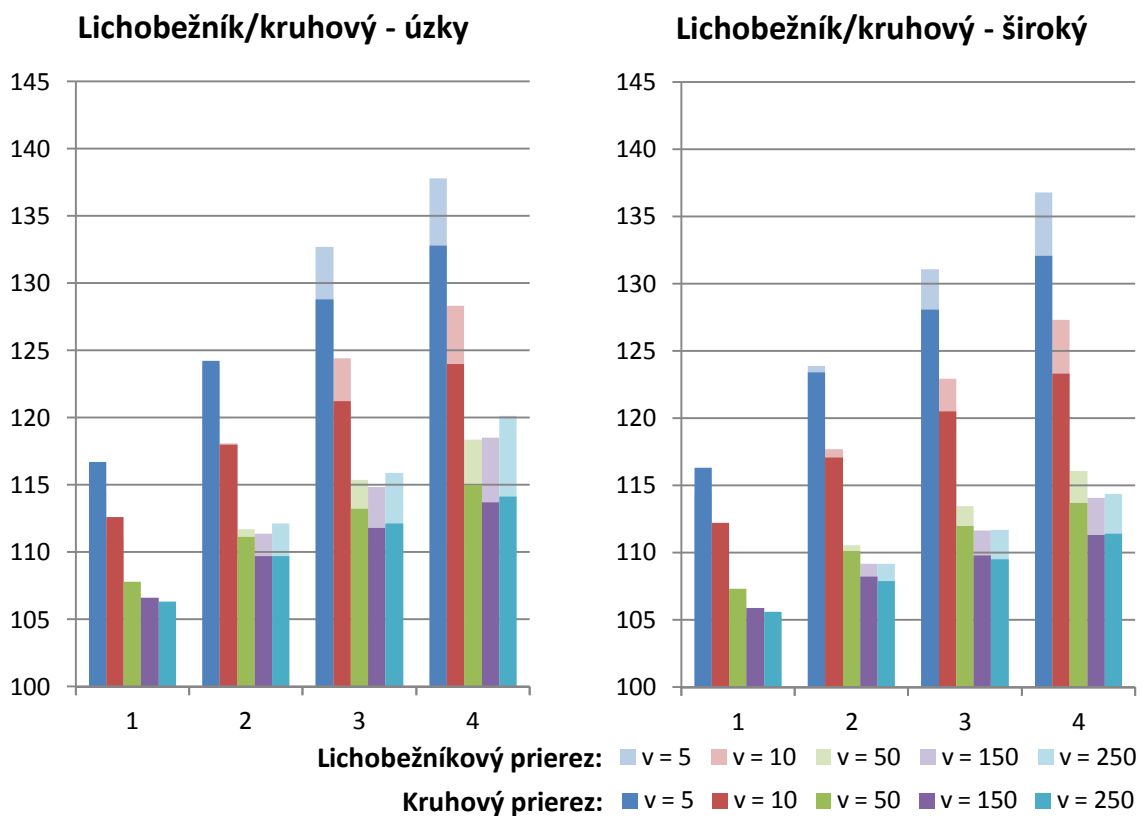
Obr. 50 – Graf závislosti prierezu tokového kanálu na čase vulkanizácie (170 °C)

Tab. 41 – Vývin teplotného poľa vo vtokovom systéme (úzke prierezy – 170 °C)

170 °C	KRUHOVÝ - ÚZKY				170 °C	LICHOBĚŽNÍKOVÝ - ÚZKY			
v	Číslo senzoru				v	Číslo senzoru			
[mm/s]	1.	2.	3.	4.	[mm/s]	1.	2.	3.	4.
5	116,7	124,2	128,8	132,8	5	116,6	127,3	137,4	143,2
10	112,6	118,0	121,2	124,0	10	112,5	120,7	127,9	132,4
50	107,8	111,1	113,2	115,0	50	107,8	113,4	117,6	121,0
150	106,6	109,7	111,8	113,7	150	106,6	113,0	117,0	121,2
250	106,3	109,7	112,1	114,1	250	106,5	113,9	118,2	123,0

Tab. 42 – Vývin teplotného poľa vo vtokovom systéme (široké prierezy – 170 °C)

170 °C	KRUHOVÝ - ŠIROKÝ				170 °C	LICHOBĚŽNÍKOVÝ - ŠIROKÝ			
v	Číslo senzoru				v	Číslo senzoru			
[mm/s]	1.	2.	3.	4.	[mm/s]	1.	2.	3.	4.
5	116,3	123,4	128,1	132,1	5	116,6	127,3	135,5	142,0
10	112,2	117,1	120,5	123,3	10	112,4	120,2	126,2	131,2
50	107,3	110,1	112,0	113,7	50	107,6	112,1	115,4	118,4
150	105,9	108,2	109,8	111,3	150	106,3	110,5	113,3	116,1
250	105,6	107,9	109,5	111,4	250	106,1	110,5	113,4	116,4



Obr. 51 – Porovnanie teploty v jednotlivých senzoch pri úzkom a širokom priereze (170 °C)

10.2.3 Teplota 185 °C

Nastavená teplota steny formy na 185 °C.

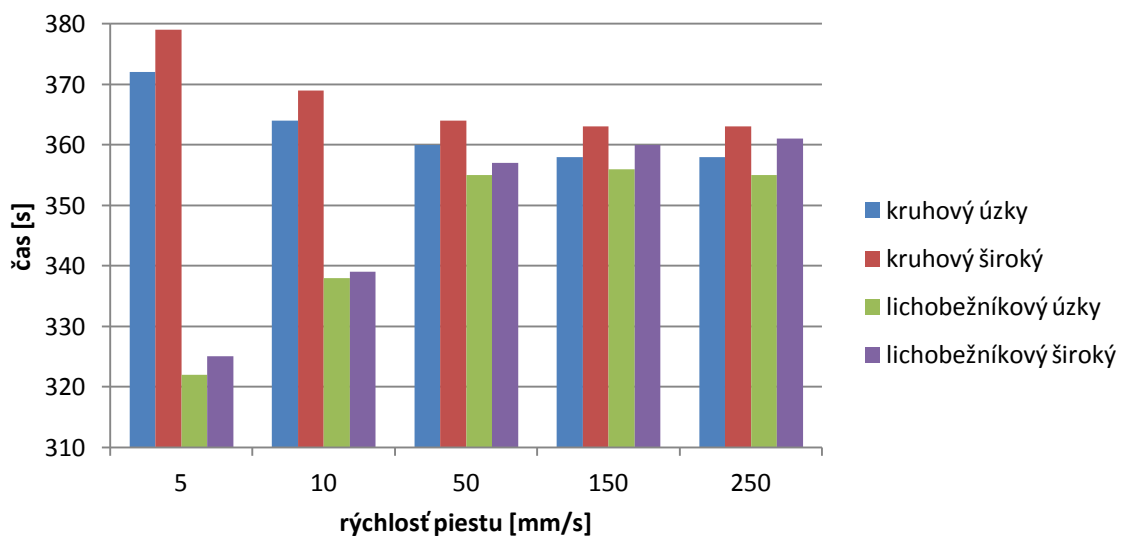
Tab. 43 – Čas vstrekovania pri 185 °C

T=185°C	VSTREKOVANIE [s]			
	úzky		široký	
v [mm/s]	kruhový	lichobež.	kruhový	lichobež.
5	79,7	79,9	81,7	82,0
10	37,2	37,3	38,2	38,3
50	7,4	7,4	7,5	7,5
150	2,5	2,5	2,5	2,5
250	1,5	1,5	1,5	1,5

Tab. 44 – Čas potrebný na vytvorenie 90 % priečných väzieb

T=185°C	VSTREKOVANIE + VULKANIZÁCIA [s]			
	úzky		široký	
v [mm/s]	kruhový	lichobež.	kruhový	lichobež.
5	372	322	379	325
10	364	338	369	339
50	360	355	364	357
150	358	356	363	360
250	358	355	363	361

čas vstrekovania a vulkanizácie (90% priečných väzieb)



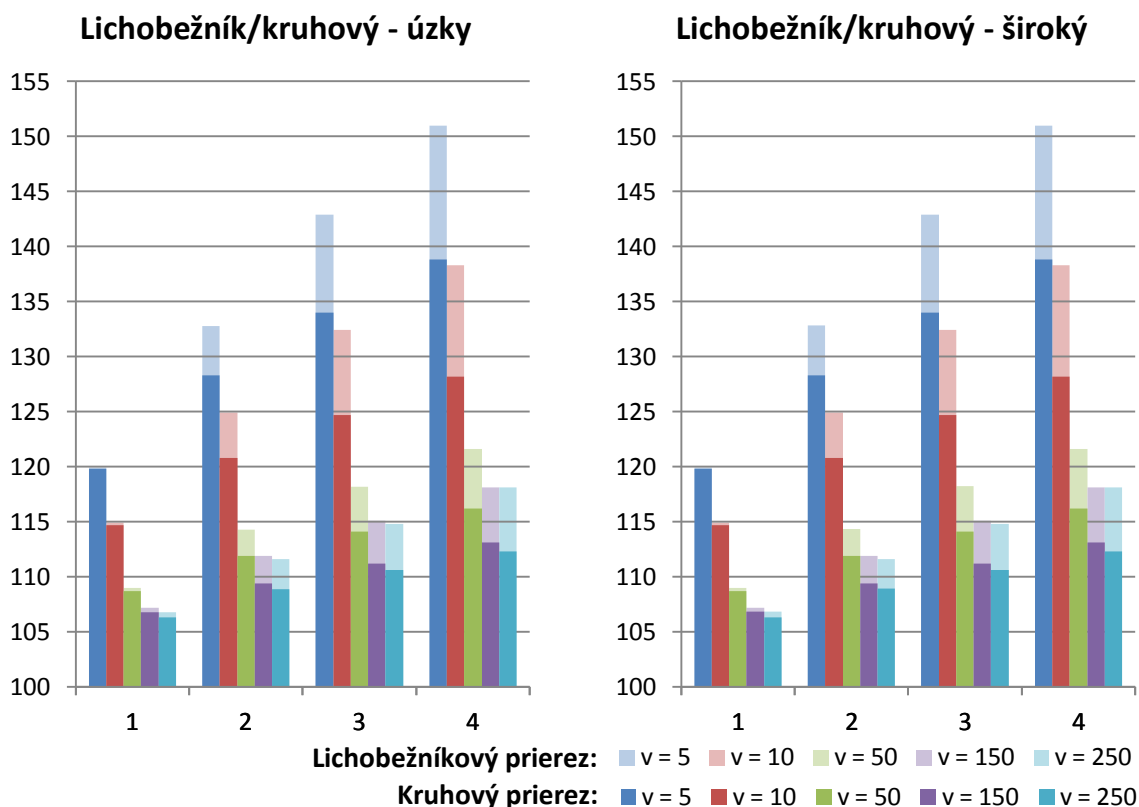
Obr. 52 - Graf závislosti prierezu tokového kanálu na čase vulkanizácie (185 °C)

Tab. 45 – Vývin teplotného poľa vo vtokovom systéme (úzke prierezy – 185 °C)

185 °C	KRUHOVÝ - ÚZKY				185 °C	LICHOBĚŽNÍKOVÝ - ÚZKY			
v	Číslo senzoru				v	Číslo senzoru			
[mm/s]	1.	2.	3.	4.	[mm/s]	1.	2.	3.	4.
5	120,3	129,3	134,9	139,6	5	120	132,9	145	152,1
10	115,2	121,7	125,5	128,9	10	115,1	124,9	133,4	138,8
50	109,2	113,0	115,4	117,4	50	109,2	115,4	120,3	124,2
150	107,5	111,0	113,2	115,2	150	107,5	114,3	118,7	123,1
250	107,1	110,8	113,2	115,4	250	107,2	115,0	119,6	124,5

Tab. 46 – Vývin teplotného poľa vo vtokovom systéme (široké prierezy – 185 °C)

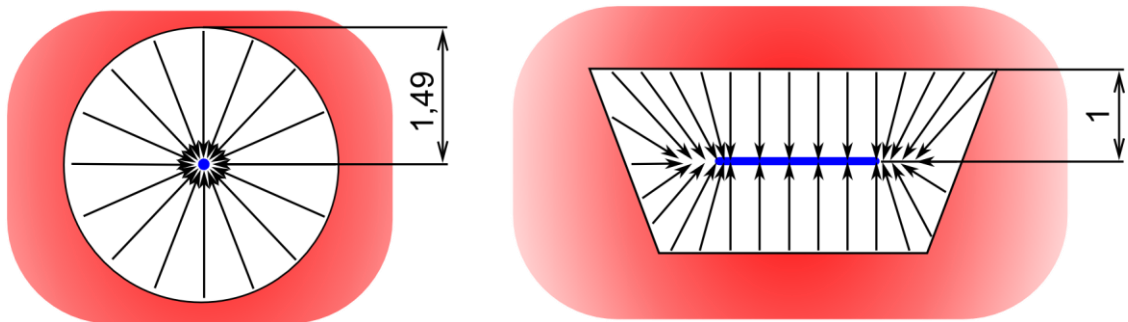
185 °C	KRUHOVÝ - ŠIROKÝ				185 °C	LICHOBĚŽNÍKOVÝ - ŠIROKÝ			
v	Číslo senzoru				v	Číslo senzoru			
[mm/s]	1.	2.	3.	4.	[mm/s]	1.	2.	3.	4.
5	119,8	128,3	134	138,8	5	119,9	132,8	142,9	151,0
10	114,7	120,8	124,7	128,2	10	114,9	124,9	132,4	138,3
50	108,7	111,9	114,1	116,2	50	109,0	114,3	118,2	121,6
150	106,8	109,4	111,2	113,1	150	107,2	111,9	115,1	118,1
250	106,3	108,9	110,6	112,3	250	106,8	111,6	114,8	118,1



Obr. 53 – Porovnanie teploty v jednotlivých senzoch pri úzkom a širokom priereze (185 °C)

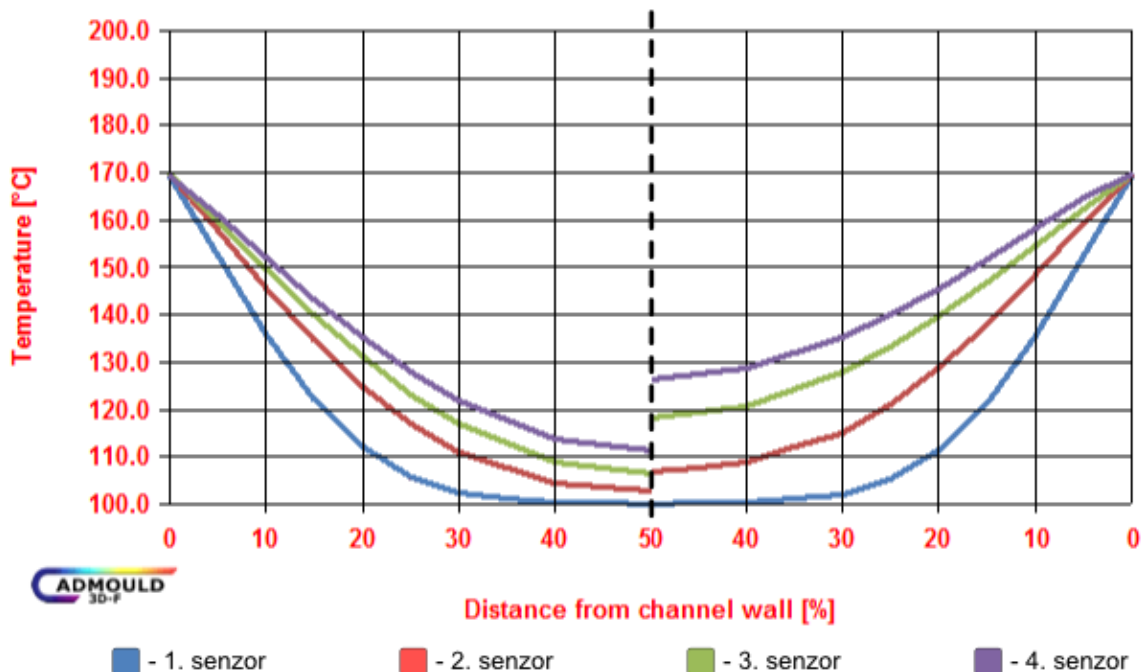
10.2.4 Diskusia výsledkov úlohy č. 2

Pri lichobežníkových tokových kanáloch je zjavný vyšší teplotný nárast z dôvodu väčšej kontaktnej plochy materiálu s dutinou formy pri zachovaní rovnakého prierezu 15 mm^2 . Zatiaľ čo pri lichobežníkovom priereze je obvod kanálu približne $11,12 \text{ mm}$, pri kruhovom priereze kanálu je obvod len cca $9,36 \text{ mm}$. Druhým dôvodom je fakt, že najvzdialenejšia časť lichobežníkového tokového kanálu je od vytemperovanej dutiny formy vzdialená maximálne 1 mm , pri kruhovom priereze je to $1,49 \text{ mm}$.



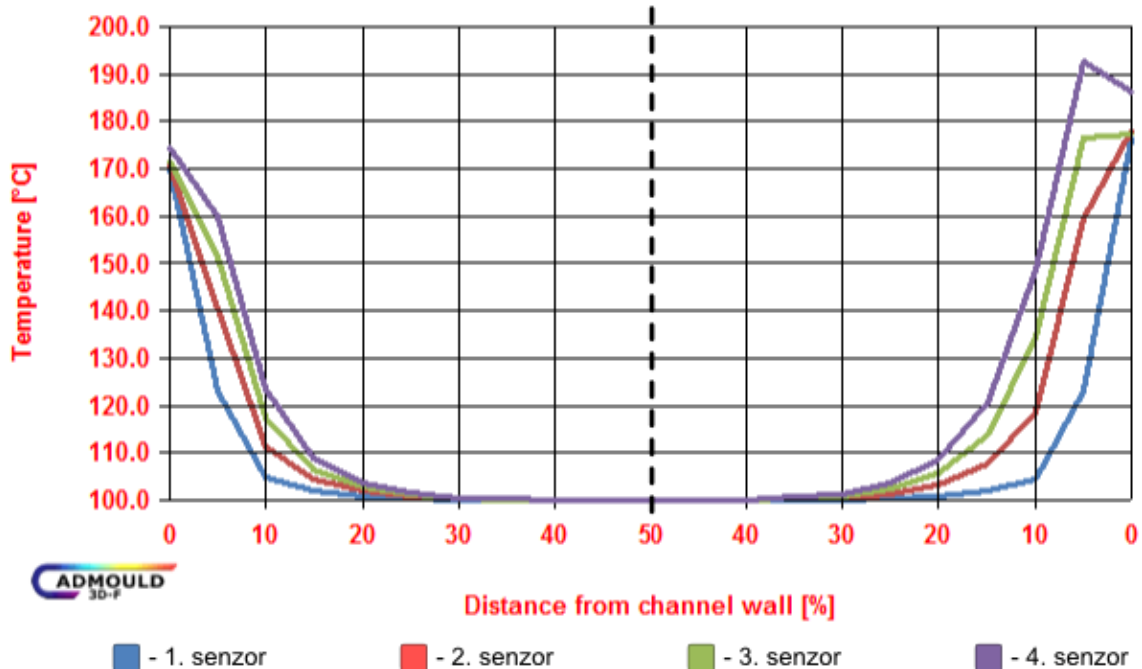
Obr. 54 – Najvzdialenejší bod tokových kanálov

Najväčšiu diferenciu teplôt medzi kruhovým a lichobežníkovým prierezom je možné pozorovať pri pomalých rýchlostiach, kedy je materiálu poskytnutý dostatok času na zvýšenie teploty vo vtokovom systéme a do dutiny formy (senzor 4) vstupuje prehriaty.



