

Ing. Kamil Kyas

**Vliv geometrie tokových cest vstřikovacího nástroje na
vlastnosti gumárenské směsi**

**The influence of runner's geometry on rubber
compound properties**

DIZERTAČNÍ PRÁCE

Program: P3909 Procesní inženýrství

Obor: 3909V013 Nástroje a procesy

Školitel: Ing. Michal Staněk, Ph.D.

Zlín: 2013

Motto:

„I have no special talents. I am only passionately curious.“

Albert Einstein, March 11, 1952

„Člověk mnoho vydrží, má-li cíl.“

Tomáš Garrigue Masaryk

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval mému vedoucímu Ing. Michalu Staňkovi, Ph.D. za vedení mé disertační práce, všem zaměstnancům Ústavu Výrobního Inženýrství a to zejména Ing. Jiřímu Šálkovi, Ing. Vladimíru Šumberovi, doc. Ing. Miroslavu Maňasovi, CSc., doc. Ing. Davidu Maňasovi Ph.D. i Ing. Jakubovi Černému za odbornou pomoc a cenné informace během konzultací. Dále děkuji vedení UTB ve Zlíně a FT UTB za vytvoření skvělých pracovních podmínek a AS UTB ve Zlíně za předané zkušenosti. To největší díky patří rodině, kamarádům, spolubydlícím, spoluhráčům TJ Sokola Pačlavice a doktorandům na UVI za podporu během studijních let.

ABSTRAKT

Disertační práce se zabývá studiem vlivu délky a tvaru vtokových kanálů nástroje na konečné vlastnosti vstříkovaného materiálu, zejména tvrdost a pevnost v tahu, za použití různých teplot stěny vstříkovací formy i rychlosti vstříkování.

Nejprve byly provedené tokové analýzy s použitím metody koncových prvků pro reologické konstanty, jako je index neneutonského chování a relaxační čas. Pomocí získaných výsledků byla navržena, zkonstruována a vyrobena testovací forma s různými tvarovými deskami, která je určena pro vstříkovací stroj elastomerních směsí REP V27 Y125.

Výsledky z tokových analýz ukázaly, jak se pro danou trajektorii mění čas nutný k získání optima vulkanizace při různých velikostech reologických parametrů. Pro dané podmínky a trajektorii bylo zjištěno, že se zvyšující se hodnotou těchto parametrů se zvyšuje teplota uvnitř kanálu pomocí disipace a tím se zkracuje doba vulkanizace.

Další výsledky z analýz byly podpořeny i praktickým výzkumem a ukázaly, že změnou šířky, délky a tvaru kanálu je možné upravit koncové vlastnosti výrobku a s použitím správné kombinace lze ušetřit čas i energie při výrobě elastomerního produktu.

Nejprve byla testována tlustostěnná tělesa ve tvaru krychle o délce hrany 30 mm, kde byly výsledky vyhodnocovány pomocí tvrdosti IRHD. Ukázalo se zde, že u kanálu, který vyvíjí větší odpor vůči toku, lze dosáhnout rychleji optima vulkanizace než u přímého krátkého kanálu. Tyto výsledky byly podpořeny ještě u vstříkování tenkostěnných těles, která měla tvar pro tahovou zkoušku a strukturální zkoušku typu Crescent. U těchto těles byla potvrzena stejná úměra jako u tlustostěnných výrobků.

Klíčová slova: vstříkování, elastomerní směs, vstříkovací forma, výpočetní analýzy, vtokový systém

ABSTRACT

This thesis deals with the influence of the length and shape of runners on the final properties of the injected material especially the hardness and tensile strength using different mould wall temperatures and different flow rates.

At first flow analysis was made for rheological constants such as the non-Newtonian behaviour and relaxation time by using the finite element method. With the help of obtained results, an injection mould with different chosen sizes of runners, used for the injection moulding machine of the rubber compound, REP V27 Y125 was devised, designed and manufactured.

The flow analysis' results show how the optimum of vulcanization is changed to any trajectory during using different amounts of rheological parameters. It was observed that with the increasing amount of these parameters temperature inside of runner rise by dissipation and the cure time is shortened for these trajectories.

Other results of the analysis were supported by practical research and showed that by changing of the width, length and shape of the runners, it is possible to arrange the final properties of the product and with using the right combination it is possible to save time and energy during production of the rubber product.

At first cube shaped thick walled products with an edge size of 30 mm were tested where results were evaluated by an IRHD test. Results show that runner which produce a higher flow resistance can receives earlier optimum of vulcanization than a simple straight channel. These results were supported more by the injection molding process of thin walled products which were shaped according to a tensile strain test and Crascent test. It was confirmed as the same proportion as in testing of thick walled product.

Keywords: injection moulding process, rubber compound, injection mould, computational analysis, runner system

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	15
1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	17
1.1 REOLOGIE KAUČUKOVÝCH SMĚSÍ.....	18
1.2 ZÁKLADNÍ MATEMATICKÉ MODEL Y	18
1.2.1 Maxwellův model	18
1.2.2 Kelvinův model	19
1.2.3 Tuckettův model	19
1.3 TOKOVÁ KŘIVKA.....	19
1.3.1 Relaxační čas	20
1.3.2 Index neneutonského chování.....	21
1.4 VSTŘIKOVÁNÍ ELASTOMERŮ	22
1.5 FONTÁNOVÝ TOK	22
1.6 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	22
1.7 VSTŘIKOVACÍ STROJ	24
1.8 VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	25
1.8.1 Temperování formy	25
1.9 HISTORIE VÝVOJE GUMÁRENSKÉHO MATERIÁLU.....	26
1.10 ROZDĚLENÍ KAUČUKU.....	27
1.10.1 Přírodní kaučuk.....	27
1.10.2 Syntetický kaučuk.....	28
1.11 KAUČUKOVÁ SMĚS.....	28
1.11.1 Kaučuk	29
1.11.2 Plniva	29
1.11.3 Vulkanizační činidla	30
1.11.4 Aktivátory a urychlovače vulkanizace	30
1.11.5 Změkčovadla.....	31
1.11.6 Zvláštní přísady	31
1.12 Míchání, tvorba a zpracování kaučukových směsí.....	31
1.13 VULKANIZACE	32
1.14 ZMĚNA VLASTNOSTÍ PŘEMĚNOU NA PRYŽ	34
1.15 VULKANIZAČNÍ KŘIVKA – ZOBRAZENÍ PRŮBĚHU VULKANIZACE	34
1.16 PRYŽ	36
1.17 TESTOVÁNÍ VLASTNOSTÍ MATERIÁLU.....	36
1.18 MĚŘENÍ VIZKOZITY MOONEY.....	36
1.18.1 Viskozimetr Mooney	37