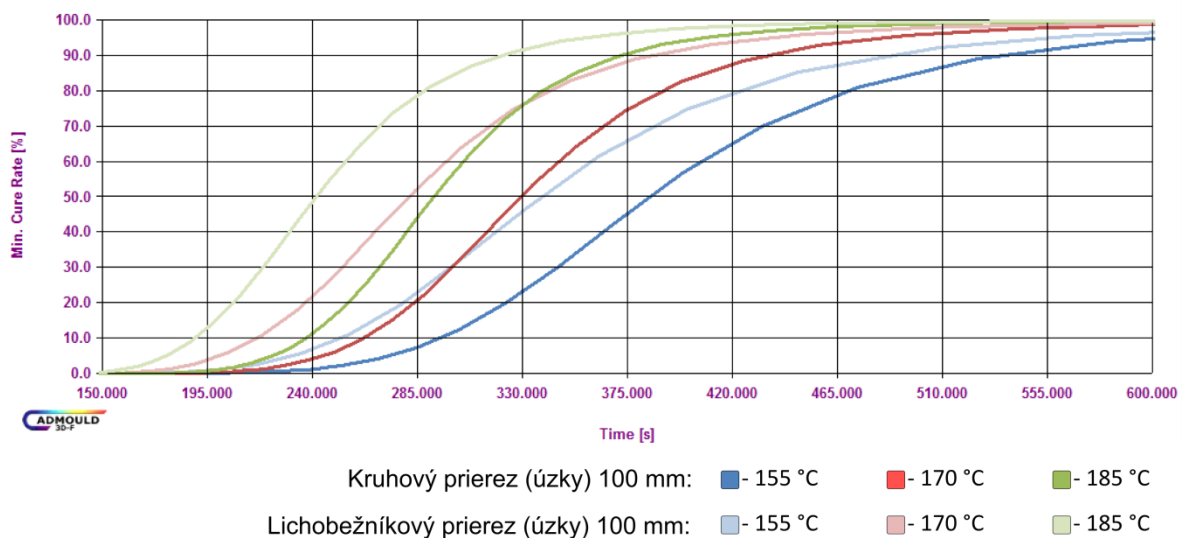
Obr. 55 – Vývin teploty pri kruhovom (vľavo) a lichobežníkovom (vpravo) kanáli ($170 \text{ }^\circ\text{C}$, $v = 5$)

Podobnú tendenciu je možné vidieť taktiež pri zvyšných dvoch teplotách. Zmena nastáva až pri vyšších rýchlostiach vstrekovania, kde sa začína prejavovať mierny vplyv premeny disipačnej energie na energiu tepelnú.



Obr. 56 - Vývin teploty pri kruhovom (vľavo) a lichobežníkovom (vpravo) kanáli (170 °C, $v = 250$)

Vzhľadom k potrebnému času na vytvorenie 90 % priečných väzieb je možné usúdiť podľa Obr. 57, že ako výhodnejšia varianta sa javí vstrekovanie materiálu pri vyšších teplotách formy a nižších rýchlostiach piestu, kedy materiál získava teplo prevažne od steny formy vplyvom dlhšieho toku cez rozvodný systém pri malej intenzite šmykového toku.

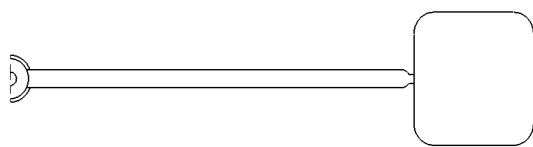
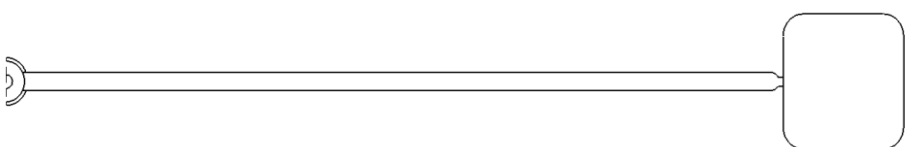
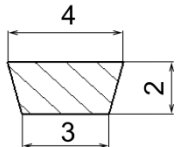
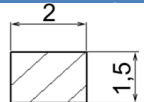


Obr. 57 – Grafické porovnanie času vulkanizácie pri rýchlosti $v = 5$ mm/s

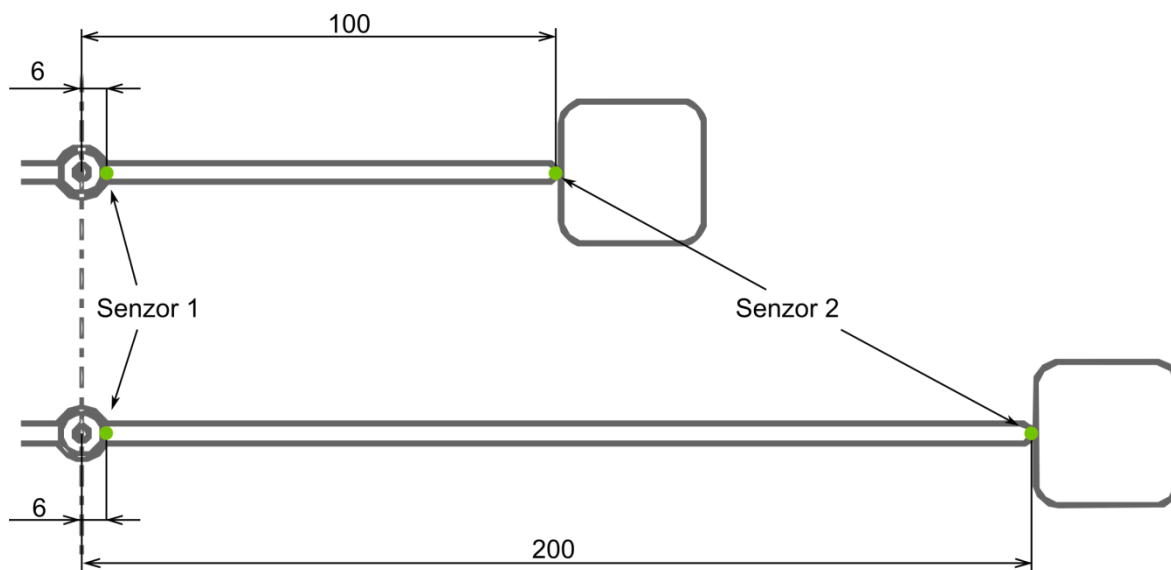
10.3 Úloha č. 3 – vplyv dĺžky tokového kanálu

Tretia úloha počítačových analýz simuluje tok materiálu cez lichobežníkový rovnodný kanál o dĺžke 100 mm a 200 mm. Táto časť diplomovej práce si kladie za cieľ zistenie závislosti dĺžky tokového kanálu na čase vulkanizácie. Z praktického hľadiska je upozornením, že v prípade viacnásobných foriem a vstrekovania hrubostenných výrobkov je použitie rôzne dlhých rozvodných kanálov, rovnakého prierezu, premietnuté taktiež do koncových vlastností vulkanizátu. Vyhodnocovanými veličinami sú teplota v rozvodnom systéme a priebeh vulkanizácie.

Tab. 47 – Geometria tokových kanálov

Trajektória kanálu		
Geometria 100 mm	A	
Geometria 200 mm	B	
Prierez kanálu		
Vtokové ústie		
Rýchlosť [mm/s]		5; 10; 50; 150; 250
Teplota [°C]	1	155 °C
	2	170 °C
	3	185 °C

Geometria tokového kanálu bola osadená dvomi senzormi. Na rozvodnom kanáli, pri vstupe z vtokového kužela a vo vtokovom ústí, ktoré bolo vzdialené od osi kužela v prvom prípade 100 mm a v druhom 200 mm (Obr. 58).



Obr. 58 – Umiestnenie senzorov na tokovom kanále

Z procesných podmienok boli menenými parametrami rýchlosť vstrekovania v rozmedzí (0,7 – 38) cm^3/s a teplota formy v rozmedzí (155 – 185) $^{\circ}\text{C}$. Bližšie nastavené parametre v analýze popisuje Tab. 48.

Tab. 48 – Procesné podmienky 3. úlohy

Veličiny	Jednotky	Varianta				
		I.	II.	III.	IV.	V.
Rýchlosť piestu stroja REP	[mm/s]	5	10	50	150	250
Prietokové množstvo	[cm^3/s]	0,7	1,5	7,6	22,8	38,0
Tlakom riadené plnenie pri	[%]	99				
Teplota taveniny	[$^{\circ}\text{C}$]	100				
Teplota formy	[$^{\circ}\text{C}$]	155; 170; 185				
Vulkanizácia vo forme	[s]	600				
Vulkanizácia mimo formu (T = 20 $^{\circ}\text{C}$)	[s]	200				

Pre simulácie bol opäť zvolený reálny materiál, ktorého reologické a vulkanizačné charakteristiky sú popísané v predchádzajúcej kapitole číslo 9.

10.3.1 Teplota 155 °C

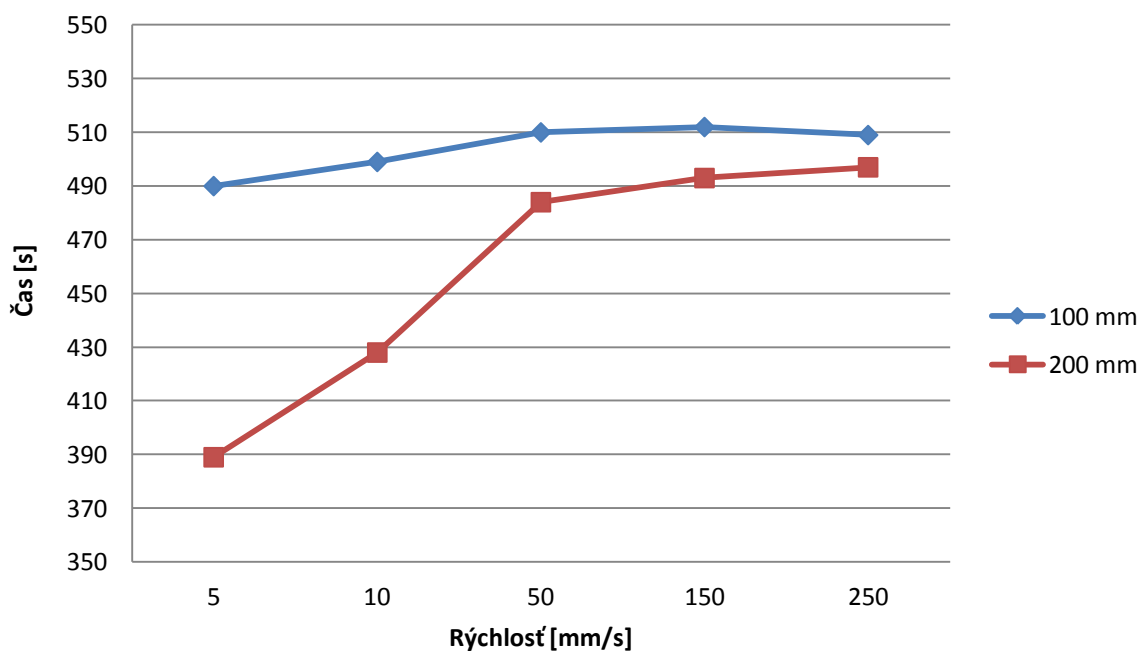
Tab. 49 – Čas vstrekovania a vulkanizácie (pri 155 °C)

T=170°C	VSTREKOVANIE [s]		VULKANIZÁCIA [s]		Kratší čas pri 200 mm (oproti 100 mm)
	úzky		úzky		
	100 mm	200 mm	100 mm	200 mm	
5	79,9	82,2	490	389	- 101
10	37,3	38,4	499	428	- 71
50	7,4	7,6	510	484	- 26
150	2,5	2,5	512	493	- 19
250	1,5	1,5	509	497	- 12

Tab. 50 – Teplota v senzorech pri 100 mm a 200 mm kanále (pri 155°C)

T=170°C	T – senzor 1 [°C]		T – senzor 2 [°C]		Rozdiel teplôt v senzore 2 (100, 200 mm)
	úzky		úzky		
	100 mm	200 mm	100 mm	200 mm	
5	113,1	114,1	134,2	147,3	+ 13,1
10	110,0	110,4	126,0	138,5	+ 12,5
50	106,9	106,2	117,9	128,2	+ 10,3
150	105,7	105,7	119,1	130,4	+ 11,3
250	105,8	105,8	121,5	132,8	+ 11,3

Čas vstrekovania a vulkanizácie (90 % priečných väzieb)

Obr. 59 – Graf závislosti času vulkanizácie na rýchlosti vstrekovania ($T = 155 \text{ °C}$)

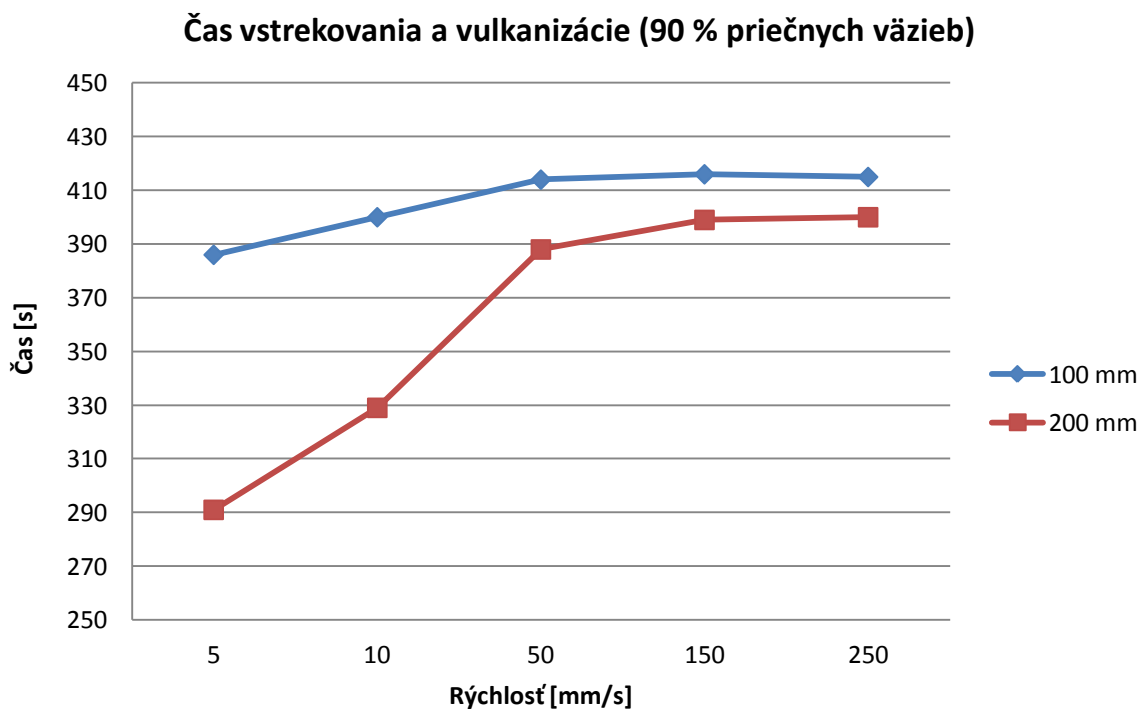
10.3.2 Teplota 170 °C

Tab. 51 - Čas vstrekovania a vulkanizácie (pri 170 °C)

T=170°C	VSTREKOVANIE [s]		VULKANIZÁCIA [s]		Kratší čas pri 200 mm (oproti 100 mm)
	úzky		úzky		
	100 mm	200 mm	100 mm	200 mm	
5	79,9	82,1	386	291	- 95
10	37,3	38,4	400	329	- 71
50	7,4	7,6	414	388	- 26
150	2,5	2,5	416	399	- 17
250	1,5	1,5	415	400	- 15

Tab. 52 – Teplota v senzorech pri 100 mm a 200 mm kanále (pri 170°C)

T=170°C	T – senzor 1 [°C]		T – senzor 2 [°C]		Rozdiel teplôt v senzore 2 (100, 200 mm)
	úzky		úzky		
	100 mm	200 mm	100 mm	200 mm	
5	116,7	117,8	143,3	159,2	+ 15,9
10	112,5	113,0	132,4	147,3	+ 14,9
50	107,8	107,4	121,0	131,6	+ 10,6
150	106,6	106,3	121,1	131,5	+ 10,4
250	106,5	106,1	123	133,4	+ 10,4

Obr. 60 – Graf závislosti času vulkanizácie na rýchlosti vstrekovania ($T = 170\text{ }^{\circ}\text{C}$)

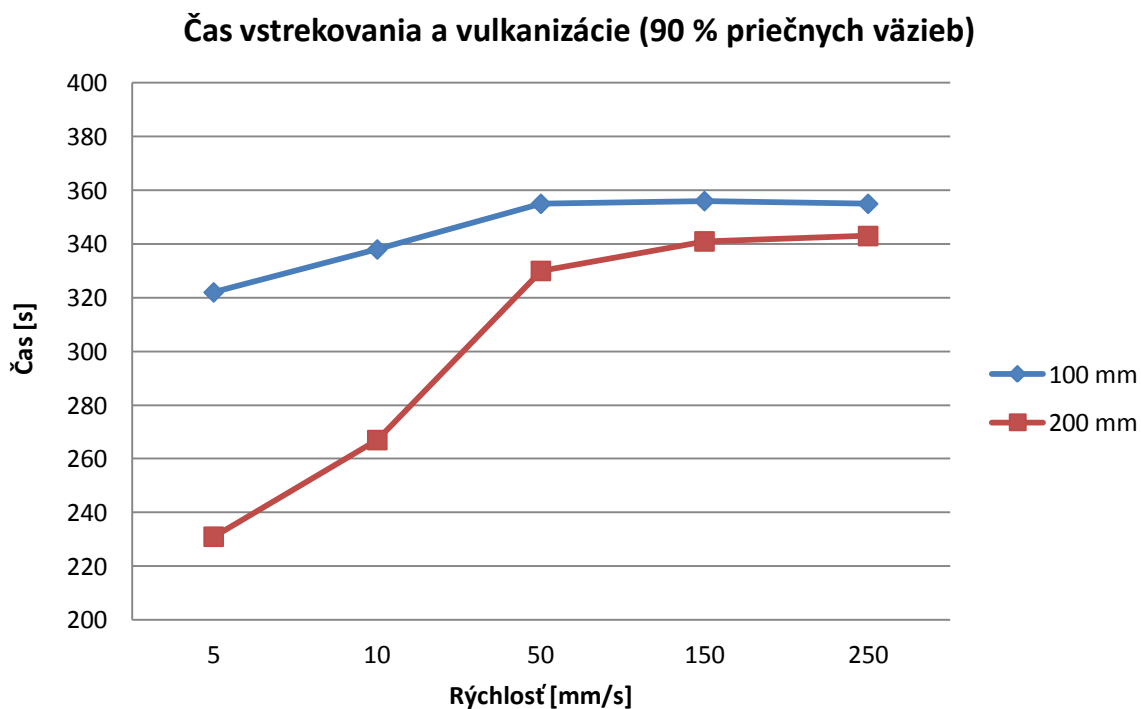
10.3.3 Teplota 185 °C

Tab. 53 - Čas vstrekovania a vulkanizácie (pri 185 °C)

T=170°C	VSTREKOVANIE [s]		VULKANIZÁCIA [s]		Kratší čas pri 200 mm (oproti 100 mm)
	úzky		úzky		
	100 mm	200 mm	100 mm	200 mm	
5	79,9	82,2	322	231	- 91
10	37,3	38,4	338	267	- 71
50	7,4	7,6	355	330	- 25
150	2,5	2,5	356	341	- 15
250	1,5	1,5	355	343	- 12

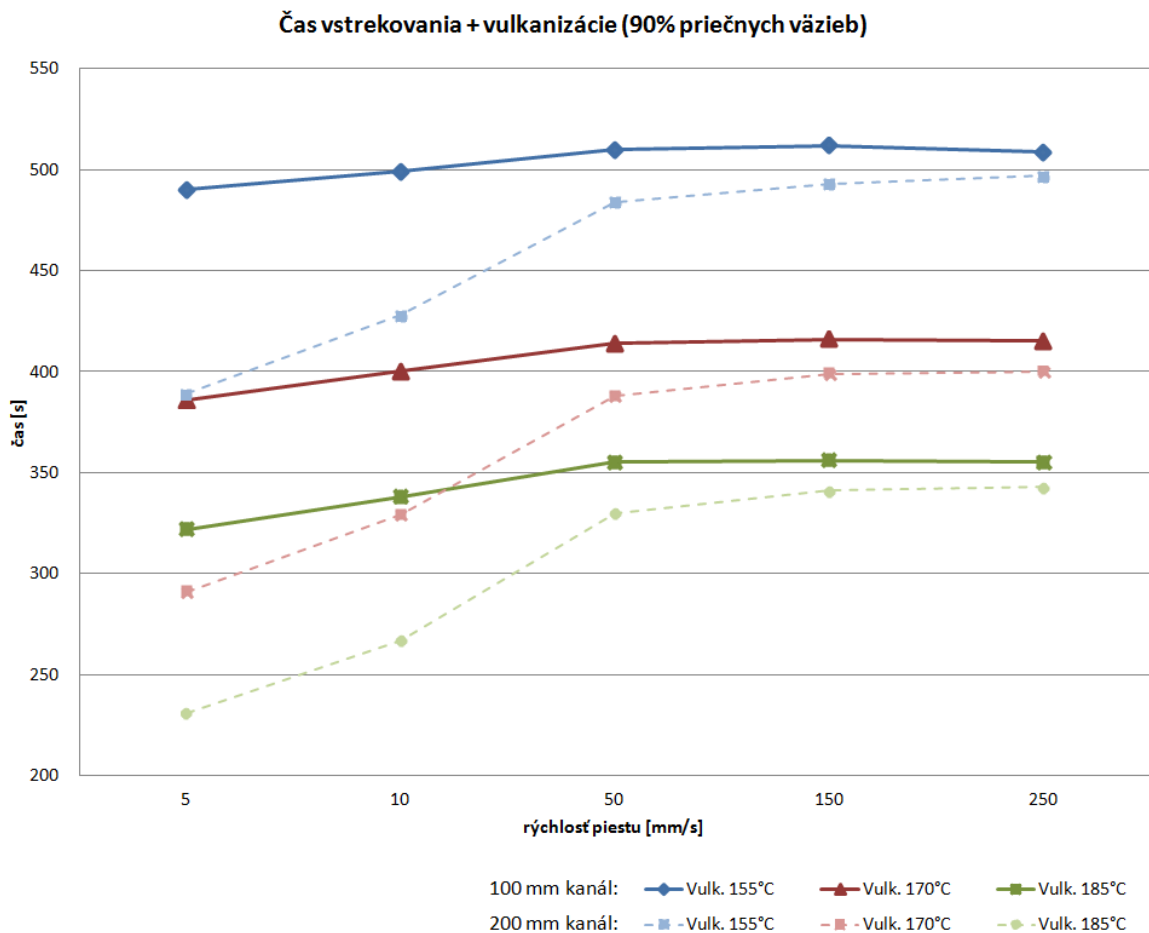
Tab. 54 – Teplota v senzorech pri 100 mm a 200 mm kanále (pri 185°C)

T=170°C	T – senzor 1 [°C]		T – senzor 2 [°C]		Rozdiel teplôt v senzore 2 (100, 200 mm)
	úzky		úzky		
	100 mm	200 mm	100 mm	200 mm	
5	120,0	120,7	152,1	171,1	+ 19,0
10	115,1	115,3	138,8	155,8	+ 17,0
50	109,2	108,5	124,2	135,1	+ 10,9
150	107,5	106,8	123,1	133,2	+ 10,1
250	107,2	106,4	124,5	134,7	+ 10,2

Obr. 61 – Graf závislosti času vulkanizácie na rýchlosti vstrekovania ($T = 185\text{ °C}$)

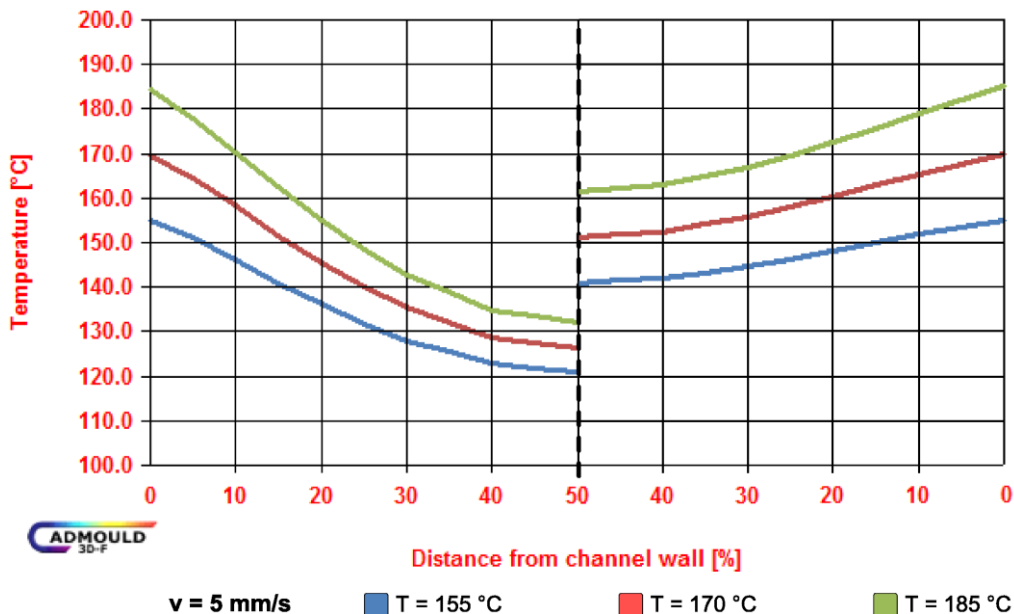
10.3.4 Diskusia výsledkov úlohy č. 3

Čas vulkanizácie za použitia pomalých rýchlostí vstrekovania rapídne klesá pri toku materiálu cez dlhý, 200 mm kanál, zatiaľ čo pri krátkom kanále pokles vulkanizačného času nie je tak enormný. S narastajúcou rýchlosťou vstrekovania sa čas vulkanizácie vyrovnáva, stráca sa vplyv dlhého kanálu na ohrev materiálu.



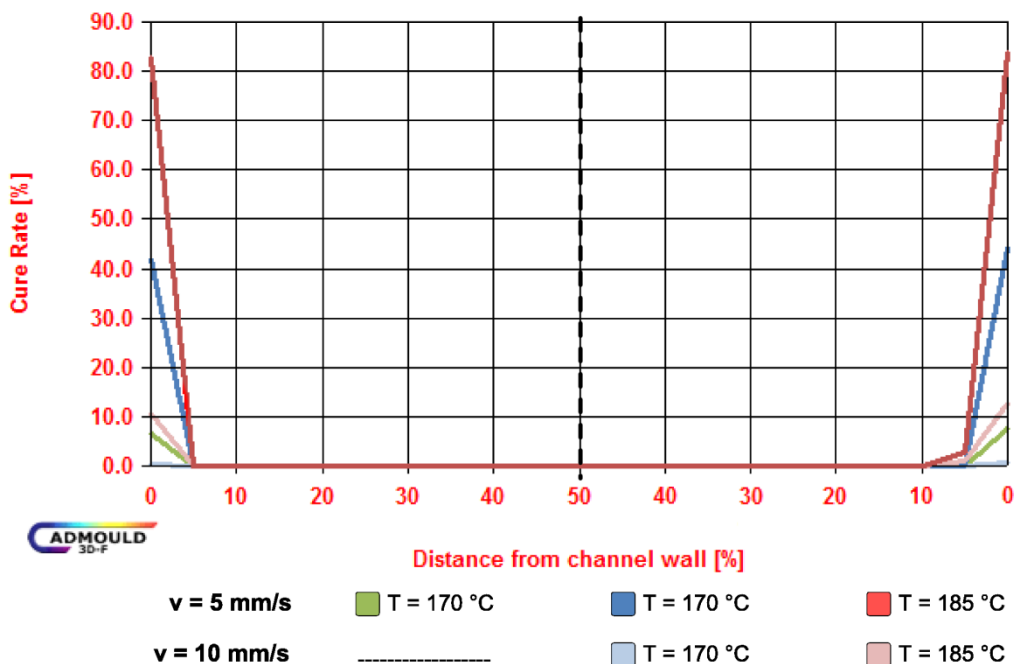
Obr. 62 – Porovnanie vulkanizačného času

Za použitia nízkych rýchlostí vstrekovania je zníženie potrebného vulkanizačného času pri 200 mm kanále spôsobené zvýšením teploty o cca (13 – 16) °C oproti 100 mm kanálu. Zvýšenie teploty je spôsobené dlhším zotrvaním vo vtokovom systéme, čo vedie k poskytnutiu dlhšieho času na prenos tepla medzi materiálom a stenou formy. Podobná situácia, no nie tak výrazná, nastáva aj pri vyšších rýchlostiach. Materiálový parameter P_3 je 0,728 z čoho vyplýva, že index nenewtonského chovania je $n = 0,272$. Z tohto dôvodu nie je pri vyšších rýchlostiach vstrekovania tak výrazne prejavovaný vplyv disipácie, ale teplo je materiálu dodávané prevažne prenosom.



Obr. 63 – Teplotné pole vo vtokovom ústi pri 100 mm (vľavo) a 200 mm (vpravo)

Pri použití vysokej teploty a nízkych vstrekovacích rýchlostiach môže dôjsť k predčasnej vulkanizácii materiálu vplyvom dlhého zotrvania v tokovom systéme. Kaučuková zmes by preto mala disponovať dostatočne širokou bezpečnosťou zmesi, ktorá predčasnej vulkanizácii zabráni. Na Obr. 64 je vidieť, že pri dlhom kanále, nižších rýchlostiach a vysokej teplote dochádza k navulkanizovaniu povrchových vrstiev (pozorovaným miestom je vtokové ústie), čo môže viesť k vzniku chýb na výrobku.



Obr. 64 – Vulkanizácia vo vtokovom ústi pri 100 mm (vľavo) a 200 mm (vpravo)

11 VYHOTOVENIE SKÚŠOBNÝCH VZORIEK

Skúšobné vzorky boli vyhotovené pri nastaveniach stroja udaných v *Tab. 56* a *Tab. 59*. Keďže maximálny vstrekovací tlak, ktorý stroj REP V27 Y125 dokáže vyvinúť činí 200 bar, nie je možné vstrekať, pri danej geometrii a dĺžke tokových kanálov, vyššou rýchlosťou ako je rýchlosť piestu cca $v = 5 \text{ mm/s}$ (približne $0,7 \text{ cm}^3/\text{s}$). Preto vstrekovanie nebolo riadené rýchlosťou piestu, ale dobou po ktorú má pôsobiť statický vstrekovací tlak 200 bar. Teplota formy bola sledovaná pomocou teplotného senzoru osadeného vo forme, v blízkosti dutiny. Spätná väzba senzoru s výhrevným telesom zaručovala konštantnú teplotu formy. Boli použité dva prierezy rozvodných kanálov vstrekovacích foriem.


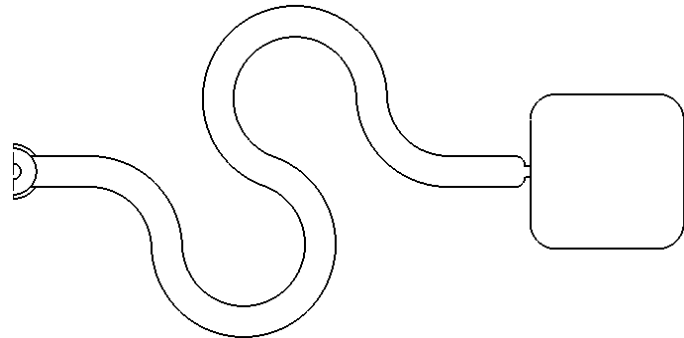
K dávkovaniu materiálu do stroja došlo 30 sekúnd pred ukončením cyklu. Ďalších 30 sekúnd materiál zotrval v plastikačnej komore, zatiaľ čo došlo k odformovaniu výrobku. K spusteniu ďalšieho cyklu teda došlo po 60 sekundách. Nasledujúcich približne 8 sekúnd je forma uzatváraná, to znamená, že materiál zotrval v plastikačnej komore ($T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$) cca 68 sekúnd. Pre každý cyklus boli tieto podmienky zhodné. K ochladzovaniu výrobku po vybratí z formy došlo na voľnom vzduchu o teplote $23 \text{ }^\circ\text{C}$. Aby bolo možné pozorovať zmenu mechanických vlastností po hrúbke, boli nastavené nižšie časy vulkanizácie, keby nedošlo k vzniku 90 % priečných väzieb.

Skúšobné vzorky sú pripravované pre následné meranie na trhacom stroji a tvrdosti. Počet vyrobených skúšobných telies je limitovaný dvomi hranicami:

- spodnú hranicu tvorí minimálny počet vzoriek potrebných na základné štatistické vyhodnotenie a je udaný normou podľa ktorej je realizované meranie;
- hornú hranicu tvorí množstvo poskytnutej zmesi firmou Continental Barum z ktorého sú skúšobné telesá vyrábané.

11.1 Procesné podmienky a geometrie širokých rozvodných kanálov

Tab. 55 – Použité trajektórie teploty formy a doby vstrekovania + vulkanizácie

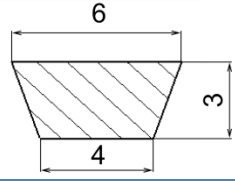
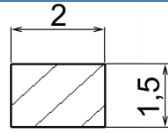
Trajektória kanálu					
Geometria 100 mm	A				
Geometria 200 mm	B				
	Č.	teplota [°C]		doba vstrekovania [min]	doba vulkanizácie [min]
		taveniny	formy		
Varianty	1	100	155	1:00	2:00
	2	100	155	1:00	3:00
	3	100	170	1:00	2:00

Tab. 56 – Nastavené parametre vstrekovacieho stroja

Parameter	Popis činnosti	[-]	hodnota
30	Celková dávka zmesi (dĺžka dráhy piestu)	[mm]	490
41	Vstrekovací tlak udávaný v baroch (maximálne 200 bar)	[bar]	200
46	Dĺžka pôsobenia vstrekovacieho tlaku	[min]	1:00
56	Doba vulkanizácie od skončenia vstrekovania	[min]	2:00, 3:00
61	Teplota plastikačnej komory	[°C]	100
62	Teplota vstrekovacej komory	[°C]	100
65	Teplota hornej výhrevnej dosky	[°C]	155, 170
67	Teploty spodnej výhrevnej dosky	[°C]	155, 170

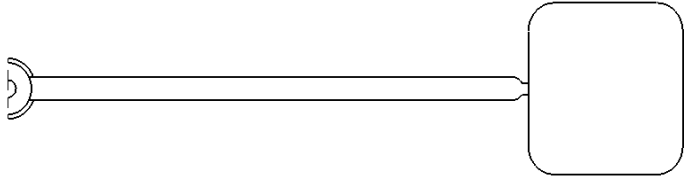
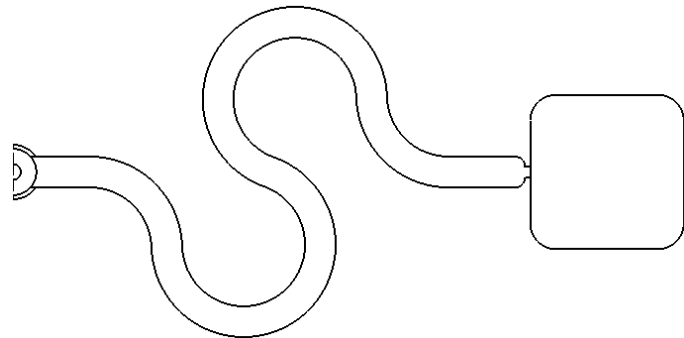
Bol použitý lichobežníkový prierez tokového kanálu o ploche prierezu 15 mm².

Tab. 57 – Prierez použitého rozvodného kanálu a vtokového ústia

	Prierez	Plocha prierezu
Rozvodný kanál		15 mm ²
Vtokové ústie		3 mm ²

11.2 Procesné podmienky a geometrie úzkych rozvodných kanálov

Tab. 58 – Použité trajektórie teploty formy a doby vstrekovania + vulkanizácie

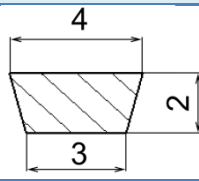
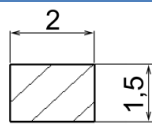
Trajektória kanálu					
Geometria 100 mm	A				
Geometria 200 mm	B				
Varianty	Č.	teplota [°C]		doba vstrekovania [min]	doba vulkanizácie [min]
		taveniny	formy		
	4	100	155	2:00	1:00
	5	100	155	2:00	2:00
6	100	170	2:00	1:00	

Tab. 59 – Nastavené parametre vstrekovacieho stroja

Parameter	Popis činnosti	[-]	hodnota
30	Celková dávka zmesi (dĺžka dráhy piestu)	[mm]	490
41	Vstrekovací tlak udávaný v baroch (maximálne 200 bar)	[bar]	200
46	Dĺžka pôsobenia vstrekovacieho tlaku	[min]	2:00
56	Doba vulkanizácie od skončenia vstrekovania	[min]	1:00, 2:00
61	Teplota plastikačnej komory	[°C]	100
62	Teplota vstrekovacej komory	[°C]	100
65	Teplota hornej výhrevnej dosky	[°C]	155, 170
67	Teploty spodnej výhrevnej dosky	[°C]	155, 170

Bol použitý lichobežníkový prierez tokového kanálu o ploche prierezu 7 mm^2 .

Tab. 60 – Prierez použitého rozvodného kanálu a vtokového ústia

	Prierez	Plocha prierezu
Rozvodný kanál		7 mm^2
Vtokové ústie		3 mm^2

Aby bol zachovaný čas vstrekovania ako pri širokom rozvodnom kanále (1:00 min.), musel by stroj disponovať výkonnejším hydraulickým agregátom. Keďže zmenšením plochy prierezu rozvodných kanálov došlo k zvýšeniu potrebného vstrekovacieho tlaku, ktoré boli nad limit stroja REP V27Y125, muselo dôjsť k zvýšeniu času vstrekovania na 2:00 min.