1.19	MĚŘENÍ VULKANIZAČNÍCH CHARAKTERISTIK	38
1.19.1	Rubber Process Analyzer (RPA 2000)	39
1.20	TESTOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PRYŽOVÝCH VÝROBKŮ	39
1.21	JEDNOOŠÝ TAH.....	40
1.22	TVRDOST.....	41
1.22.1	Metoda Shore A	41
1.22.2	IRHD metoda.....	42
2	CÍL PRÁCE.....	45
3	ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	46
3.1	MODEL A VSTŘIKOVACÍ FORMA	46
3.2	VSTŘIKOVACÍ STROJ	48
3.3	TVORBA VÝPOČTOVÝCH ANALÝZ.....	50
3.4	MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY SMĚSI	51
3.4.1	Simfit 5.0	52
3.5	MECHANICKÉ ZKOUŠKY	55
3.5.1	Zkouška tvrdosti	55
3.5.2	Tahová zkouška tlustostěnných výrobků.....	58
3.5.3	Vyhodnocení dat pomocí Box-plotového diagramu	59
4	HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	61
4.1	VLIV ZMĚNY INDEXU NENEWTONSKÉHO CHOVÁNÍ NA PRŮBĚH VULKANIZACE	61
4.1.1	Rychlost pístu $v = 5$ mm/s	63
4.1.2	Rychlost pístu $v = 10$ mm/s	64
4.1.3	Rychlost pístu $v = 15$ mm/s	65
4.1.4	Rychlost pístu $v = 20$ mm/s	66
4.1.5	Rychlost pístu $v = 30$ mm/s	67
4.1.6	Shrnutí výsledků	68
4.2	VLIV ZMĚNY RELAXAČNÍHO ČASU NA PRŮBĚH VULKANIZACE.....	69
4.2.1	Rychlost pístu $v = 5$ mm/s	71
4.2.2	Rychlost pístu $v = 10$ mm/s	71
4.2.3	Rychlost pístu $v = 15$ mm/s	72
4.2.4	Rychlost pístu $v = 20$ mm/s	73
4.2.5	Rychlost pístu $v = 30$ mm/s	74
4.2.6	Shrnutí úlohy	75
4.3	VLIV PRŮŘEZU VTKOVÉHO KANÁLU NA PRŮBĚH VULKANIZACE	76
4.3.1	Teplota 155 °C.....	77
4.3.2	Teplota 170 °C.....	80
4.3.3	Teplota 185 °C.....	82
4.3.4	Diskuze výsledků.....	84

4.4	VLIV DÉLKY VTOKOVÉHO KANÁLU NA PRŮBĚH VULKANIZACE	86
4.4.1	Teplota 155 °C	87
4.4.2	Teplota 170 °C	89
4.4.3	Teplota 185°C	90
4.4.4	Diskuze výsledků úlohy	91
4.5	VLIV TVARU TOKOVÉHO KANÁLU NA PRŮBĚH VULKANIZACE	93
4.6	MĚŘENÍ DRSNOSTI VTOKOVÝCH KANÁLŮ	96
4.6.1	Trajektorie křivka, široký kanál	98
4.6.2	Přímá trajektorie, široký kanál	99
4.6.3	Přímá trajektorie, úzký kanál	100
4.6.4	Trajektorie křivka, úzký kanál	101
4.7	ZKOUŠKA TVRDOSTI TLUSTOSTĚNNÝCH VÝROBKŮ	102
4.7.1	Příprava zkušebních vzorků	102
4.7.2	Procesní podmínky a geometrie širokých rozvodných kanálů ..	103
4.7.3	Procesní podmínky a geometrie úzkých rozvodných kanálů ...	104
4.7.4	Dělení výstřiku na jednotlivé vrstvy	105
4.7.5	Kontrola teplotního ovlivnění při dělení vrstev	106
4.7.6	Zkouška tvrdosti na jednotlivých vrstvách	107
4.7.7	Porovnání široké trajektorie A, B, C při procesních podmínkách 1	109
4.7.8	Porovnání široké trajektorie A, B, C při procesních podmínkách 2	109
4.7.9	Porovnání široké trajektorie A, B, C při procesních podmínkách 3	110
4.7.10	Porovnání úzké trajektorie A, B při procesních podmínkách 4	110
4.7.11	Porovnání úzké trajektorie A, B při procesních podmínkách 5	111
4.7.12	Porovnání úzké trajektorie A, B při procesních podmínkách 6	111
4.7.13	Diskuze výsledků tvrdosti IRHD	112
4.8	TAHOVÁ ZKOUŠKA TLUSTOSTĚNNÝCH VÝROBKŮ	113
4.9	TAHOVÁ ZKOUŠKA TENKOSTĚNNÝCH VÝROBKŮ	118
5	PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI	124
6	ZÁVĚR	125
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	128
	SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA	133
	CURRICULUM VITAE	141
	SEZNAM PŘÍLOH	143
	PŘÍLOHA P I: VÝSLEDKY Z TAHOVÝCH ZKOUŠEK PRO TENKOSTĚNNÁ TĚLESA	144