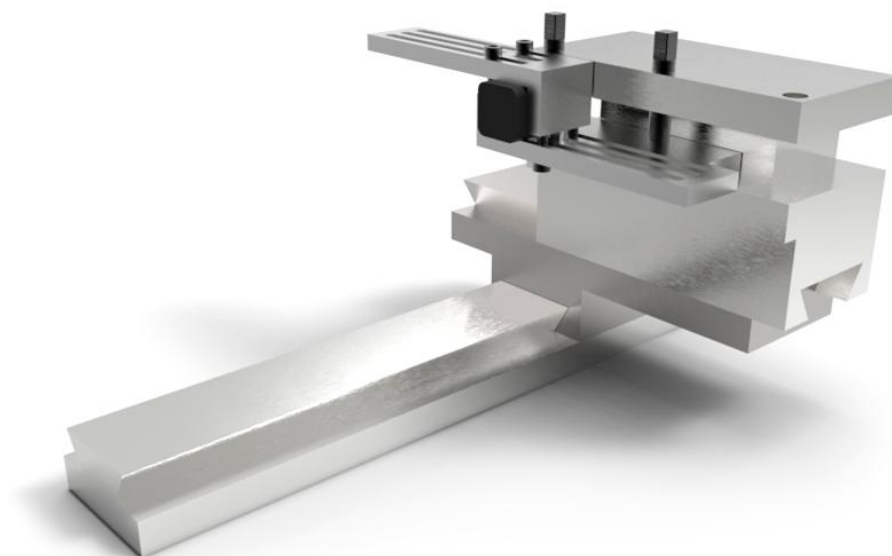
12 DELIACE ZARIADENIE

Pri delení materiálov s nízkym modulom pružnosti je obtiažne, keďže pri rezaní môže dôjsť k ich jednoduchej deformácii. Na oddelenie materiálu môže poslúžiť nôž s vybrúseným ostrím. Tento spôsob delenia materiálu je následné meranie tvrdosti nevyhovujúce, keďže rezaním dochádza k tvorbe triesky a k vysokej drsnosti povrchu. Keďže jednou z požiadaviek na meraný povrch je jeho dostatočná rovinnosť, táto možnosť bola zamietnutá. Ďalším možným riešením, je použitie pásovej píly s nekonečným pásom s ostrím. Pásová píla, ktorou disponuje Ústav výrobného inžénrství nemá upínací systém prispôbený pre mäkké, elastické, materiály. Vhodné deliace zariadenie bolo vybrané s prihliadnutím na normu ČSN EN ISO 23529, ktorej jedna časť pojednáva o doporučenom zariadení pre prípravu skúšobných teliesok. K deleniu materiálu bol použitý bezzubý rotačný nôž s definovanou geometriou ostria. Nôž je pri delení upnutý do skľučovadla na sústruhu a vykonáva hlavný rezný pohyb.



Obr. 65 – Bezzubý rotačný nôž

Vzhľadom k faktu, že z vulkanizovanej gume je nestlačiteľná a jej Poissonovo číslo sa blíži k 0,5, je potrebné vzorku upnúť tak, aby bolo zabránené deformácii v dvoch osiach (stupeň voľnosti je ponechaný v smere osi nástroj). Zvolené upínacie zariadenie je možné osadiť na suport horizontálneho sústruhu, ktorý sa nachádza na Ústave výrobného inžénrství. Celé upínacie zariadenie vykonáva vedľajší pohyb, posuv a prísun materiálu.



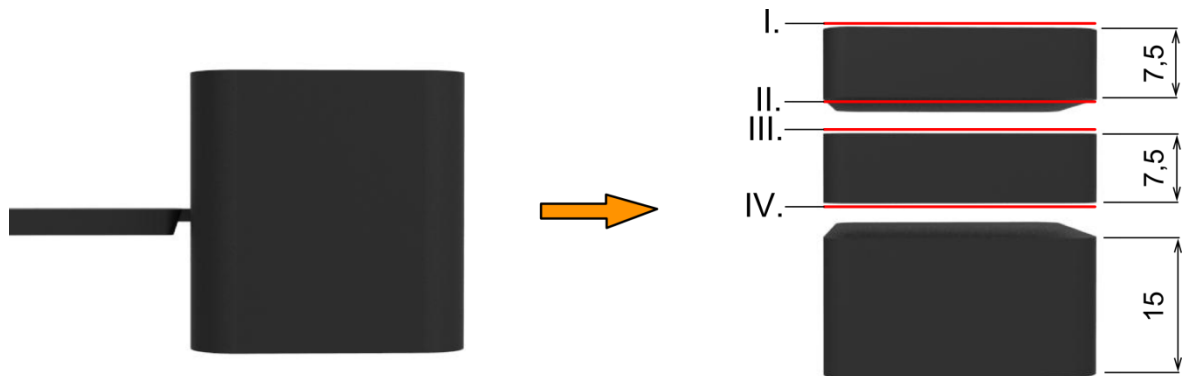
Obr. 66 – Upínacie zariadenie vrátane suportu



Obr. 67 – Vizualizácia upínacieho zariadenia

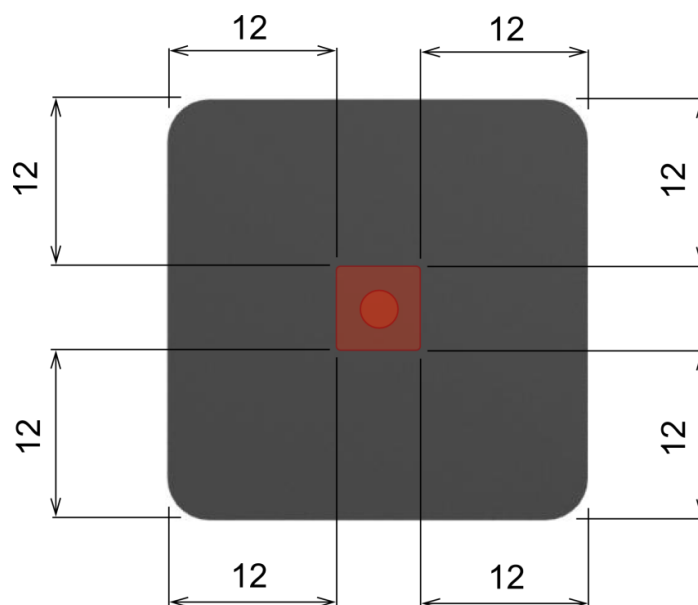
13 SKÚŠKA TVRDOSTI

Skúška tvrdosti bola uskutočnená na vrstvách hrubých $7,5 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$. Postup bol predpísaný normou ČSN EN ISO 48, ktorá pojednáva o stanovení tvrdosti metódou IRHD.



Obr. 68 – Jednotlivé rozrezané vrstvy a znázornené merané plochy

Keďže norma ČSN EN ISO 48 udáva, že jednotlivé merania musia byť od seba vzdialené minimálne 6 mm a nesmú byť bližšie pri okraji skúšaného telesa ako 12 mm, je zrejmé, že každá vrstva bude môcť byť na meranie použitá iba jedenkrát. Samotné meranie bolo realizované v strede vrstvy. Pri trajektóriách (A, B) a všetkých procesných podmienkach (1, 2, 3, 4, 5, 6) došlo k meraniu na 5 vzorkách. Doba medzi vulkanizáciou a skúšaním musí byť podľa normy ČSN EN ISO 23529 minimálne 16 hodín. Táto podmienka bola dodržaná. Skúška bola realizovaná pri teplote 23°C a vlhkosti vzduchu v rozsahu (48 – 56) %. Pri týchto podmienkach došlo taktiež ku kondicionovaniu vzoriek po dobu 3 hodín.

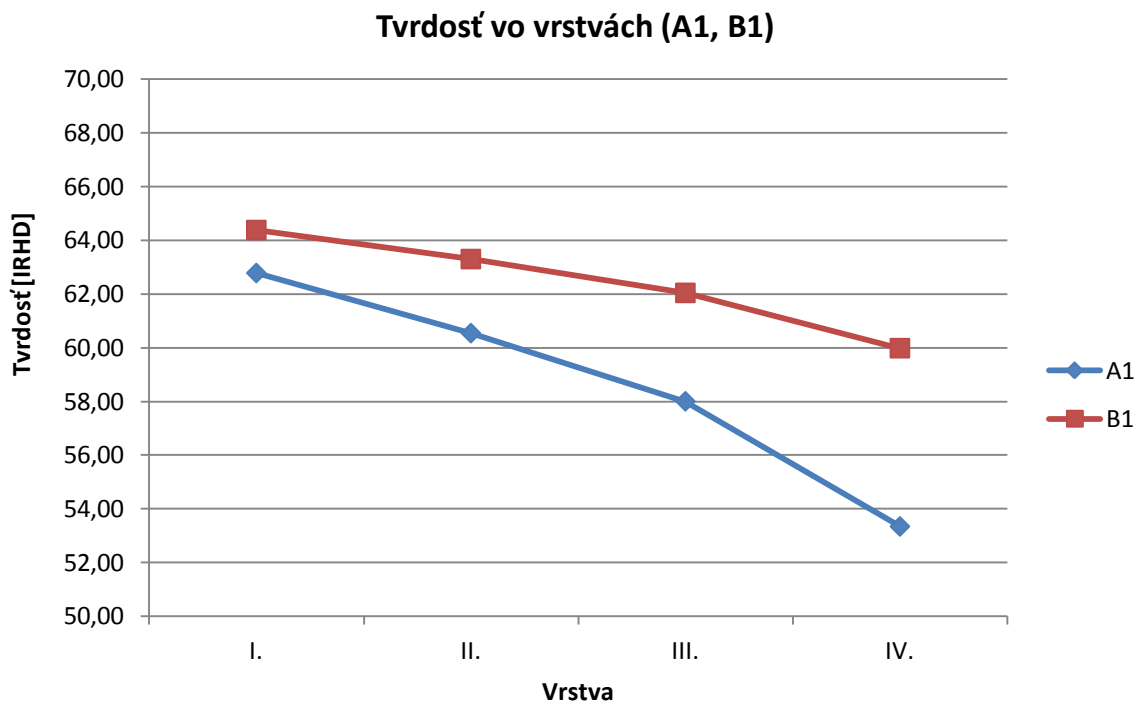


Obr. 69 – Podmienka merania min. 12 mm od kraja

13.1 Porovnanie širokej geometrie A a B pri procesných podmienkach 1

Tab. 61 – Tvrdosť vo vrstvách pre širokú geometriu a procesné podmienky A1 a B1

A1				Č. m.	B1			
I.	II.	III.	IV.		I.	II.	III.	IV.
63,1	61,7	59,0	54,0	1.	64,6	60,6	59,1	58,3
64,0	61,1	59,2	55,9	2.	61,9	63,6	62,5	60,3
62,3	60,9	57,7	50,5	3.	65,4	64,4	63,9	60,4
61,3	59,2	56,9	52,6	4.	66,3	65,1	63,3	61,1
63,2	59,8	57,2	53,7	5.	63,7	62,8	61,4	59,8
62,78	60,54	58,00	53,34	\bar{X}	64,38	63,30	62,04	59,98
1,02	1,02	1,05	1,98	s	1,69	1,74	1,89	1,05

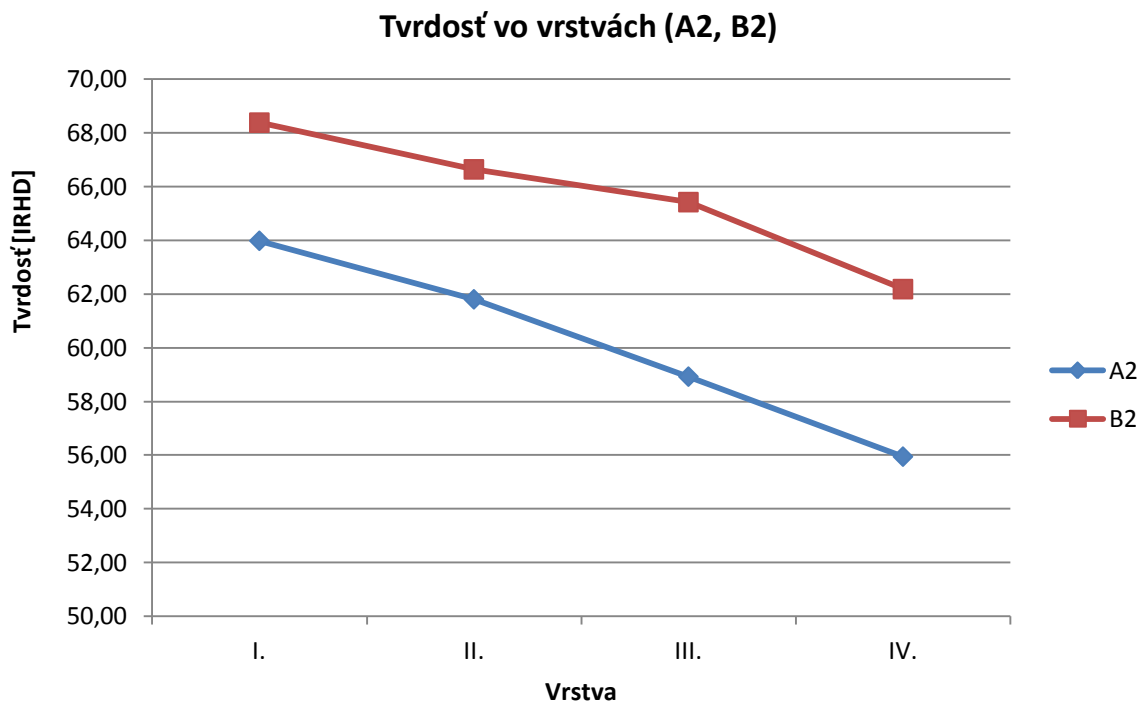


Obr. 70 – Znáznornená tvrdosť v jednotlivých vrstvách (A1, B1)

13.2 Porovnanie širokej geometrie A a B pri procesných podmienkach 2

Tab. 62 – Tvrdosť vo vrstvách pre širokú geometriu a procesné podmienky A2 a B2

A2				Č. m.	B2			
I.	II.	III.	IV.		I.	II.	III.	IV.
64,1	61,7	58,7	56,7	1.	69,0	68,8	66,0	62,5
65,1	62,6	61,6	58,2	2.	68,2	66,9	65,5	61,8
62,2	59,2	56,7	53,3	3.	66,5	63,8	61,6	59,1
64,7	63,2	59,2	55,4	4.	70,3	68,6	68,1	64,3
63,8	62,3	58,4	56,1	5.	67,9	65,1	65,9	63,2
63,98	61,80	58,92	55,94	\bar{X}	68,38	66,64	65,42	62,18
1,12	1,55	1,77	1,80	s	1,40	2,18	2,36	1,95

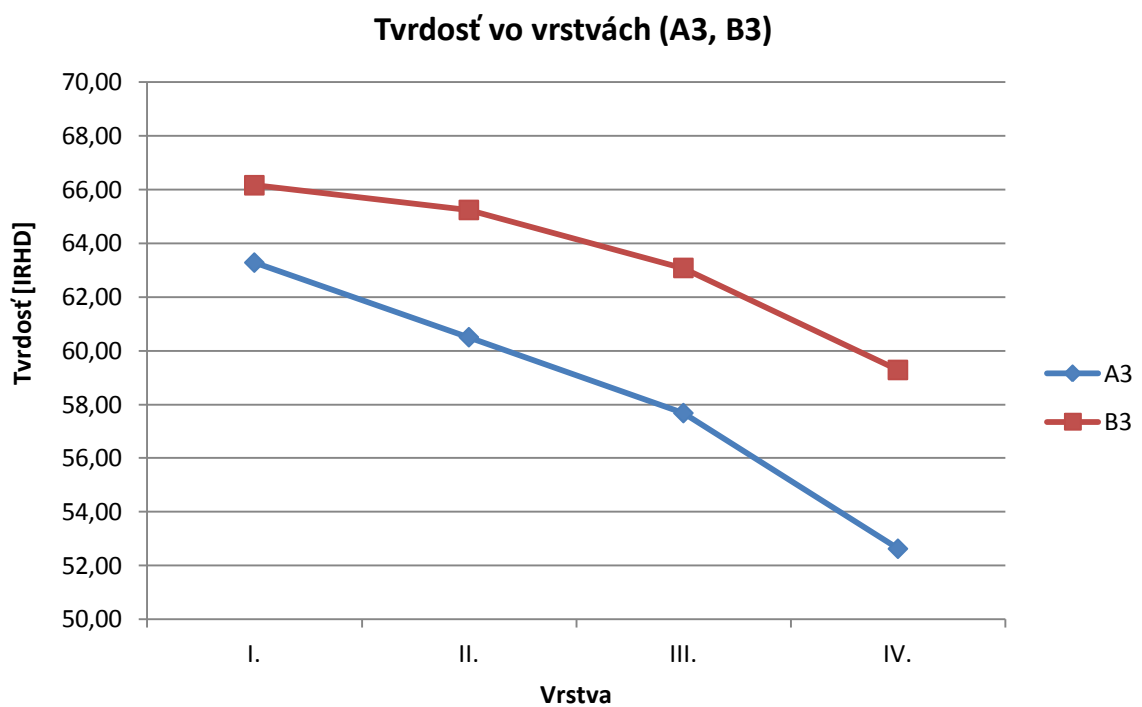


Obr. 71 – Znáznornená tvrdosť v jednotlivých vrstvách (A2, B2)

13.3 Porovnanie širokej geometrie A a B pri procesných podmienkach 3

Tab. 63 – Tvrdosť vo vrstvách pre širokú geometriu a procesné podmienky A3 a B3

A3				Č. m.	B3			
I.	II.	III.	IV.		I.	II.	III.	IV.
63,1	59,8	57,2	51,6	1.	66,5	65,4	64,9	59,9
66,2	61,4	56,3	55,6	2.	70,0	67,6	65,2	61,7
63,9	59,9	56,8	53,5	3.	64,5	62,8	59,8	57,5
60,8	60,1	59,2	50,8	4.	63,9	64,7	62,4	58,2
62,4	61,3	58,87	51,6	5.	65,9	65,7	63,1	59,1
63,28	60,50	57,67	52,62	\bar{X}	66,16	65,24	63,08	59,28
1,99	0,78	1,29	1,94	s	2,39	1,74	2,18	1,63

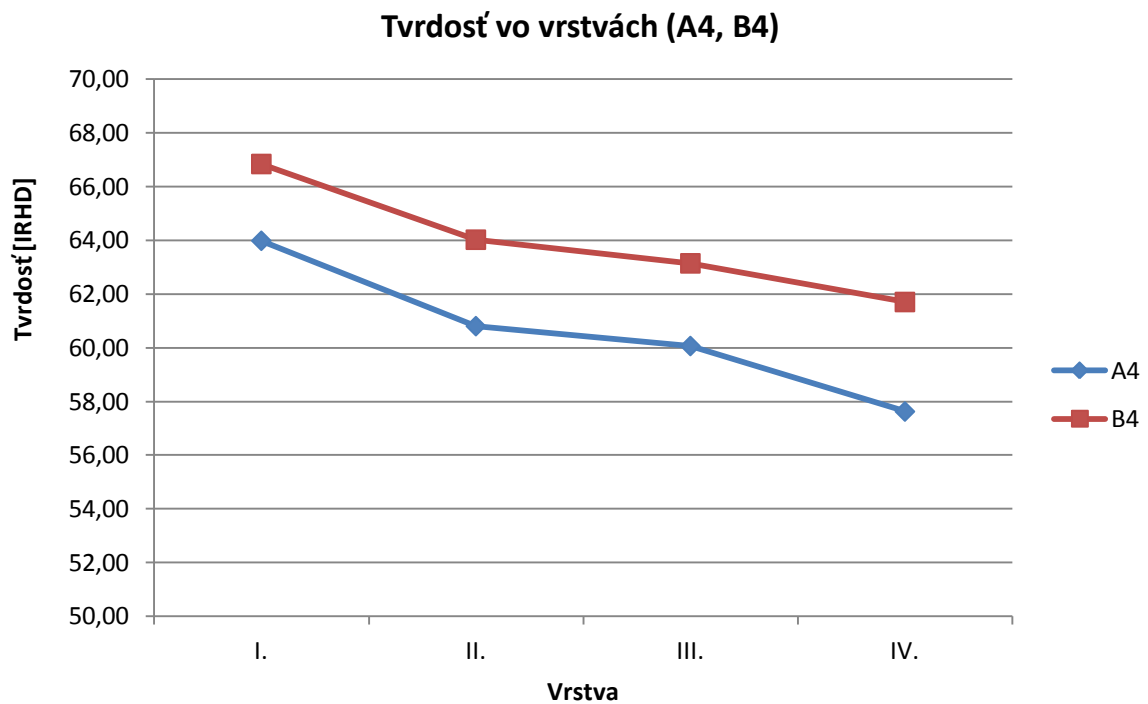


Obr. 72 – Znáznornená tvrdosť v jednotlivých vrstvách (A3, B3)