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 – Kelvinův (nahore) a Maxwellův (dole) matematický model [27]</i>	18
<i>Obr. 2 – Tuckettův matematický model [27]</i>	19
<i>Obr. 3 – Tokové křivky [27].....</i>	20
<i>Obr. 4 – Materiály s různými relaxačními časy [27]</i>	21
<i>Obr. 5 – Materiály s různými indexy newtonského chování [27]</i>	21
<i>Obr. 6 – Fontánový tok</i>	22
<i>Obr. 7 – Vstřikovací cyklus elastomerních směsí</i>	23
<i>Obr. 8 – Princip vstřikovacího stroje pro elastomery [50]</i>	24
<i>Obr. 9 – Šíření tepla průřezem formy [27]</i>	26
<i>Obr. 10 – Disperzní míchání.....</i>	32
<i>Obr. 11 – Distribuční míchání</i>	32
<i>Obr. 12 – Princip vytvoření příčné sítě [22]</i>	33
<i>Obr. 13 – Průběh vulkanizace.....</i>	35
<i>Obr. 14 – Průběh měření viskozity Mooney [27]</i>	37
<i>Obr. 15 – Viskozimetr Mooney[27]</i>	37
<i>Obr. 16 – Vulkametr Monsanto</i>	38
<i>Obr. 17 – Vulkametr Mooney.....</i>	38
<i>Obr. 18 – Tahový diagram pryže (rozdílné moduly – stejná tažnost)</i>	40
<i>Obr. 19 – Schéma tvrdoměru Shore A a rozměry podle ČSN ISO 7619</i>	42
<i>Obr. 20 – Pohled do dělicí roviny formy pro tlustostěnné výrobky.....</i>	46
<i>Obr. 21 – Pohled do dělicí roviny formy pro tenkostěnné výrobky</i>	47
<i>Obr. 22 – Vstřikovací stroj REP V27 Y125.....</i>	49
<i>Obr. 23 – Zvolené podmínky v Mesh prepare.....</i>	50
<i>Obr. 24 – Rozmístění senzorů na délce kanálů.....</i>	50
<i>Obr. 25 – Zpřístupnění vnitřních výsledků</i>	51
<i>Obr. 26 – RPA 2000</i>	51
<i>Obr. 27 – Ukázka importu naměřených dat.....</i>	52
<i>Obr. 28 – Aproximace vstupních dat v podobě získaných parametrů</i>	53
<i>Obr. 29 – Diagram závislosti viskozity na intenzitě smykového toku v měřené směsi</i>	54
<i>Obr. 30 – Diagram závislosti rychlosti vulkanizace na čase v měřené směsi</i>	55
<i>Obr. 31 – Závislost tvrdosti na tloušťce.....</i>	56
<i>Obr. 32 – Zobrazení změny tvrdosti při metodě Shore A</i>	56
<i>Obr. 33 – Tvrdoměr Affri IRHD</i>	57
<i>Obr. 34 – Dělicí stroj Fortuna UAF 470</i>	58
<i>Obr. 35 – Základní rozměry stroje Zwick/Roell Z005</i>	58
<i>Obr. 36 – Box-plotový diagram [58]</i>	59
<i>Obr. 37 – Umístění senzorů ve vtokovém kanálu.....</i>	61
<i>Obr. 38 – Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_3 ($T =$ 170°C, $v = 5\text{mm/s}$)</i>	63
<i>Obr. 39 - Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_3 ($T =$ 170°C, $v = 10\text{mm/s}$)</i>	64

<i>Obr. 40 - Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_3 ($T = 170^\circ\text{C}$, $v = 15 \text{ mm/s}$)</i>	65
<i>Obr. 41 - Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_3 ($T = 170^\circ\text{C}$, $v = 20 \text{ mm/s}$)</i>	66
<i>Obr. 42 - Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_3 ($T = 170^\circ\text{C}$, $v = 30 \text{ mm/s}$)</i>	67
<i>Obr. 43 – Porovnání teplotních profilů při $v = 5 \text{ mm/s}$ (vlevo) a $v = 30 \text{ mm/s}$ (vpravo)</i>	68
<i>Obr. 44 – Umístění senzorů ve vtokovém kanálu.....</i>	69
<i>Obr. 45 – Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_2 ($T = 170^\circ\text{C}$, $v = 5 \text{ mm/s}$)</i>	71
<i>Obr. 46 – Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_2 ($T = 170^\circ\text{C}$, $v = 10 \text{ mm/s}$)</i>	72
<i>Obr. 47 – Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_2 ($T = 170^\circ\text{C}$, $v = 15 \text{ mm/s}$)</i>	73
<i>Obr. 48 – Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_2 ($T = 170^\circ\text{C}$, $v = 20 \text{ mm/s}$)</i>	74
<i>Obr. 49 – Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_2 ($T = 170^\circ\text{C}$, $v = 30 \text{ mm/s}$)</i>	74
<i>Obr. 50 – Porovnání teplotních profilů při $v = 5 \text{ mm/s}$ (vlevo) a $v = 30 \text{ mm/s}$ (vpravo)</i>	75
<i>Obr. 51 – Umístění senzorů ve vtokovém kanále.....</i>	77
<i>Obr. 52 – Graf závislosti rychlosti vstřikování a tvaru kanálu na čase vulkanizace (155°C).....</i>	78
<i>Obr. 53 – Porovnání teploty v jednotlivých senzorech při úzkém a širokém průřezu (155°C)</i>	79
<i>Obr. 54 – Graf závislosti rychlosti vstřikování a tvaru kanálu na čase vulkanizace (170°C).....</i>	80
<i>Obr. 55 – Porovnání teploty v jednotlivých senzorech při úzkém a širokém průřezu (170°C)</i>	81
<i>Obr. 56 - Graf závislosti rychlosti vstřikování a tvaru kanálu na čase vulkanizace (185°C).....</i>	82
<i>Obr. 57 – Porovnání teploty v jednotlivých senzorech při úzkém a širokém průřezu (185°C)</i>	83
<i>Obr. 58 – Nejvzdálenější bod u vtokových kanálů.....</i>	84
<i>Obr. 59 – Vývoj teploty u kruhového (vlevo) a lichoběžníkového (vpravo) kanálu (170°C, $v = 5 \text{ mm/s}$).....</i>	84
<i>Obr. 60 – Vývin teploty u kruhového (vlevo) a lichoběžníkového (vpravo) kanálu (170°C, $v = 250 \text{ mm/s}$).....</i>	85
<i>Obr. 61 – Průběh vulkanizace při rychlosti $v = 5 \text{ mm/s}$.....</i>	85
<i>Obr. 62 – Umístění senzorů na vtokovém kanále</i>	87
<i>Obr. 63 – Graf závislosti času vulkanizace na rychlosti vstřikování ($T = 155^\circ\text{C}$)</i>	88

<i>Obr. 64 – Graf závislosti času vulkanizace na rychlosti vstřikování ($T = 170\text{ }^{\circ}\text{C}$)</i>	89
<i>Obr. 65 – Graf závislosti času vulkanizace na rychlosti vstřikování ($T = 185\text{ }^{\circ}\text{C}$)</i>	91
<i>Obr. 66 – Teplotní pole ve vtokovém ústí u 100 mm (vlevo) a 200 mm (vpravo)</i>	92
<i>Obr. 67 – Vulkanizace ve vtokovém ústí u 100 mm (vlevo) a 200 mm (vpravo)</i>	92
<i>Obr. 68 – Talysurf CLI 500</i>	96
<i>Obr. 69 – Měření prvních čtyř trajektorií</i>	97
<i>Obr. 70 – Zobrazení míst měření drsnosti povrchu</i>	97
<i>Obr. 71 – Profil drsnosti u trajektorie křivka, široký kanál – měření 1</i>	98
<i>Obr. 72 – Profil drsnosti u trajektorie křivka, široký kanál – měření 2</i>	98
<i>Obr. 73 – Profil drsnosti u přímé trajektorie, široký kanál – měření 1</i>	99
<i>Obr. 74 – Profil drsnosti u přímé trajektorie, široký kanál – měření 2</i>	99
<i>Obr. 75 – Profil drsnosti u přímé trajektorie, úzký kanál – měření 1</i>	100
<i>Obr. 76 – Profil drsnosti u přímé trajektorie, úzký kanál – měření 2</i>	100
<i>Obr. 77 – Profil drsnosti u trajektorie křivka, úzký kanál – měření 1</i>	101
<i>Obr. 78 – Profil drsnosti u trajektorie křivka, úzký kanál – měření 2</i>	101
<i>Obr. 79 – Bezzubý rotační nůž</i>	106
<i>Obr. 80 – Vizualizace funkce upínacího zařízení</i>	106
<i>Obr. 81 – Vizualizace funkce upínacího zařízení</i>	107
<i>Obr. 82 – Průběh teploty v jednotlivých řezech</i>	107
<i>Obr. 83 – Jednotlivé rozřezané vrstvy a znázorněné měřené plochy I. – IV.</i>	108
<i>Obr. 84 – Podmínka měření min. 12 mm od okraje</i>	108
<i>Obr. 85 – Naměřené hodnoty zobrazené pomocí Box-plotového diagramu (A1,B1,C1)</i>	109
<i>Obr. 86 – Naměřené hodnoty zobrazené pomocí Box-plotového diagramu (A2,B2,C2)</i>	109
<i>Obr. 87 – Naměřené hodnoty zobrazené pomocí Box-plotového diagramu (A3,B3,C3)</i>	110
<i>Obr. 88 – Naměřené hodnoty zobrazené pomocí Box-plotového diagramu (A4,B4)</i>	110
<i>Obr. 89 – Naměřené hodnoty zobrazené pomocí Box-plotového diagramu (A5,B5)</i>	111
<i>Obr. 90 – Naměřené hodnoty zobrazené pomocí Box-plotového diagramu (A6,B6)</i>	111
<i>Obr. 91 – Průměrná tvrdost v širokých kanálech, shrnutí A1 – C3</i>	112
<i>Obr. 92 – Průměrná tvrdost v úzkých kanálech, shrnutí A4 – B6</i>	113
<i>Obr. 93 – Odběr zkušebních těles</i>	114
<i>Obr. 94 – Volba zkušebních těles</i>	114
<i>Obr. 95 – Tahové zkoušky pro krátký kanál a úzký průřez v jednotlivých vrstvách</i>	115