13.4 Porovnanie úzkej geometrie A a B pri procesných podmienkach 4

Tab. 64 – Tvrdosť vo vrstvách pre úzku geometriu a procesné podmienky A4 a B4

A4				Č. m.	B4			
I.	II.	III.	IV.		I.	II.	III.	IV.
64,8	60,4	59,4	57,7	1.	66,2	63,2	64,1	63,2
62,5	58,1	56,8	54,5	2.	68,2	65,8	63,4	61,3
64,2	62,3	61,2	59,7	3.	67,0	63,5	62,8	62,1
65,3	61,2	60,7	58,9	4.	65,3	61,9	60,9	58,2
63,1	62,0	62,2	57,3	5.	67,5	65,7	64,5	63,7
63,98	60,80	60,06	57,62	\bar{X}	66,84	64,02	63,14	61,70
1,16	1,68	2,08	1,99	s	1,13	1,69	1,41	2,17

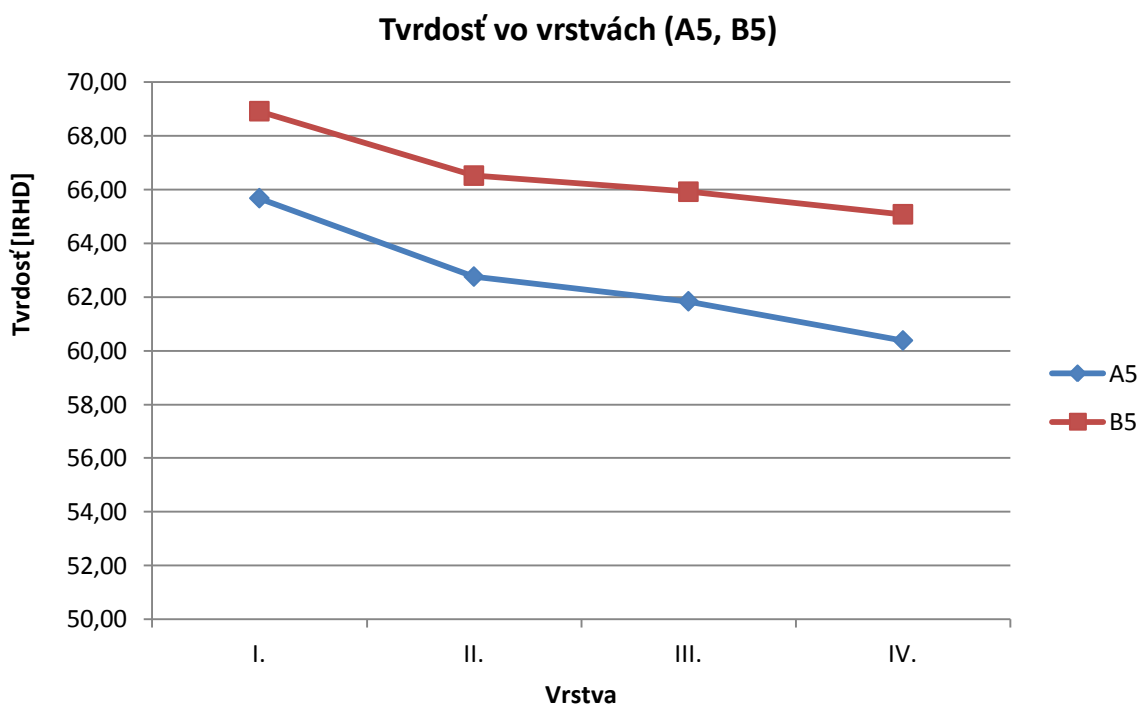


Obr. 73 – Znáznornená tvrdosť v jednotlivých vrstvách (A4, B4)

13.5 Porovnanie úzkej geometrie A a B pri procesných podmienkach 5

Tab. 65 – Tvrdosť vo vrstvách pre úzku geometriu a procesné podmienky A5 a B5

A5				Č. m.	B5			
I.	II.	III.	IV.		I.	II.	III.	IV.
64,9	63,5	61	60,7	1.	68,5	67,2	65,9	65,1
68,5	64,8	63,9	58,7	2.	69,8	67,5	67,1	64,8
63,1	60,4	61,8	59,2	3.	70,7	68,2	66,9	67,3
65,2	61,2	59,6	62,2	4.	67,1	63,3	62,2	63,2
66,7	63,9	62,9	61,1	5.	68,5	66,4	67,5	65,0
65,68	62,76	61,84	60,38	\bar{X}	68,92	66,52	65,92	65,08
2,03	1,87	1,67	1,43	s	1,38	1,91	2,16	1,46

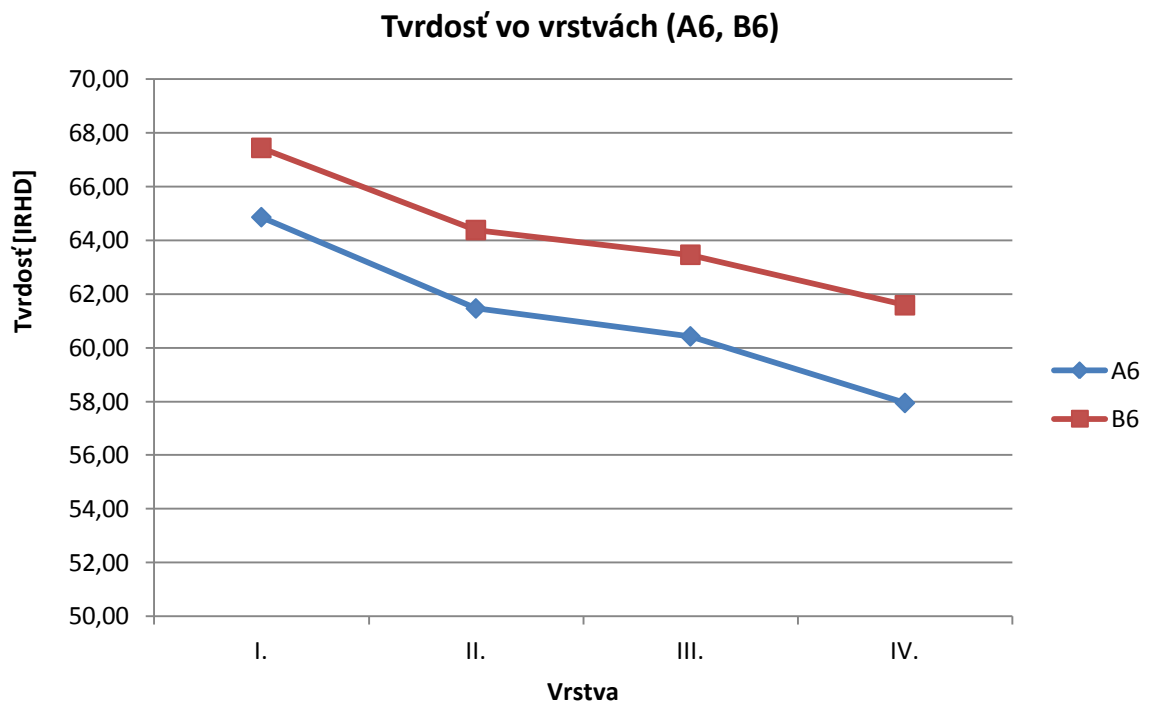


Obr. 74 – Znáznornená tvrdosť v jednotlivých vrstvách (A5, B5)

13.6 Porovnanie úzkej geometrie A a B pri procesných podmienkach 6

Tab. 66 – Tvrdosť vo vrstvách pre úzku geometriu a procesné podmienky A6 a B6

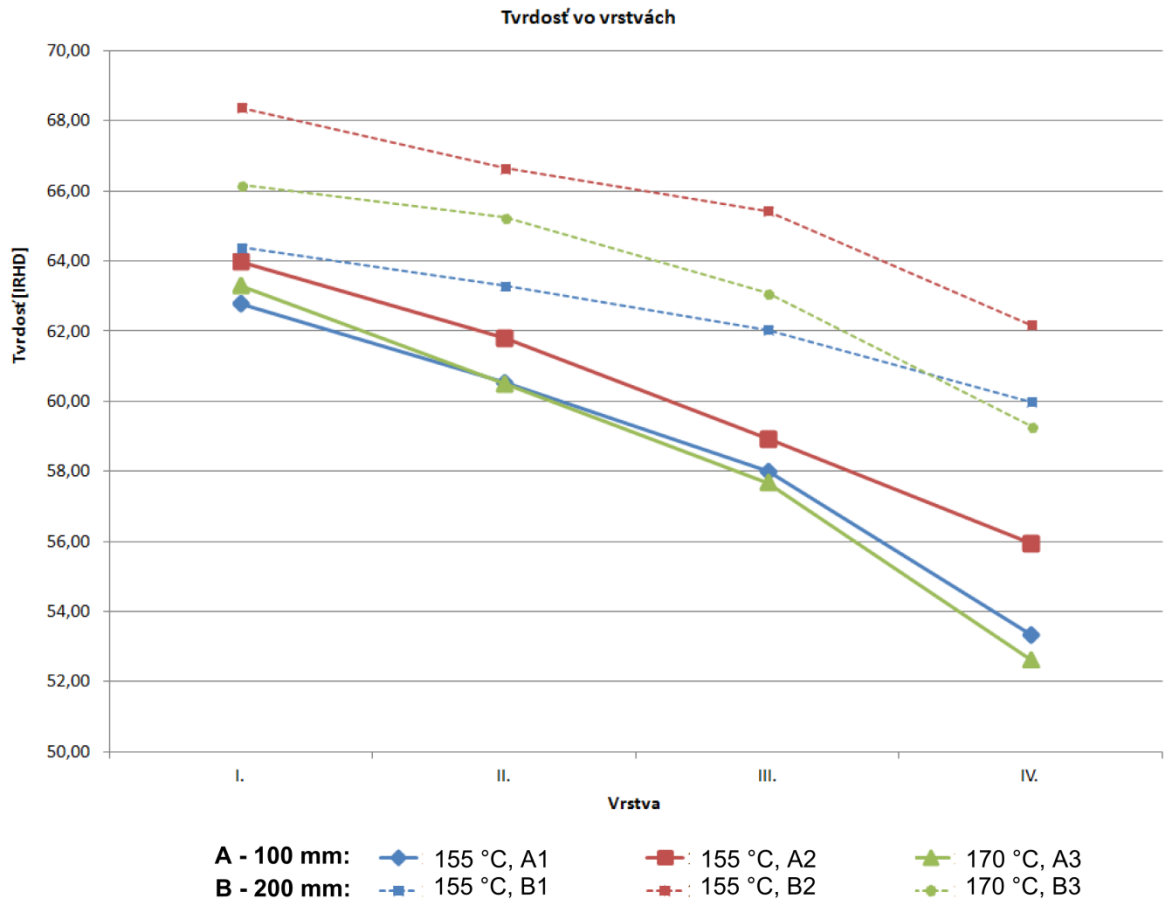
A6				Č. m.	B6			
I.	II.	III.	IV.		I.	II.	III.	IV.
64,1	59,6	62,1	59,2	1.	67,5	66,3	64,4	61,8
62,5	61,3	58,7	55,3	2.	65,2	61,4	62,5	62,7
63,7	61,8	62,2	60	3.	66,9	63,2	59,9	58,8
66,2	61,2	57,3	56,7	4.	68,1	65,9	64,8	62,1
67,8	63,4	61,8	58,5	5.	69,5	65,1	65,7	62,5
64,86	61,46	60,42	57,94	\bar{X}	67,44	64,38	63,46	61,58
2,12	1,36	2,27	1,91	s	1,58	2,05	2,31	1,59



Obr. 75 – Znáznornená tvrdosť v jednotlivých vrstvách (A6, B6)

13.7 Diskusia výsledkov skúšky tvrdosti

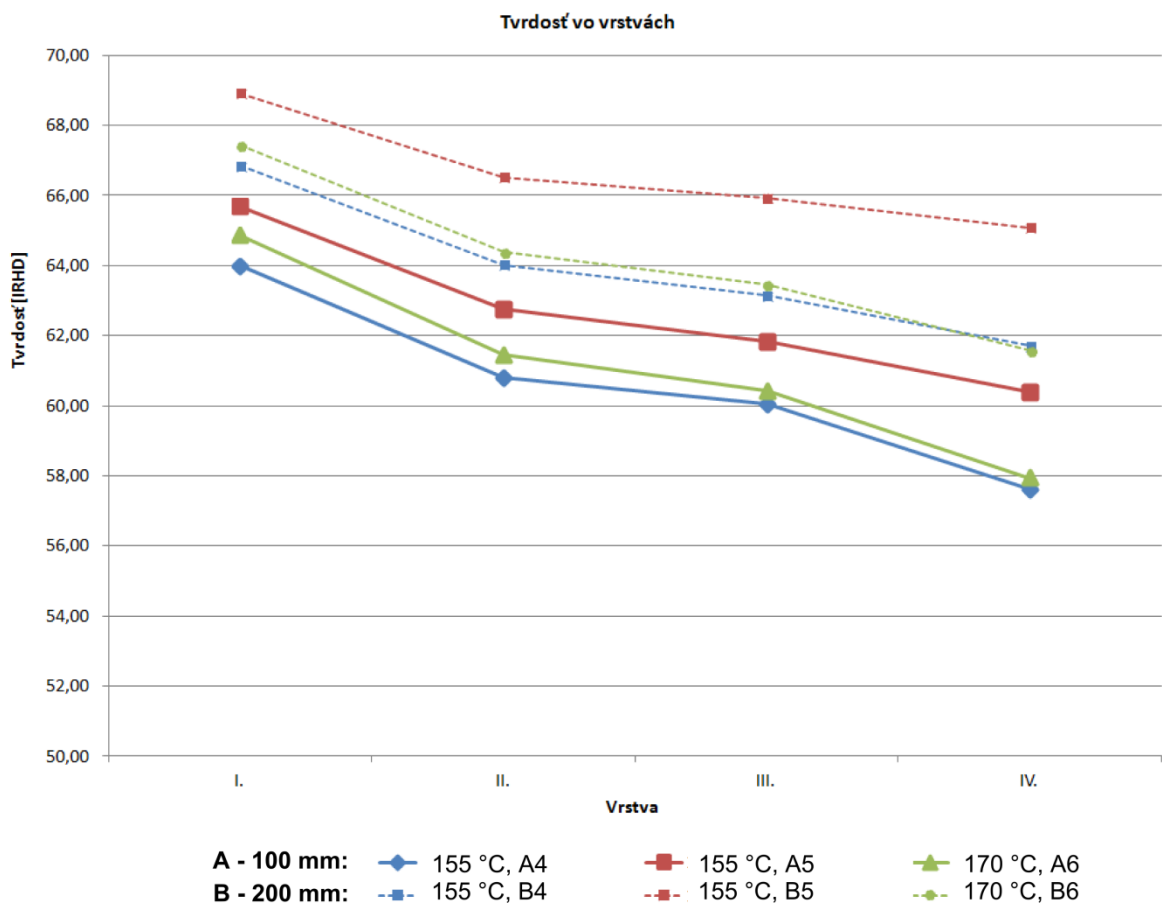
Pri použití širokej geometrie bolo možné, vzhľadom na maximálny výkon vstrekovacej jednotky, nastaviť dobu vstrekovania na 1:00 minútu.



Obr. 76 – Tvrdosť vo vrstvách pri širokom priereze a rôznych procesných podmienkach

Tvrdosť vulkanizátu rastie s časom vulkanizácie. Na Obr. 76 je vidieť, že zotrvanie materiálu vo vtokovom systéme má rozhodujúci vplyv na jeho výslednú tvrdosť. Nie len, že materiál má dlhším zotrvaním v 200 mm kanáli a tým pádom aj dlhšej možnosti ohrevu od steny formy, vyššiu tvrdosť ako pri polovičnej dĺžke kanálu, ale výraznejšie sa prejaví aj vplyv procesných podmienok, konkrétne času vulkanizácie, čo má za následok väčší rozdiel tvrdostí v 200 mm kanále (oproti 100 mm) v jednotlivých vrstvách S približovaním k jadrú skúšobného telesa tvrdosť klesá.

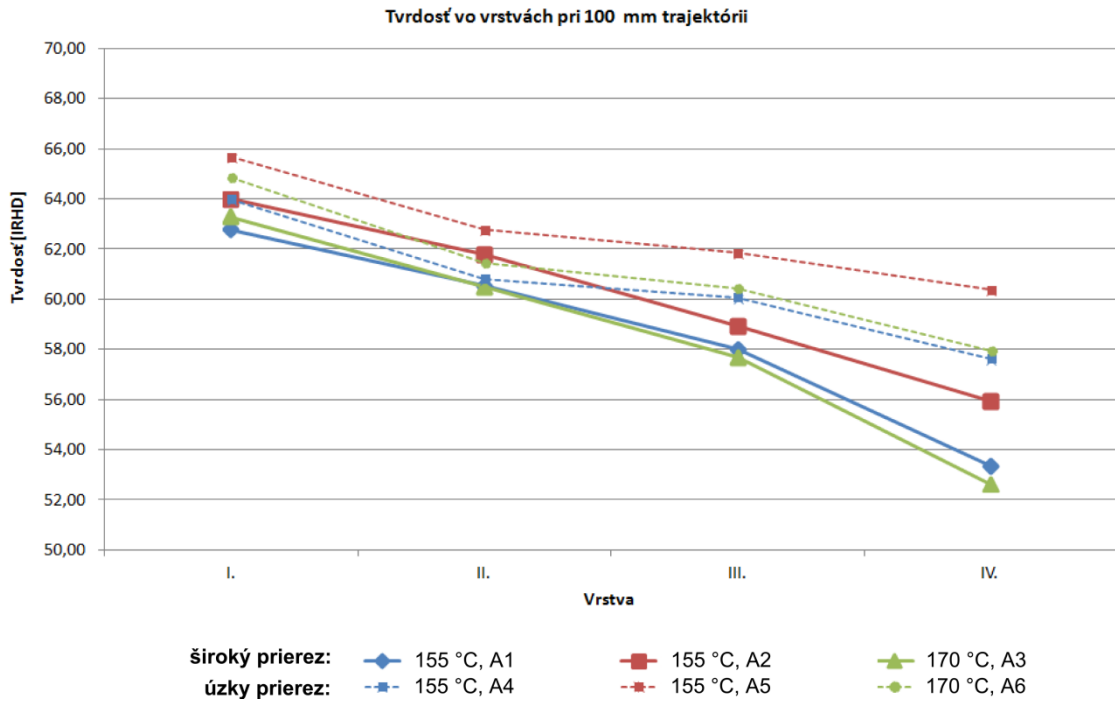
Pokiaľ bol vstrekovací stroj osadený úzkou geometriou rozvodných kanálov, bol čas vstrekovania nastavený na 2:00 minúty.



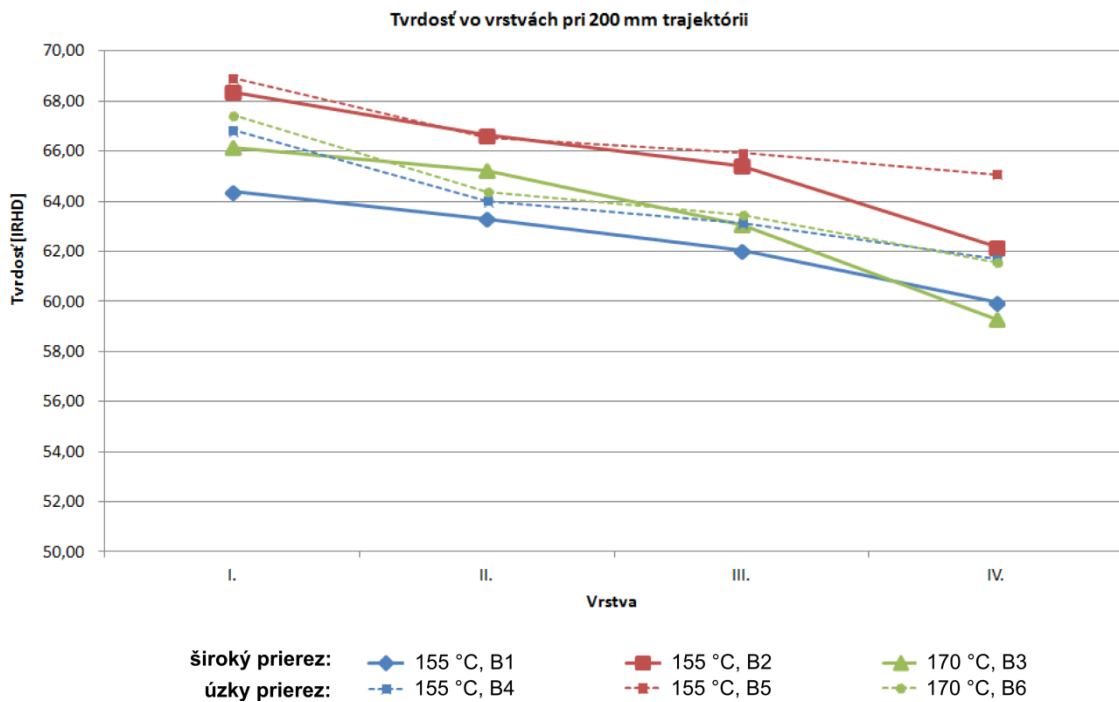
Obr. 77 – Tvrdosť vo vrstvách pri úzkom priereze a rôznych procesných podmienkach

Aj v prípade použitia úzkeho prierezu rozvodných kanálov je vidieť, že dĺžka trajektórie má značný vplyv na výslednú tvrdosť pryže, no nie až tak výraznú ako pri použití širokého kanálu. Tento vplyv je spôsobený menšou dĺžkou najvzdialenejšieho bodu prierezu od steny formy, čím sa kaučuková zmes viac prehreje než pri širokom priereze a urýchlí sa vulkanizácia už aj pri 100 mm kanáli.

Na Obr. 79 je vidieť, že zmenšenie prierezu má význam pri použití kratšieho kanálu, čím sa zmes stihne viac prehriať prestupom tepla v tokovom systéme a dosiahnuť vyšší stupeň vulkanizácie v strede skúšobného vzorku (IV. vrstva), než pri širšom priereze. Pri použití 200 mm dlhého rozvodného kanálu (Obr. 79) už prierez kanálu nemá tak výrazný vplyv na zmenu tvrdosti v jednotlivých vrstvách, pretože pri oboch prierezoch materiál zotrva v rozvodných kanáloch dostatočne dlho, aby odobral teplo zo steny formy.



Obr. 78 – Vyhodnotená tvrdosť pre 100 mm (A) dlhý rozvodný kanál



Obr. 79 – Vyhodnotená tvrdosť pre 200 mm (B) dlhý rozvodný kanál

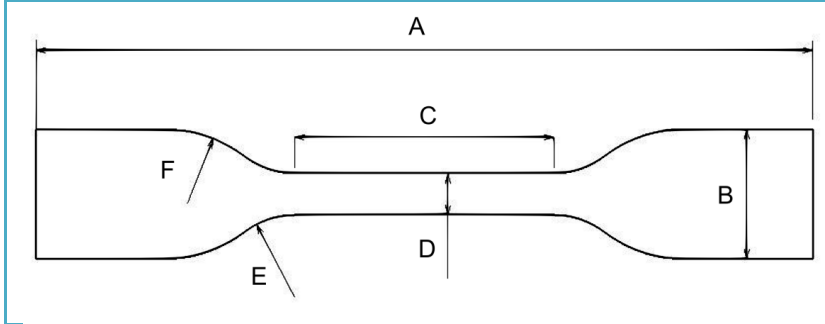
Tab. 67 – Význam číselného označovania (časy vstrekovania a vulkanizácie)

[min]	1	2	3	4	5	6
čas vstrekovania	1:00	1:00	1:00	2:00	2:00	2:00
čas vulkanizácie	2:00	3:00	2:00	1:00	2:00	1:00

14 ŤAHOVÁ SKÚŠKA

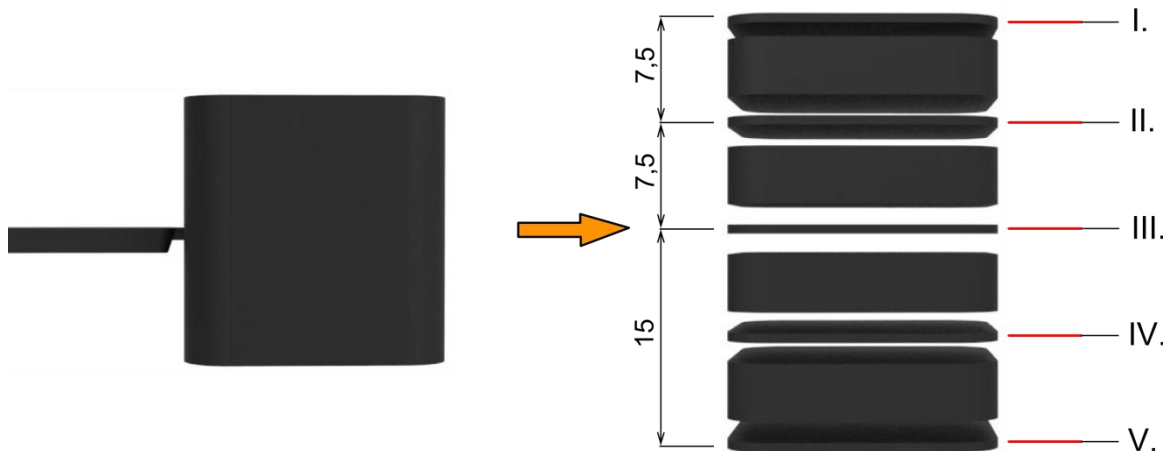
Ťahová skúška bola realizovaná na vrstvách hrubých 1 mm. Meranie uskutočnila firma Continental Barum, kde došlo aj k rezaniu vrstiev a k vyseknutiu skúšobného telieska.

Tab. 68 – Rozmery skúšobného telieska



Rozmer	
A	Celková dĺžka: 30
B	Šírka koncov: $6 \pm 0,5$
C	Dĺžka úzkej časti: $12 \pm 0,5$
D	Šírka úzkej časti: $2 \pm 0,1$
E	Prechodový polomer: $3 \pm 0,1$
F	Prechodový polomer: $3 \pm 0,1$
	Vyhodnocovaná dĺžka: $10 \pm 0,5$

K meraniu došlo na piatich vrstvách, pričom dve vrstvy sú krajné (v kontakte s formou), jedna vrstva priamo v strede pryžovej kocky a dve vrstvy sú v polovičnej vzdialenosti medzi stredom a krajom kocky.



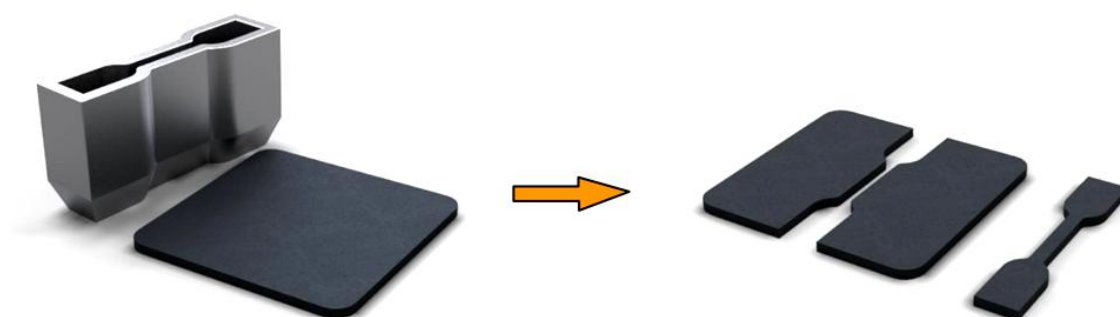
Obr. 80 – Jednotlivé rozřezané vrstvy

Došlo k výrobe 4 kociek pričom každá kocka bola vyrobená pri použití odlišnej geometrie tokových kanálov. Pri výrobe bola použitá ako trajektória A, B, pričom obe trajektórie boli použité ako so širokým, tak s úzkym prierezom. Z procesných podmienok bola pre časy vstrekovania v vulkanizácii vybraná varianta 5, ktorej hodnoty sú uverejnené v Tab. 69.

Tab. 69 – Procesné podmienky použité pri výrobe teliesok na ťahovú skúšku

Parameter	Popis činnosti	[-]	Hodnota	
			Široký prierez	Úzky prierez
30	Celková dávka zmesi (dĺžka dráhy piestu)	[mm]	490	490
41	Vstrekovací tlak udávaný v baroch	[bar]	160	200
46	Dĺžka pôsobenia vstrekovacieho tlaku	[min]	2:00	2:00
56	Doba vulkanizácie od skončenia vstrekovania	[min]	2:00	2:00
61	Teplota plastikačnej komory	[°C]	100	100
62	Teplota vstrekovacej komory	[°C]	100	100
65	Teplota hornej výhrevnej dosky	[°C]	155	155
67	Teploty spodnej výhrevnej dosky	[°C]	155	155

Skúšobnému teliesku bol po vyrezaní a vyseknutí poskytnutý čas 24 hodín na uvoľnenie vzniknutých napätí počas delenia.



Obr. 81 – Výroba skúšobných teliesok

Protokoly o uskutočnenej ťahovej skúške sú uvedené v prílohe, pod označením PI – PIV.

14.1 Krátky kanál - úzky prierez (Príloha PI)

Tab. 70 – Hodnoty pre krátky kanál a úzky prierez

	R_B	ϵ	Rp 100%	Rp 200%	Rp 300%	Rp 400%	energia	a0
vrstva	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[J/cm ³]	[mm]
I.	19,26	544,6	2,35	5,83	10,19	14,32	50,08	1,117
II.	18,60	575,3	2,07	4,88	8,88	12,83	50,14	1,143
III.	16,65	624,6	1,71	3,55	6,57	9,96	47,26	0,983
IV.	18,13	638,2	1,83	3,98	7,33	10,90	53,73	0,979
V.	18,78	657,1	1,89	4,25	7,75	11,36	59,12	1,153

Na stenách kocky pri použití krátkeho kanálu a úzkeho prierezu bola dosiahnutá najväčšia pevnosť v ťahu. Je to spôsobené tým, že kocka je na povrchu najviac zulkanizovaná a smerom k stredu kocky, ako sa znižuje počet vytvorených priečných väzieb, sa znižuje aj pevnosť v ťahu.

14.2 Krátky kanál – široký prierez (Príloha PII)

Tab. 71 – Hodnoty pre krátky kanál a široký prierez

	R_B	ϵ	Rp 100%	Rp 200%	Rp 300%	Rp 400%	energia	a0
vrstva	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[J/cm ³]	[mm]
I.	19,83	641,5	2,06	4,87	8,80	12,60	61,95	1,066
II.	16,06	818,9	1,41	2,72	4,88	7,44	63,83	1,097
III.	13,39	838,5	1,23	2,17	3,80	5,89	54,79	1,183
IV.	15,74	703,7	1,65	3,29	5,85	8,72	53,52	0,936
V.	18,44	623,5	2,14	4,79	8,41	11,95	55,92	1,064

Situácia sa opakuje ako v predchádzajúcom prípade, s tým rozdielom, že vrstva v strede kocky, dosahuje nižšiu pevnosť v ťahu približne o 3 jednotky MPa, než pri použití úzkeho prierezu, z čoho vyplýva, že pri použití rovnakých procesných podmienok ale iných prierezoch tokových kanálov je možné dosiahnuť rozdielne mechanické vlastnosti, rozdielne stupne vulkanizácie.

14.3 Dlhý kanál – úzky prierez (Príloha PIII)

Tab. 72 – Hodnoty pre dlhý kanál a úzky prierez

	R_B	ϵ	Rp 100%	Rp 200%	Rp 300%	Rp 400%	energia	a0
vrstva	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[J/cm ³]	[mm]
I.	20,85	581,3	2,46	5,88	10,25	14,42	58,15	1,072
II.	19,16	657,6	1,78	3,77	6,97	10,67	56,89	0,992
III.	19,16	658,1	1,85	4,07	7,36	10,92	58,02	1,161
IV.	19,33	548,8	2,44	5,76	9,93	13,99	50,24	1,041
V.	20,30	590,0	2,24	5,35	9,55	13,72	56,80	1,082

Pri dlhom kanály má materiál dostatok času prijať teplo od steny formy, do dutiny vstupuje prehriaty, čím je priebeh vulkanizácie rýchlejší. Diferencia pevnosti v ťahu medzi stredom (teoreticky najmenej zvulkanizované) a okrajom kocky (najviac zvulkanizované) je približne 1,7 MPa, zatiaľ čo pri krátkom kanály rovnakého prierezu pri rovnakých procesných podmienkach je rozdiel cca 2,7 MPa.

14.4 Dlhý kanál – široký prierez (Príloha PIV)

Tab. 73 – Hodnoty pre dlhý kanál a široký prierez

	R_B	ϵ	Rp 100%	Rp 200%	Rp 300%	Rp 400%	energia	a0
vrstva	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[J/cm ³]	[mm]
I.	20,80	694,9	2,15	4,71	8,27	11,92	70,35	0,913
II.	18,16	628,2	1,83	4,19	7,71	11,38	53,82	1,508
III.	18,14	544,4	2,31	5,47	9,55	13,45	47,20	1,360
IV.	19,07	653,8	1,81	4,00	7,39	11,07	57,68	0,952
V.	19,39	596,2	2,20	5,06	8,97	12,80	54,69	0,958

V prípade dlhého kanálu so širokým prierezom je maximálna diferencia medzi vrstvami približne 2,7 MPa, zatiaľ čo pri krátkom a širokom je to až 6,5 MPa. Pri širokých prierezoch má predĺženie rozvodných kanálov (zvýšenie doby zotrvania v tokovom systéme) zásadný vplyv na pevnosť v ťahu.

DISKUSIA VÝSLEDKOV

Prvá časť počítačových analýz ukázala, že znalosť reologických charakteristík je pri procese vstrekovania nesmierne dôležitá. Čím rastie index neneutonského chovania, tým sa zvyšuje intenzita šmykovej deformácie pri toku, zvyšuje sa miera generovania disipačnej energie, ktorá sa mení na teplo a zmes ohrieva. Preto pred samotným vstrekaním je nutné index neneutonského chovania poznať. V prípade, že materiál má malý odklon od newtonského chovania, je výhodné ho spracovať pri vyšších rýchlostiach, kedy je primárnym zdrojom tepla disipácia. Naopak, ak má materiál veľký odklon od newtonského chovania, vysokou rýchlosťou vstrekovania došlo len k malej intenzite šmykovej deformácie pri toku a preto primárnym zdrojom tepla je prestup tepla od steny formy. V tomto prípade je výhodnejšie vstrekať pri nižších rýchlostiach, čím sa poskytne dostatok času na prestup tepla medzi materiálom a stenou formy.

Druhá časť počítačových simulácií skúma závislosť prierezu rozvodného kanálu na čas vulkanizácie. Štúdiám bol podrobený 100 mm dlhý lichobežníkový a kruhový tvar kanálu o priereze 7 mm² a 15 mm². Výsledkom bolo zistenie, že čelo materiálu pri dosiahnutí vtokového ústia je viac prehriate pri lichobežníkovom kanáli, než pri kruhovom. ($T = 170\text{ °C}$, $v = 5\text{ mm/s}$ - $T_{\text{lichobežník}} = 143\text{ °C}$, $T_{\text{kruh}} = 133\text{ °C}$). Tento nárast teploty docielil zníženie vulkanizačného času z $t_{\text{kruh}} = 443\text{ s}$ na $t_{\text{lichobežník}} = 389\text{ s}$. K zvýšeniu teploty materiálu, a tým k zníženiu potrebného vulkanizačného času, došlo prestupom tepla. Kontaktná plocha pri úzkom lichobežníkovom kanáli je 11 mm, zatiaľ čo pri úzkom kruhovom kanáli je približne 9,39 mm. Druhým aspektom zvýšenia teploty je geometria kanálov. Zatiaľ čo pri kruhovom kanáli je najvzdialenejší bod, bod stredu krivosti, vzdialený od steny formy cca 1,49 mm, pri lichobežníkovej geometrii najvzdialenejší bod leží iba 1 mm od steny formy. Rovnakú tendenciu ukazuje aj porovnanie širokých kanálov.

Tretia časť sa venuje dĺžky rozvodného kanálu na čas vulkanizácie. Boli použité úzke lichobežníkové prierezy s dĺžkou rozvodných kanálov 100 mm a 200 mm. Bolo zistené, že za použitia nízkych rýchlostí vstrekovania je zníženie potrebného vulkanizačného času pri 200 mm kanále spôsobené zvýšením teploty o cca (13 – 16) °C oproti 100 mm kanálu. Zvýšenie teploty je spôsobené dlhším zotrvaním vo vtokovom systéme, čo vedie k poskytnutiu dlhšieho času na prestup tepla medzi materiálom a stenou formy. Ďalej sa uplatňuje predpoklad z prvej úlohy. Keďže materiál má index neneutonského chovania $n = 0,272$, s narastajúcou rýchlosťou vstrekovania a skracovaním zotrvania materiálu v rozvodných

kanáloch, nedochádza k dostatočnej generácii disipačnej energie, čo má za následok znižovanie rozdielu vulkanizačného času medzi krátkym a dlhým kanálom. Hlavným zdrojom tepla je prestup tepla.

Materiál musí disponovať dostatočne dlhou bezpečnosťou zmesi, nesmie dôjsť k predčasnej vulkanizácii v rozvodných kanáloch, čo by malo za následok výskyt vad na výrobku. Preto maximálny čas zotrvania v tokovom systéme je daný časom, kedy začnú vulkanizovať povrchové vrstvy.