<i>Obr. 96 – Tahové zkoušky pro krátký kanál a široký průřez v jednotlivých vrstvách</i>	<i>116</i>
<i>Obr. 97 – Tahové zkoušky pro dlouhý kanál a úzký průřez v jednotlivých vrstvách</i>	<i>116</i>
<i>Obr. 98 – Tahové zkoušky pro dlouhý kanál a široký průřez v jednotlivých vrstvách</i>	<i>117</i>
<i>Obr. 99 – Příprava vzorků na tahovou zkoušku</i>	<i>119</i>
<i>Obr. 100 – Rozměry tělesa pro tahovou zkoušku dle ČSN ISO 37</i>	<i>119</i>
<i>Obr. 101 – Rozměry tělesa pro tahovou zkoušku dle ČSN 621459</i>	<i>120</i>
<i>Obr. 102 – Mez pevnosti v tahu [MPa]</i>	<i>120</i>
<i>Obr. 103 – Modul pružnosti v tahu při 300% protažení [MPa].....</i>	<i>121</i>
<i>Obr. 104 – Poměrné prodloužení [%]</i>	<i>121</i>
<i>Obr. 105 – Strukturální pevnost [N/mm]</i>	<i>122</i>
<i>Obr. 106 – Síla při přetržení [N]</i>	<i>122</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 – Zkratky a relativní spotřeba nejběžněji používaných kaučuků [18].</i>	27
<i>Tab. 2 – Mezinárodní klasifikace kaučuku do základních skupin [18]</i>	28
<i>Tab. 3 – Vazebná energie chemických vazeb [27].....</i>	33
<i>Tab. 4 – Rozměry těles pro tahovou zkoušku</i>	41
<i>Tab. 5 – Vlastnosti zkoušky tvrdosti IRHD, metoda N, H, L [38]</i>	43
<i>Tab. 6 – Vlastnosti zkoušky tvrdosti IRHD, metoda M [38].....</i>	44
<i>Tab. 7 – Rozměry zkušebního tělesa [38]</i>	44
<i>Tab. 8 – Složení slitiny použité na tvarové desky</i>	47
<i>Tab. 9 – Fyzikální vlastnosti materiálu formy</i>	47
<i>Tab. 10 – Parametry vstřikovacího stroje.....</i>	49
<i>Tab. 11 – Složení testované směsi</i>	52
<i>Tab. 12 – Reologické vlastnosti</i>	53
<i>Tab. 13 – Vulkanizační vlastnosti směsi</i>	54
<i>Tab. 14 – Vlastnosti přístroje IRHD</i>	57
<i>Tab. 15 – Základní parametry stroje Zwick/Roell Z005.....</i>	59
<i>Tab. 16 – Geometrie kanálu a procesní podmínky</i>	61
<i>Tab. 17 – Reologické vlastnosti směsi</i>	62
<i>Tab. 18 – Vulkanizační vlastnosti směsi</i>	62
<i>Tab. 19 – Procesní parametry</i>	62
<i>Tab. 20 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 5 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$..</i>	63
<i>Tab. 21 – Generované smykové napětí ve vtokovém ústí ($T = 170 \text{ °C}$).....</i>	63
<i>Tab. 22 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 10 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$</i>	64
<i>Tab. 23 – Generované smykové napětí ve vtokovém ústí ($T = 170 \text{ °C}$).....</i>	64
<i>Tab. 24 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 15 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$</i>	65
<i>Tab. 25 – Generované smykové napětí ve vtokovém ústí ($T = 170 \text{ °C}$).....</i>	65
<i>Tab. 26 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 20 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$</i>	66
<i>Tab. 27 – Generované smykové napětí ve vtokovém ústí ($T = 170 \text{ °C}$).....</i>	66
<i>Tab. 28 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 30 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$</i>	67
<i>Tab. 29 – Generované smykové napětí ve vtokovém ústí ($T = 170 \text{ °C}$).....</i>	67
<i>Tab. 30 – Rozdíl výsledných hodnot mezi materiály $n = 0,2$ a $n = 0,1$ ($T = 170 \text{ °C}$)</i>	68
<i>Tab. 31 – Geometrie kanálu a procesní podmínky</i>	69
<i>Tab. 32 – Reologické vlastnosti směsi</i>	70
<i>Tab. 33 – Vulkanizační vlastnosti směsi</i>	70
<i>Tab. 34 – Procesní parametry</i>	70
<i>Tab. 35 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 5 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$..</i>	71
<i>Tab. 36 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 10 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$</i>	71
<i>Tab. 37 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 15 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$</i>	72
<i>Tab. 38 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 20 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$</i>	73
<i>Tab. 39 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 30 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$</i>	75
<i>Tab. 40 – Rozdíl výsledných hodnot mezi materiály $\lambda = 1$ a $\lambda = 1000$ ($T = 170 \text{ °C}$)</i>	75