Pri mechanických skúškach došlo k výrobe skúšobných teliesok pri dvoch trajektóriách a dvoch prierezoch rozvodných kanálov. Bol použitý 100 mm priamy s úzkym (7 mm^2) a širokým (15 mm^2) prierezom a 200 mm krivkový kanál s rovnakými variantami prierezu. Bolo zistené, že dĺžka zotrvania v tokových kanáloch má rozhodujúci vplyv na výslednú tvrdosť vulkanizátu. Porovnaním širokého a úzkeho prierezu pri krátkom kanáli je vidieť, že dosiahnutá tvrdosť je pri použití úzkeho prierezu homogénnejšia, vznikli menšie rozdiely medzi povrchom a jadrom vyrobenej kocky. (100 mm, procesné podmienky A3, $\Delta_{vrstva 1/4} = 10,7 \text{ }^\circ\text{IRHD}$; 100 mm, procesné podmienky A6, $\Delta_{vrstva 1/4} = 7 \text{ }^\circ\text{IRHD}$) Pri použití 200 mm dlhého rozvodného kanálu plocha prierezu nehrá tak významnú rolu ako v predchádzajúcom prípade, pretože materiál v tokovom systéme zotrval dostatočne dlho, aby teplotné polia oboch prierezov boli veľmi podobné. (200 mm, procesné podmienky B3, $\Delta_{vrstva 1/4} = 6,2 \text{ }^\circ\text{IRHD}$; 200 mm, procesné podmienky B6, $\Delta_{vrstva 1/4} = 5,8 \text{ }^\circ\text{IRHD}$)

Pri ťahových skúškach bola potvrdená domnienka, že dĺžka kanálu pri použití rovnakých procesných podmienkach má rozhodujúci vplyv na pevnosť v ťahu. Zatiaľ čo pri 200 mm širokom kanáli je minimálna pevnosť v ťahu (v strede kocky) 18,14 MPa, pri 100 mm širokom kanáli je pevnosť v strede kocky iba 13,39 MPa. Rozdiel skoro 4,8 MPa je spôsobený kratšou dobou ohrevu od steny formy a tým pádom aj nižším stupňom vulkanizácie. Preto je možné konštatovať, že dĺžka a prierez tokových kanálov má významný vplyv na koncové vlastnosti vulkanizátu.

MOŽNOSTI ĎALŠIEHO VÝSKUMU

Index neneutonského chovania je iba jeden z rady reologických parametrov, ktoré ovplyvňujú spracovateľnosť zmesi. V ďalších prípadoch je možné podrobiť štúdiám vplyvu relaxačného času na rýchlosť vulkanizácie a vývin teplotného pola.

Druhou variantou je zmena trajektórie rozvodných kanálov pri zachovaní referenčnej dĺžky (100 mm, 200 mm) a prierezu (kruh / lichobežník; široký / úzky) a jeho závislosť na rýchlosť vulkanizácie.

V ťahovej skúške bola naznačená závislosť medzi prierezom a dĺžkou rozvodných kanálov. Táto téma by mohla byť podrobená bližšiemu preskúmaniu.

ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo preukázať závislosť geometrie rozvodných kanálov ako na čas potrebný k dosiahnutie 90 % pričných väzieb, tak na mechanické vlastnosti vulkanizátu.

Simulačná časť skúma ako vplyv reologických vlastností zmesi, konkrétne indexu nenevtonského chovania, na generované teplo vplyvom disipačnej energie, tak na čas vulkanizácie. Ponúka vhodný smer pri nastavení procesných podmienok vstrekovania, pre minimalizáciu vulkanizačného času pri znalosti indexu nenevtonského chovania materiálu. Druhá časť sa zaoberá vplyvom prierezu tokových kanálov na výsledný vulkanizačný čas, pričom bol použitý 100 mm dlhý tokový kanál s lichobežníkovým a kruhovým tvarom prierezu. Analýzy boli počítané ako pre úzky (7mm^2), tak pre široký (15mm^2) prierez. Výstupom druhej časti je diskusia vhodnosti použitia daných prierezov. Tretia časť analýz pojednáva o vplyve dĺžky rozvodných kanálov na čas vulkanizácie. Bol použitý kanál s lichobežníkovým tvarom prierezu pri ploche 7mm^2 s variáciou v dĺžke 100 mm a 200 mm. V diskusii sú rozobrané výhody a nevýhody jednotlivých kanálov.

K reálnej časti experimentu boli použité dve dĺžky a dva prierezy tokových kanálov (100 mm - úzky, 100 mm - široký, 200 mm - úzky, 200 mm - široký). Pomocou skúšky tvrdosti bol zisťovaný vplyv geometrie tokových kanálov na výsledné, mechanické vlastnosti vulkanizátu. Rovnaká geometria tokového systému bola použitá pri výrobe teliesok na ťahovú skúšku.

Pre znalosť tokových a vulkanizačných vlastností zmesi bolo potrebné poskytnutý materiál zmerať. K meraniu bol použitý prístroj RPA 2000 a vyhodnotený pomocou softwaru SimFit 5.0. Výstupom sú potrebné reologické a vulkanizačné parametre zadávané pri tvorbe nového materiálu v programe Cadmould 3D-F, určeného k tokovým analýzám.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav a Zdeněk HRDLIČKA. *Gumárenské suroviny a jejich zpracování*. Vyd. 4., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2009, 199 s. ISBN 978-80-7080-713-2.
- [2] DVOŘÁK, Z., *Zpracovatelské procesy gumárenské, pro konstrukční směry*. Elektronická skripta FT, Zlín, UTB, 2007.
- [3] MALÁČ, J. *Gumárenská technologie*. sůbor prednášok v elektronickej podobe, FT, Zlín, UTB, 2005.
- [4] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011, 276 s. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [5] LUKOVICS, Imrich. *Konstrukční materiály a technologie*. 1. vyd. Brno: VUT, 1992, 273 s. ISBN 8021403993.
- [6] BROWN, Roger. *Physical testing of rubber*. 4th ed. New York, NY: Springer, 2006, viii, 387 s. ISBN 0387282866.
- [7] SOMMER, John G. *Engineered rubber products*. Munich: Hanser, c2009, ix, 181 s. ISBN 978-1-56990-433-6.
- [8] ALGER, Mark S. *Polymer science dictionary*. London: Elsevier Applied Science, 1989, xii, 532 s. ISBN 1-85166-220-0.
- [9] PREKOP, Štefan. *Gumárska technológia I*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita, 1998, 282 s. ISBN 8071004839.
- [10] PREKOP, Štefan. *Gumárska technológia II*. Vyd. 1. Trenčín: GC TECH Ing. Peter Gerši, 2003, 370 s. ISBN 808891485x.
- [11] EIRICH, F, Burak ERMAN a James E MARK. *Science and technology of rubber*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2005, xvii, 743 s. ISBN 0124647863.
- [12] LIMPER, Andreas. *Mixing of rubber compounds*. Munich: Hanser Publishers, c2012, xi, 239 s. ISBN 978-3-446-41743-4.
- [23] MANAS-ZLOCZOWER, Ica. *Mixing and compounding of polymers: theory and practice*. 2nd ed. Munich: Hanser Publishers, 2009, xxvii, 1158 s. ISBN 978-1-56990-424-4.

- [14] MAŇAS, Miroslav, Michal STANĚK a David MAŇAS. *Výrobní stroje a zařízení I.* Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007, 264 s. ISBN 978-80-7318-596-1.
- [15] KUTA, Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracovávání kaučuků a plastů.* Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technolog., 1999, 203 s. ISBN 80-7080-367-3.
- [36] DICK, John S. *Basic rubber testing: selecting methods for a rubber test program.* West Conshohocken, PA: ASTM, c2003, xviii, 236 s. ISBN 0803133588.
- [17] WILCZYNSKI, Ondřej a Richard POSPÍŠIL. *RPA 2000 – universal tool for rubber industry.* *Plasty a kaučuk*, 2008, vol. 45, iss. 11-12, s. 326-334. ISSN 0322-7340
- [18] WEIN, Ondřej. *Úvod do reologie.* 1. vyd. Brno: VUT, 1996, 84 s.
- [19] VLČEK, Jiří a Miroslav MAŇAS. *Aplikovaná reologie.* Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2001, 144 s. ISBN 8073180391.
- [20] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. *Fyzika polymerů: struktura a vlastnosti polymerních materiálů.* 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 306 s.
- [21] DVOŘÁK, Zdeněk a Jakub JAVOŘÍK. *Konstrukce výrobků, Konstrukční materiály elastomerní a formy pro jejich výrobu.* Elektronická skripta FT, Zlín, UTB, 20011.
- [22] TOMIS, František. *Gumárenská a plastikářská technologie: zpracovatelské procesy.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1987, 289 s.
- [23] PYE, R. *Injection mould design: for thermoplastics.* 1st ed. London: Iliffe Books, 1968, 417 s.
- [24] BOBČÍK, Ladislav. *Formy pro zpracování plastů: vstřikování termoplastů.* 2. opr. vyd. Brno: Uniplast, 1999, 133 s.
- [25] HANULÍK, Radomil. *Speciální technologie: zhotovování pryžových polotovarů a výrobků : učebnice pro třetí ročník oboru Zpracování usní, plastů a pryže - zpracovatelské technologie (plast, pryž).* Vyd. 1. Zlín: [Radomil Hanulík], 2006, 135 s.
- [26] MAŇAS, Miroslav, František TOMIS a Josef HELŠTÝN. *Výrobní stroje a zařízení: gumárenské a plastikářské stroje.* Brno: VUT, 1990, 199 s. ISBN 802140213x.

- [27] HUBA, Jakub. *Využití Reverzního inženýrství pro konstrukci vstřikovacích forem*. 2011, Bakalářská práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Vedúci práce: Kamil Kyas.
- [28] TOMIS, František a František RULÍK. *Gumárenské a plastikářské stroje*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981, 216 s.
- [29] KUBÍK, Josef a Arnošt ZYTKA. *Zkušební metody v gumárenství*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962, 297 s.
- [30] Prednášky z predmetu *T7AR – Aplikovaná reologie*
- [31] Dostupné on-line: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech/Reologie.pdf>
- [32] SCHÄTZ, Miroslav a Petr VONDRÁČEK. *Zkoušení polymerů*. 2., přepr. a dopl. vyd. Praha: VŠCHT, 1988, 276 s.
- [33] ČSN EN ISO 7619-1 (621432). *Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer - Stanovení tvrdosti vtláčováním - Část 1: Stanovení tvrdoměrem (tvrdost Shore)*. Praha : Český normalizační institut, EAN 8590963883090, 16 s.
- [34] ČSN EN ISO 23529 (621401). *Pryž - Obecné postupy pro přípravu a kondicionování zkušebních těles pro fyzikální metody zkoušení*. Praha : Český normalizační institut, EAN 8590963883175, 20 s.
- [35] ČSN EN ISO 48 (621433). *Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer - Stanovení tvrdosti (tvrdost mezi 10 IRHD a 100 IRHD)*. Praha : Český normalizační institut, EAN 8590963893303, 28 s.
- [36] RŮŽIČKA, Karel a Ladislav POSPÍŠIL. *Směrnice pro konstrukci vstřikovacích forem I*. Gottwaldov: VÚGPT, 1979, 202 s.

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

kg	Kilogram
%	Percento
>	Symbol nerovnosti (väčšie než)
<	Symbol nerovnosti (menšie než)
Δ	Dielov na sto dielov kaučuku
t	Čas
s	Sekunda
λ	Relaxačný čas
n	Index neneutonského chovania
$^{\circ}\text{ML}$	Viskozita Mooney (pri použití štandardného rotoru)
$^{\circ}\text{C}$	Stupeň Celzia
ot	Otázky
min	Minúta
kN	Kilonewton
kJ	Kilojoul
tzv	Takzvané, inak povedané
dNm	Decinewtnometrov
RPA	Rubber Process Analyzer
Hz	Hertz
$^{\circ}$	Stupne
ShA	Jednotka tvrdosti Shore pri metóde merania A
IRHD	International Rubber Hardness Degress
mN	Milnewton
Si	Kremík

Fe	Železo
Cu	Meď
Mn	Mangán
Mg	Horčík
Cr	Chróm
Zn	Zinok
Ti	Titan
Zr	Zirkón
HB	Tvrdość podľa Brinella
K	Kelvin
mm ²	Milimeter štvorcový
cm ²	Centimeter kubický

ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr. 1 – Získavanie prírodného latexu.....</i>	14
<i>Obr. 2 – Kelvinov (hore) a Maxwellov (dole) matematický model</i>	18
<i>Obr. 3 – Tuckettov matematický model</i>	19
<i>Obr. 4 – Tokové krivky</i>	20
<i>Obr. 5 – Znázornenie vplyvu relaxačného času.....</i>	21
<i>Obr. 6 – Znázornenie vplyvu indexu nenewtonského chovania</i>	22
<i>Obr. 7 – Meranie viskozity Mooney</i>	23
<i>Obr. 8 – Viskozimeter Mooney.....</i>	24
<i>Obr. 9 – Princíp vytvorenia priečnej siete [11].....</i>	25
<i>Obr. 10 – Vulkanometer Monsanto</i>	26
<i>Obr. 11 – Vulkanometer Mooney</i>	26
<i>Obr. 12 – Priebeh vulkanizácie.....</i>	27
<i>Obr. 13 – Miešanie.....</i>	29
<i>Obr. 14 – Distribučné miešanie</i>	30
<i>Obr. 15 – Princíp miešania pomocou statického mixéra Kenics</i>	30
<i>Obr. 16 – Disperzné miešanie.....</i>	31
<i>Obr. 17 – Druhy konštrukcií uzatváracích jednotiek [27]</i>	33
<i>Obr. 18 – Princíp hydraulicko-mechanického uzatvárania formy [27].....</i>	33
<i>Obr. 19 – Šírenie tepla prierezom formy.....</i>	35
<i>Obr. 20 – Vstrekovací cyklus</i>	35
<i>Obr. 21 – Ťahový diagram pryže (rozdielne moduly – rovnaká ťažnosť).....</i>	36
<i>Obr. 22 – Tvar čelustí trhacieho stroja [6].....</i>	38
<i>Obr. 23 – Schéma tvrdomeru Shore A a rozmery podľa ČSN ISO 7619-1</i>	39
<i>Obr. 24 – Rubber Process Analyzer RPA 2000</i>	45
<i>Obr. 25 – REP V27 Y125.....</i>	46
<i>Obr. 26 – Tvarové dosky vstrekovacej formy</i>	47
<i>Obr. 27 – Zvolené podmienky v Mesh Prepare.....</i>	48
<i>Obr. 28 – Rozmiestnenie senzorov pri krátkych a dlhých kanáloch</i>	48
<i>Obr. 29 – Sprístupnenie vnútorných výsledkov.....</i>	49
<i>Obr. 30 – Závislosť tvrdosti na hrúbke.....</i>	50
<i>Obr. 31 – Znázornená zmena tvrdosti (metóda Shore A)</i>	51
<i>Obr. 32 – Affri Systém tvrdoměr IRHD.....</i>	52

<i>Obr. 33 – Deliaci stroj Fortuna UAF 470.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 34 – Základné rozmery stroja Zwick/Roell Z005.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 35 – Import nameraných dát do programu Simfit 5.0.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 36 – Aproximácia vstupných dát v podobe potrebných parametrov.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 37 – Diagram závislosti viskozity na intenzite šmykového toku v meranej zmesi.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 38 – Diagram závislosti rýchlosti vulkanizácie na čase v meranej zmesi.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 39 – Štúdie výšky nákladov realizo-</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 40 – Umiestnenie senzorov na tokovom kanále</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 41 – Teplota po hrúbke vtokového ústia pri zmene P_3 ($T = 170^{\circ}\text{C}$, $v = 5\text{mm/s}$).....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 42 - Teplota po hrúbke vtokového ústia pri zmene P_3 ($T = 170^{\circ}\text{C}$, $v = 10\text{ mm/s}$).....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 43 - Teplota po hrúbke vtokového ústia pri zmene P_3 ($T = 170^{\circ}\text{C}$, $v = 15\text{ mm/s}$).....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 44 – Teplota po hrúbke vtokového ústia pri zmene P_3 ($T = 170^{\circ}\text{C}$, $v = 20\text{mm/s}$).....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 45 – Teplota po hrúbke vtokového ústia pri zmene P_3 ($T = 170^{\circ}\text{C}$, $v = 30\text{mm/s}$).....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 46 – Porovnanie teplotných profilov pri $v = 5$ (vľavo) a $v = 30$ (vpravo)</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 47 – Umiestnenie senzorov na tokovom kanále</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 48 – Graf závislosti prierezu tokového kanálu na čase vulkanizácie (155°C)</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 49 – Porovnanie teploty v senzoch pri úzkom a širokom priereze (155°C)</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 50 – Graf závislosti prierezu tokového kanálu na čase vulkanizácie (170°C)</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 51 – Porovnanie teploty v senzoch pri úzkom a širokom priereze (170°C)</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 52 - Graf závislosti prierezu tokového kanálu na čase vulkanizácie (155°C)</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 53 – Porovnanie teploty v senzoch pri úzkom a širokom priereze (185°C)</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 54 – Najvzdialenejší bod tokových kanálov.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 55 – T pri kruhovom (vľavo) a lichobežníkovom (vpravo) kanáli (170°C, $v = 5$).....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 56 - T pri kruhovo (vľavo) a lichobežníkovom (vpravo) kanáli (170°C, $v = 250$)</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 57 – Grafické porovnanie času vulkanizácie pri rýchlosti $v = 5\text{ mm/s}$.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 58 – Umiestnenie senzorov na tokovom kanále</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 59 – Graf závislosti času vulkanizácie na rýchlosti vstrekovania ($T = 155^{\circ}\text{C}$)</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 60 – Graf závislosti času vulkanizácie na rýchlosti vstrekovania ($T = 170^{\circ}\text{C}$)</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 61 – Graf závislosti času vulkanizácie na rýchlosti vstrekovania ($T = 185^{\circ}\text{C}$)</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 62 – Porovnanie vulkanizačného času</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 63 – Teplotné pole vo vtokovom ústí pri 100 mm (vľavo) a 200 mm (vpravo).....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 64 – Vulkanizácia vo vtokovom ústí pri 100 mm (vľavo) a 200 mm (vpravo).....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 65 – Bezzubý rotačný nôž</i>	<i>88</i>

<i>Obr. 66 – Upínacie zariadenie vrátane suportu</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 67 – Vizualizácia upínacieho zariadenia</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 68 – Jednotlivé rozrezané vrstvy a znázornené merané plochy</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 69 – Podmienka merania min. 12 mm od kraja</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 70 – Znázornená tvrdosť v jednotlivých vrstvách (A1, B1)</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 71 – Znázornená tvrdosť v jednotlivých vrstvách (A2, B2)</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 72 – Znázornená tvrdosť v jednotlivých vrstvách (A3, B3)</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 73 – Znázornená tvrdosť v jednotlivých vrstvách (A4, B4)</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 74 – Znázornená tvrdosť v jednotlivých vrstvách (A5, B5)</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 75 – Znázornená tvrdosť v jednotlivých vrstvách (A6, B6)</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 76 – Tvrdosť vo vrstvách pri širokom priereze a rôznych proces. podmienkach</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 77 – Tvrdosť vo vrstvách pri úzkom priereze a rôznych proces. podmienkach</i>	<i>98</i>
<i>Obr. 78 – Vyhodnotená tvrdosť pre 100 mm (A) dlhý rozvodný kanál</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 79 – Vyhodnotená tvrdosť pre 200 mm (B) dlhý rozvodný kanál</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 80 – Jednotlivé rozřezané vrstvy</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 81 – Výroba skúšobných teliesok</i>	<i>101</i>

ZOZNAM TABULIEK

<i>Tab. 1 – Skratky a relatívna spotreba najbežnejšie používaných kaučukov [4]</i>	13
<i>Tab. 2 – Medzinárodná klasifikácia kaučukov do základných skupín</i>	15
<i>Tab. 3 – Väzbová energia chemických väzieb [10]</i>	25
<i>Tab. 4 – Normalizované rozmery skúšobných teliesok (lopatky) [6]</i>	37
<i>Tab. 5 – Reecem zaznamenané predĺženie skúšobného krúžku [6]</i>	37
<i>Tab. 6 – Tolerancia hrúbky skúšobného telesa [34]</i>	40
<i>Tab. 7 – Podmienky metódy M podľa normy ČSN EN ISO 48 [35]</i>	41
<i>Tab. 8 – Rozdelenie metód meraní IRHD, podľa normy ČSN EN ISO 48 [35]</i>	42
<i>Tab. 9 – Minimálna vzdialenosť bodu merania od kraja</i>	42
<i>Tab. 10 – Obsah chemických prvkov v materiálu EN AW 7022</i>	46
<i>Tab. 11 – Vlastnosti EN AW 7022</i>	47
<i>Tab. 12 – Parametre stroja a ich význam</i>	49
<i>Tab. 13 – Tvrdomer IRHD</i>	51
<i>Tab. 14 – Technické dáta k prístroju Zwick/Roell Z005</i>	53
<i>Tab. 15 – Reologické vlastnosti</i>	55
<i>Tab. 16 – Vulkanizačné vlastnosti</i>	56
<i>Tab. 17 – Informácie o výpočtovom zariadení</i>	58
<i>Tab. 18 – Geometria tokového kanálu a procesné podmienky</i>	59
<i>Tab. 19 – Reologické vlastnosti zmesi</i>	60
<i>Tab. 20 – Vulkanizačné vlastnosti zmesi</i>	60
<i>Tab. 21 – Procesné podmienky 1. úlohy</i>	60
<i>Tab. 22 – Výsledky zo simulácií pri rýchlosti (piestu) $v = 5 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$</i>	61
<i>Tab. 23 – Generované šmykové napätie vo vtokovom ústí ($T = 170 \text{ °C}$)</i>	61
<i>Tab. 24 – Výsledky zo simulácií pri rýchlosti (piestu) $v = 10 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$</i>	62
<i>Tab. 25 – Generované šmykové napätie vo vtokovom ústí ($T = 170 \text{ °C}$)</i>	62
<i>Tab. 26 – Výsledky zo simulácií pri rýchlosti (piestu) $v = 15 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$</i>	63
<i>Tab. 27 – Generované šmykové napätie vo vtokovom ústí ($T = 170 \text{ °C}$)</i>	63
<i>Tab. 28 – Výsledky zo simulácií pri rýchlosti (piestu) $v = 20 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$</i>	64
<i>Tab. 29 – Generované šmykové napätie vo vtokovom ústí ($T = 170 \text{ °C}$)</i>	64
<i>Tab. 30 – Výsledky zo simulácií pri rýchlosti (piestu) $v = 30 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$</i>	65
<i>Tab. 31 – Generované šmykové napätie vo vtokovom ústí ($T = 170 \text{ °C}$)</i>	65
<i>Tab. 32 – Hodnoty vybraných indexov neneutonského chovania pri $v = (5, 30) \text{ mm/s}$</i>	66

<i>Tab. 33 – Geometria vtokových kanálov</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 34 – Procesné podmienky 2. úlohy</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 35 – Čas vstrekovania pri 155 °C</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 36 – Čas potrebný na vytvorenie 90% priečných väzieb</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 37 – Vývin teplotného poľa vo vtokovom systéme (úzke prierezy – 155 °C)</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 38 – Vývin teplotného poľa vo vtokovom systéme (široké prierezy – 155 °C)</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 39 – Čas vstrekovania pri 170 °C</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 40 – Čas potrebný na vytvorenie 90% priečných väzieb</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 41 – Vývin teplotného poľa vo vtokovom systéme (úzke prierezy – 170 °C)</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 42 – Vývin teplotného poľa vo vtokovom systéme (široké prierezy – 170 °C)</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 43 – Čas vstrekovania pri 185 °C</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 44 – Čas potrebný na vytvorenie 90 % priečných väzieb</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 45 – Vývin teplotného poľa vo vtokovom systéme (úzke prierezy – 185 °C)</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 46 – Vývin teplotného poľa vo vtokovom systéme (široké prierezy – 185 °C)</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 47 – Geometria tokových kanálov</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 48 – Procesné podmienky 3. úlohy</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 49 – Čas vstrekovania a vulkanizácie (pri 155 °C)</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 50 – Teplota v senzorech pri 100 mm a 200 mm kanále (pri 155°C)</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 51 - Čas vstrekovania a vulkanizácie (pri 170 °C)</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 52 – Teplota v senzorech pri 100 mm a 200 mm kanále (pri 170°C)</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 53 - Čas vstrekovania a vulkanizácie (pri 185 °C)</i>	<i>81</i>
<i>Tab. 54 – Teplota v senzorech pri 100 mm a 200 mm kanále (pri 185°C)</i>	<i>81</i>
<i>Tab. 55 – Použité trajektórie teploty formy a doby vstrekovania + vulkanizácie</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 56 – Nastavené parametre vstrekovacieho stroja</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 57 – Prierez použitého rozvodného kanálu a vtokového ústia</i>	<i>86</i>
<i>Tab. 58 – Použité trajektórie teploty formy a doby vstrekovania + vulkanizácie</i>	<i>86</i>
<i>Tab. 59 – Nastavené parametre vstrekovacieho stroja</i>	<i>87</i>
<i>Tab. 60 – Prierez použitého rozvodného kanálu a vtokového ústia</i>	<i>87</i>
<i>Tab. 61 – Tvrdosť vo vrstvách pre širokú geometriu a procesné podmienky A1 a B1</i>	<i>91</i>
<i>Tab. 62 – Tvrdosť vo vrstvách pre širokú geometriu a procesné podmienky A2 a B2</i>	<i>92</i>
<i>Tab. 63 – Tvrdosť vo vrstvách pre širokú geometriu a procesné podmienky A3 a B3</i>	<i>93</i>
<i>Tab. 64 – Tvrdosť vo vrstvách pre úzku geometriu a procesné podmienky A4 a B4</i>	<i>94</i>
<i>Tab. 65 – Tvrdosť vo vrstvách pre úzku geometriu a procesné podmienky A5 a B5</i>	<i>95</i>

<i>Tab. 66 – Tvrdosť vo vrstvách pre úzku geometriu a procesné podmienky A6 a B6</i>	<i>96</i>
<i>Tab. 67 – Význam číselného označovania (časy vstrekovania a vulkanizácie)</i>	<i>99</i>
<i>Tab. 68 – Rozmery skúšobného telieska</i>	<i>100</i>
<i>Tab. 69 – Procesné podmienky použité pri výrobe teliesok na ťahovú skúšku</i>	<i>101</i>
<i>Tab. 70 – Hodnoty pre krátky kanál a úzky prierez</i>	<i>102</i>
<i>Tab. 71 – Hodnoty pre krátky kanál a široký prierez.....</i>	<i>102</i>
<i>Tab. 72 – Hodnoty pre dlhý kanál a úzky prierez</i>	<i>103</i>
<i>Tab. 73 – Hodnoty pre dlhý kanál a široký prierez.....</i>	<i>103</i>

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha P I: Krátky kanál – úzky prierez

Príloha P II: Krátky kanál – široký prierez

Príloha P III: Dlhý kanál – úzky prierez

Príloha P IV: Dlhý kanál – široký prierez

CD

PRÍLOHA P I: KRÁTKY KANÁL – ÚZKY PRIEREZ



Průfprotokoll

01.03.2013

Parameter table:

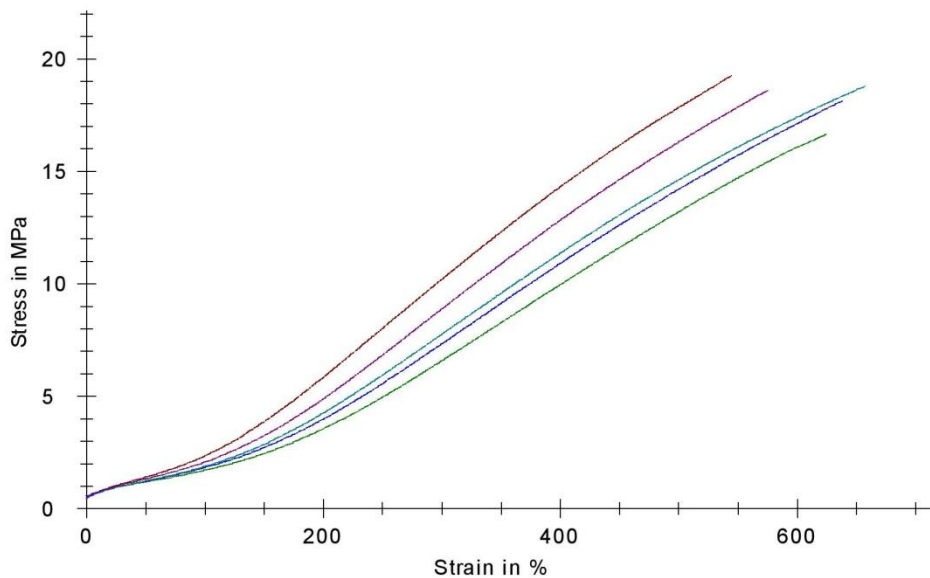
Test standard : Tensile Test S3
Test Order : UTB
Object : A5_úzký
Test ID : zkouška
Specimen # : 5

Specimen width b0 : 2 mm Ref #2 : 200 %
Gauge length L0 : 10 mm Ref #3 : 300 %
Ref #1 : 100 % Ref #4 : 400 %

Results:

Nr	RB MPa	ϵ Break %	Rp #1 MPa	Rp #2 MPa	Rp #3 MPa	Rp #4 MPa	Break-Energy-Dens. J/cm ³	a0 mm
I.	19,26	544,6	2,35	5,83	10,19	14,32	50,08	1,117
II.	18,60	575,3	2,07	4,88	8,88	12,83	50,14	1,143
III.	16,65	624,6	1,71	3,55	6,57	9,96	47,26	0,983
IV.	18,13	638,2	1,83	3,98	7,33	10,90	53,73	0,979
V.	18,78	657,1	1,89	4,25	7,75	11,36	59,12	1,153

Series graph:





Statistics:

UTB	RB	ε Break	Rp #1	Rp #2	Rp #3	Rp #4	Break-Energy-Dens.	a0
n = 5	MPa	%	MPa	MPa	MPa	MPa	J/cm ³	mm
x	18,28	608,0	1,97	4,50	8,14	11,88	52,07	1,075
s	1,00	46,6	0,25	0,89	1,42	1,72	4,56	0,087

PRÍLOHA P II: KRÁTKY KANÁL – ŠIROKÝ PRIEREZ



Průfprotokoll

01.03.2013

Parameter table:

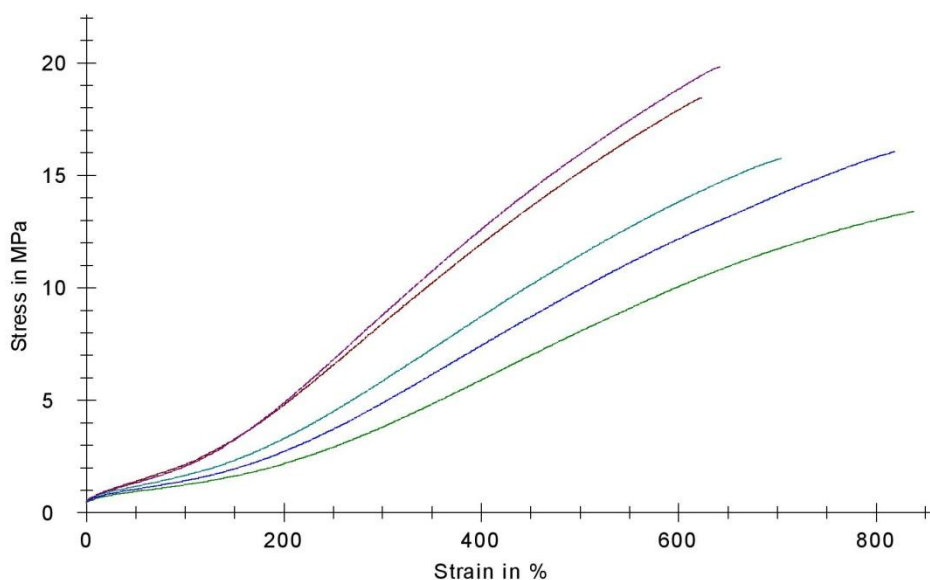
Test standard : Tensile Test S3
Test Order : UTB
Object : A5_široký
Test ID : zkouška
Specimen # : 5

Specimen width b0 : 2 mm Ref #2 : 200 %
Gauge length L0 : 10 mm Ref #3 : 300 %
Ref #1 : 100 % Ref #4 : 400 %

Results:

Nr	RB MPa	ϵ Break %	Rp #1 MPa	Rp #2 MPa	Rp #3 MPa	Rp #4 MPa	Break-Energy-Dens. J/cm ³	a0 mm
I.	19,83	641,5	2,06	4,87	8,80	12,60	61,95	1,066
II.	16,06	818,9	1,41	2,72	4,88	7,44	63,83	1,097
III.	13,39	838,5	1,23	2,17	3,80	5,89	54,79	1,183
IV.	15,74	703,7	1,65	3,29	5,85	8,72	53,52	0,936
V.	18,44	623,5	2,14	4,79	8,41	11,95	55,92	1,064

Series graph:





Statistics:

UTB	RB	ε Break	Rp #1	Rp #2	Rp #3	Rp #4	Break-Energy-Dens.	a0
n = 5	MPa	%	MPa	MPa	MPa	MPa	J/cm ³	mm
x	16,69	725,2	1,70	3,57	6,35	9,32	58,00	1,069
s	2,50	99,3	0,39	1,22	2,19	2,88	4,59	0,089

PRÍLOHA P III: DLHÝ KANÁL – ÚZKY PRIEREZ



Průfprotokoll

01.03.2013

Parameter table:

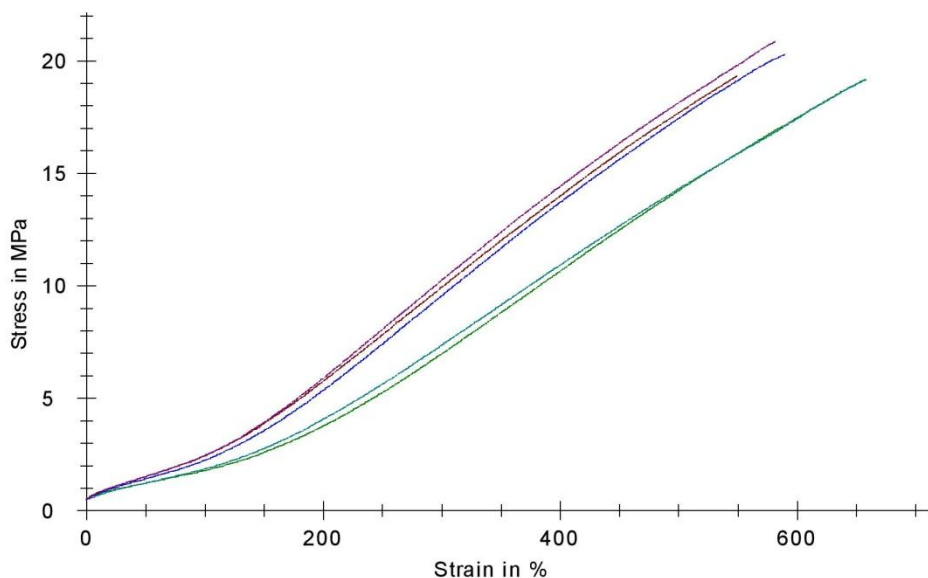
Test standard : Tensile Test S3
Test Order : UTB
Object : B5_uzky
Test ID : zkouska
Specimen # : 5

Specimen width b0 : 2 mm Ref #2 : 200 %
Gauge length L0 : 10 mm Ref #3 : 300 %
Ref #1 : 100 % Ref #4 : 400 %

Results:

Nr	RB MPa	ϵ Break %	Rp #1 MPa	Rp #2 MPa	Rp #3 MPa	Rp #4 MPa	Break-Energy-Dens. J/cm ³	a0 mm
I.	20,85	581,3	2,46	5,88	10,25	14,42	58,15	1,072
II.	19,16	657,6	1,78	3,77	6,97	10,67	56,89	0,992
III.	19,16	658,1	1,85	4,07	7,36	10,92	58,02	1,161
IV.	19,33	548,8	2,44	5,76	9,93	13,99	50,24	1,041
V.	20,30	590,0	2,24	5,35	9,55	13,72	56,80	1,082

Series graph:





Statistics:

UTB	RB	ε Break	Rp #1	Rp #2	Rp #3	Rp #4	Break-Energy-Dens.	a0
n = 5	MPa	%	MPa	MPa	MPa	MPa	J/cm ³	mm
x	19,76	607,2	2,15	4,97	8,81	12,74	56,02	1,070
s	0,77	48,7	0,32	0,98	1,53	1,80	3,29	0,062

PRÍLOHA P IV: DLHÝ KANÁL – ŠIROKÝ PRIEREZ



Průfprotokoll

01.03.2013

Parameter table:

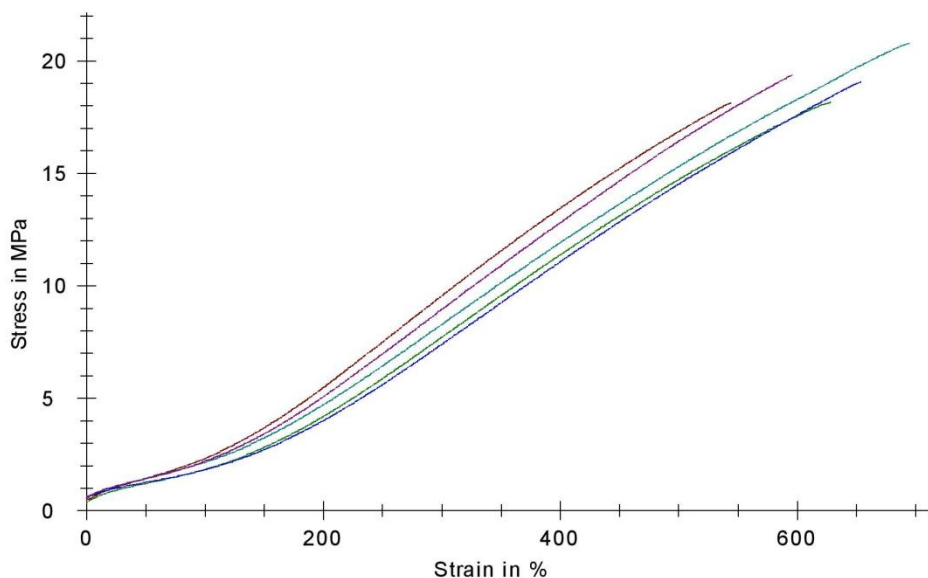
Test standard : Tensile Test S3
Test Order : UTB
Object : B5_široký
Test ID : Zkouška
Specimen # : 5

Specimen width b0 : 2 mm Ref #2 : 200 %
Gauge length L0 : 10 mm Ref #3 : 300 %
Ref #1 : 100 % Ref #4 : 400 %

Results:

Nr	RB MPa	ϵ Break %	Rp #1 MPa	Rp #2 MPa	Rp #3 MPa	Rp #4 MPa	Break-Energy-Dens. J/cm ³	a0 mm
I.	20,80	694,9	2,15	4,71	8,27	11,92	70,35	0,913
II.	18,16	628,2	1,83	4,19	7,71	11,37	53,82	1,508
III.	18,14	544,4	2,31	5,47	9,55	13,45	47,20	1,360
IV.	19,07	653,8	1,81	4,00	7,39	11,07	57,68	0,952
V.	19,39	596,2	2,20	5,06	8,97	12,80	54,69	0,958

Series graph:





Statistics:

UTB	RB	ε Break	Rp #1	Rp #2	Rp #3	Rp #4	Break-Energy-Dens.	a0
n = 5	MPa	%	MPa	MPa	MPa	MPa	J/cm ³	mm
x	19,11	623,5	2,06	4,69	8,38	12,12	56,75	1,138
s	1,09	57,1	0,23	0,61	0,89	0,99	8,51	0,275