<i>Tab. 41 – Geometrie vtokových kanálů.....</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 42 – Procesní podmínky.....</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 43 – Čas vstřikování při 155 °C</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 44 – Čas potřebný na vytvoření 90% příčných vazeb</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 45 – Vývin teplotního pole ve vtokovém systému (úzké průřezy – 155 °C)</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 46 – Vývin teplotního pole ve vtokovém systému (široké průřezy – 155 °C)</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 47 – Čas vstřikování při 170 °C</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 48 – Čas potřebný na vytvoření 90% příčných vazeb</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 49 – Vývin teplotního pole ve vtokovém systému (úzké průřezy – 170 °C)</i>	<i>81</i>
<i>Tab. 50 – Vývin teplotního pole ve vtokovém systému (široké průřezy – 170 °C)</i>	<i>81</i>
<i>Tab. 51 – Čas vstřikování při 185 °C</i>	<i>82</i>
<i>Tab. 52 – Čas potřebný na vytvoření 90% příčných vazeb</i>	<i>82</i>
<i>Tab. 53 – Vývin teplotního pole ve vtokovém systému (úzké průřezy – 185 °C)</i>	<i>83</i>
<i>Tab. 54 – Vývin teplotního pole ve vtokovém systému (široké průřezy – 185 °C)</i>	<i>83</i>
<i>Tab. 55 – Geometrie vtokových kanálů.....</i>	<i>86</i>
<i>Tab. 56 – Procesní podmínky.....</i>	<i>87</i>
<i>Tab. 57 – Čas vstřikování a vulkanizace (při 155 °C).....</i>	<i>87</i>
<i>Tab. 58 – Teplota v senzorech při 100 mm a 200 mm kanále (při 155°C)</i>	<i>88</i>
<i>Tab. 59 - Čas vstřikování a vulkanizace (při 170 °C)</i>	<i>89</i>
<i>Tab. 60 – Teplota v senzorech při 100 mm a 200 mm kanále (při 170°C)</i>	<i>90</i>
<i>Tab. 61 - Čas vstřikování a vulkanizace (při 185 °C)</i>	<i>90</i>
<i>Tab. 62 – Teplota v senzorech při 100 mm a 200 mm kanále (při 185°C)</i>	<i>90</i>
<i>Tab. 63 – Geometrie vtokových kanálů.....</i>	<i>93</i>
<i>Tab. 64 – Procesní podmínky.....</i>	<i>94</i>
<i>Tab. 65 – Čas vstřikování a potřebný tlak pro jednotlivé trajektorie (T=155°C).....</i>	<i>94</i>
<i>Tab. 66 – Délka ohřevu k získání optima vulkanizace a teplota taveniny před vstupem do dutiny formy pro jednotlivé trajektorie (T=155°C)</i>	<i>94</i>
<i>Tab. 67 – Čas vstřikování a potřebný tlak pro jednotlivé trajektorie (T=170°C).....</i>	<i>95</i>
<i>Tab. 68 – Délka ohřevu k získání optima vulkanizace a teplota taveniny před vstupem do dutiny formy pro jednotlivé trajektorie (T=170°C)</i>	<i>95</i>
<i>Tab. 69 – Čas vstřikování a potřebný tlak pro jednotlivé trajektorie (T=185°C).....</i>	<i>95</i>
<i>Tab. 70 – Délka ohřevu k získání optima vulkanizace a teplota taveniny před vstupem do dutiny formy pro jednotlivé trajektorie (T=185°C)</i>	<i>96</i>
<i>Tab. 71 – Vyhodnocené parametry, trajektorie křivka, široký kanál [μm]</i>	<i>98</i>

<i>Tab. 72 – Vyhodnocené parametry, trajektorie přímá, široký kanál [μm]</i>	99
<i>Tab. 73 – Vyhodnocené parametry, trajektorie přímá, úzký kanál [μm]</i>	100
<i>Tab. 74 – Vyhodnocené parametry, trajektorie křivka, úzký kanál [μm]</i>	101
<i>Tab. 75 – Použité trajektorie, teplota formy, doba vstřikování a doba vulkanizace</i>	103
<i>Tab. 76 – Průřez použitého rozvodného kanálu a vtokového ústí</i>	103
<i>Tab. 77 – Nastavení parametrů vstřikovacího stroje</i>	104
<i>Tab. 78 – Použité trajektorie, teplota formy, doba vstřikování a doba vulkanizace</i>	104
<i>Tab. 79 – Nastavení parametrů vstřikovacího stroje</i>	105
<i>Tab. 80 – Průřez použitého rozvodného kanálu a vtokového ústí</i>	105
<i>Tab. 81 – Naměřené hodnoty [$^{\circ}\text{C}$]</i>	107
<i>Tab. 82 – Rozměry a tvar tahového tělesa</i>	113
<i>Tab. 83 – Nastavení procesních parametrů</i>	114
<i>Tab. 84 – Výsledné hodnoty pro krátký kanál a úzký průřez v jednotlivých vrstvách</i>	115
<i>Tab. 85 – Výsledné hodnoty pro krátký kanál a široký průřez v jednotlivých vrstvách</i>	116
<i>Tab. 86 – Výsledné hodnoty pro dlouhý kanál a úzký průřez v jednotlivých vrstvách</i>	117
<i>Tab. 87 – Výsledné hodnoty pro dlouhý kanál a široký průřez v jednotlivých vrstvách</i>	117
<i>Tab. 88 – Nastavení procesních parametrů</i>	118
<i>Tab. 89 – Parametry a nastavení vstřikovacího stroje</i>	119

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

kg	Kilogram
s	Sekunda - jednotka času
λ	Relaxační čas [s^{-1}]
n	Index neneutonského chování
$^{\circ}\text{ML}$	Viskozita Mooney (při použití standardního rotoru)
$^{\circ}\text{C}$	Stupeň celsia – jednotka teploty
ot	Otáčky [s^{-1}]
min	Minuta – jednotka času
dNm	Decinewtonmetr – jednotka síly
RPA	Rubber Process Analyzer
Hz	Hertz
$^{\circ}$	Stupeň
ShA	Jednotka tvrdosti Shore při metodě měření A
IRHD	International Rubber Hardness Degrass
Si	Křemík
Fe	Železo
Cu	Měď
Mn	Mangan
Mg	Hořčík
Cr	Chrom
Zn	Zinek
Ti	Titan
Zr	Zirkon
HB	Tvrдость podle Brinella
K	Kelvin – jednotka teploty
mm^2	Milimetr čtvereční – jednotka obsahu
cm^3	Centimetr krychlový – jednotka objemu
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
E	Youngův modul [MPa]

De	Debořino číslo
Ra	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
Rz	Největší výška profilu
CAE	Computer Aided Engineering
Q1	První kvartil
Q3	Třetí kvartil
D	Průměr
R	Rádus
x	Odhad aritmetického průměru
s	Odhad směrodatné odchylky
s ²	Odhad rozptylu
min	Minimum
max	Maximum
IQR	Interkvartilové rozpětí
MKP	Metoda konečných prvků
dsk	Díly na sto dílů kaučuku

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Technologie vstřikování patří mezi nejrozšířenější způsoby zpracování termoplastů i reaktoplastů. Tato technologie si našla svoje uplatnění i u elastomerních materiálů, i když největším konzumentem kaučuku je automobilový průmysl a to konkrétně produkce pneumatik, které jsou vyráběné konfekcí a následnou vulkanizací v lise. [1,2,5]

Vývoj vstřikování elastomerních směsí započal ve 40. letech minulého století. Od počátku proběhlo v tomto odvětví spousta inovací a zlepšení. Jedná se o velmi efektivní technologii na zpracování pryže. Umožňuje zhotovovat výrobky jednoduchých, ale také tvarově i konstrukčně náročných řešení. Tento proces je využíván pro výrobu velkosériových produktů. [2,5,6]

Prudkým vývojem počítačové techniky mohl a také začal být tento proces podporován pomocí výpočtových analýz, kde je využito matematických modelů. Pomocí teplotních a reologických modelů, které jsou využívány na tečení polymerní taveniny a relaxačních modelů, využívaných k modelování průběhu vulkanizace, může být proces plně analyzován. V citovaných člancích jsou zmíněny různé simulační softwary, které jsou vzájemně srovnávány. Také je zde doloženo, že pokud je software správně použit, lze dosáhnout téměř shodných výsledků jako v reálném procesu. Rozdíl mezi softwary je v nastavení. Pro velmi přesné výsledky lze využít pokročilých nastavení, ale tato nastavení prodlužují až několikanásobně výpočtový čas, protože se jedná o softwary, které počítají výsledek metodou konečných prvků (MKP). V praxi se tedy často využívá výpočtového softwaru pouze k získání především dílčích výsledků. [2, 3, 5, 6, 35, 43, 50]

Hlavním tématem práce je upřesnění vlivu délky a tvaru vtokového kanálu na konečný výrobek. Vtokový systém je první činitel ve vstřikovací formě, který ovlivňuje polymerní taveninu. Pokud již zde jsou kvalitně upraveny její vlastnosti, musí se tato změna projevit i na koncových vlastnostech výrobku. Mimo kvalitní výrobky je pro praxi důležité vyrobit stejné množství za kratší čas a to z důvodu úspory energií i strojních časů. Kaučukové směsi jsou polymerní materiály a jejich chování při vstřikování je označováno za pseudoplastické. Z toho důvodu je předpoklad, že čím je na materiálu kladen větší odpor proti toku, tím je zpracování složitější, je potřeba větší tlak, při jeho dodání vzniká větší smykové namáhání materiálu, které se transformuje do materiálu jako tepelná energie ve formě disipace. Druhým zdrojem tepla při vstřikování elastomerní směsi je přestup tepla ze stěny formy. Pokud se správně využije dodání energie do materiálu, může materiál do dutiny dorazit již více ohřátý, než byl vstříknut strojem do vtokového systému. Zvýšení teploty materiálu před vstupem do dutiny vede ke zkrácení vulkanizace, která je nejdelší na celém vstřikovacím cyklu. [35, 37, 62]

Z těchto důvodů se teoretická část disertační práce z velké části opírá o reologii kaučkových směsí, dále se zabývá materiálovými vlastnostmi směsi, jejím vstřikováním a v poslední řadě testováním reálných výrobků z důvodu ověření nasimulovaných výsledků.

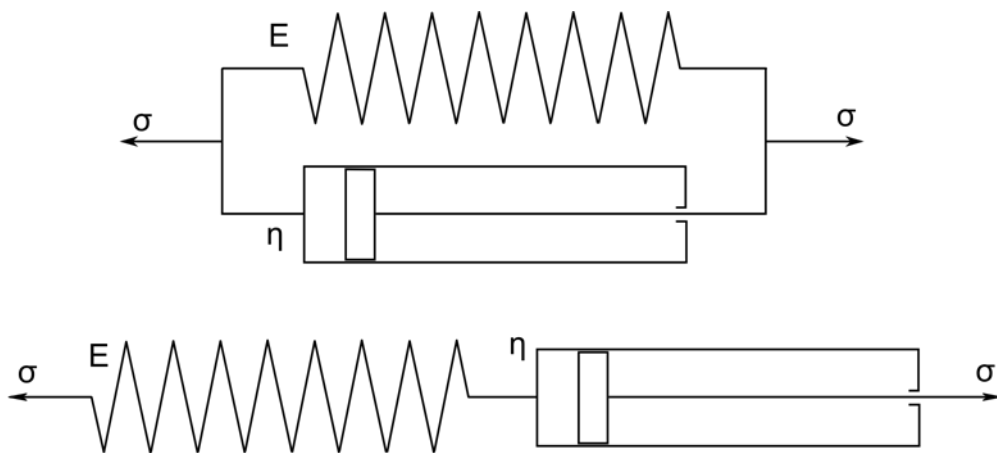
1.1 Reologie kaučkových směsí

Materiály, které se za určitých okolností chovají jako viskózní newtonské kapaliny a za jiných jako pevné hookovské látky, se nazývají viskoelastické. Aspekty, které rozhodují o jejich aktuálním stavu, jsou především délka pozorování materiálu Δt [s] a relaxační čas materiálu λ [s], který charakterizuje přechod z jednoho rovnovážného stavu do druhého. Obecně je možné tyto okolnosti charakterizovat tzv. Debořiným číslem [62, 63]:

$$De = \frac{\lambda}{\Delta t} \quad (1)$$

1.2 Základní matematické modely

Pro popis viskoelastického chování byly vypracované matematické modely. Nejjednodušší viskózní model kapaliny je Newtonský, kterému je mechanickým ekvivalentem píst. Elastický model tuhé látky je Hookovský a jeho mechanický ekvivalent je pružina. [40, 62]



Obr. 1 – Kelvinův (nahore) a Maxwellův (dole) matematický model [27]

1.2.1 Maxwellův model

Maxwellův model popisuje tok, který je komplikovaný elasticitou materiálu nebo naopak elasticitu, která odeznívá s tokem. Jedná se tedy o sériové zapojení ocelové pružiny a pístu, napětí je v obou prvcích stejné a celková deformace je rovna součtu deformujících prvků. [40, 63, 64]

$$\sigma_{pruž.} = \sigma_{pist} = \sigma \quad (2)$$

$$\gamma_{pruž} + \gamma_{píst} = \gamma \quad (3)$$

1.2.2 Kelvinův model

Při paralelním zapojení pružiny s pístem, je přechod pružiny z jednoho deformačního stavu do druhého bržděný přítomností viskózního prvku. Kelvinův model se tedy deformuje vratně, ale jeho elasticita je závislá na čase. Při Kelvinově modelu je deformace obou prvků stejná a napětí přispívají aditivně k celkovému napětí. [4, 39, 61]

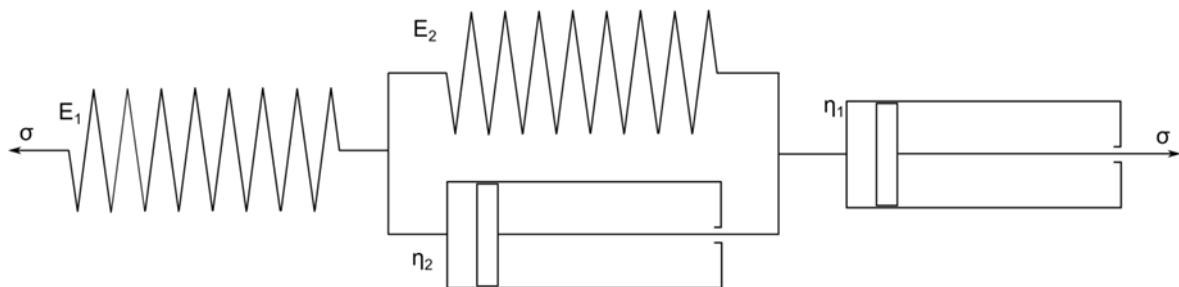
$$\sigma_{pruž.} + \sigma_{píst} = \sigma \quad (4)$$

$$\gamma_{pruž} = \gamma_{píst} = \gamma \quad (5)$$

1.2.3 Tuckettův model

Jedná se o tříparametrový model. Mezi členy zapojené v sérii (Maxwellův model) jsou zařazeny nové dva prvky zapojené paralelně (Kelvinův model). Deformace je určována třemi základními mechanizmy [20, 40, 62, 63]:

- ideálně elastickou okamžitou deformací valenčních úhlů, vazeb a mezimolekulárními vzdálenostmi,
- zpožděnou elastickou deformací polymerních klubek,
- nevratným přesunem klubek (tokem).



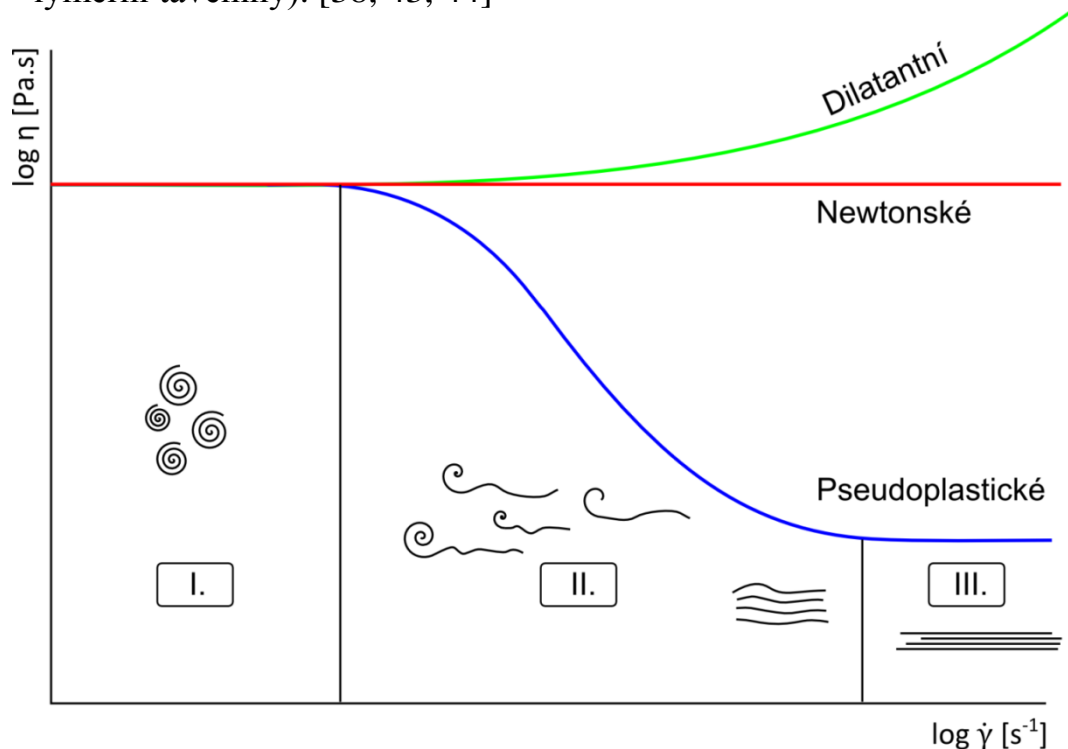
Obr. 2 – Tuckettův matematický model [27]

1.3 Toková křivka

Toková křivka udává závislost viskozity na rychlosti smykové deformace. Tokovou křivku je možné pomocí změny viskozity na rychlosti smykové deformace rozdělit na:

- newtonské, jejich viskozity jsou bez ohledu na rychlosti smykové deformace v celém rozsahu konstantní (např. voda),
- dilatantní, jejich viskozita s intenzitou smykového namáhání roste (směš škrobu s vodou v poměru 3:2),

- pseudoplastické, jejich viskozita klesá s rostoucí rychlostí deformace (polymerní taveniny). [38, 43, 44]



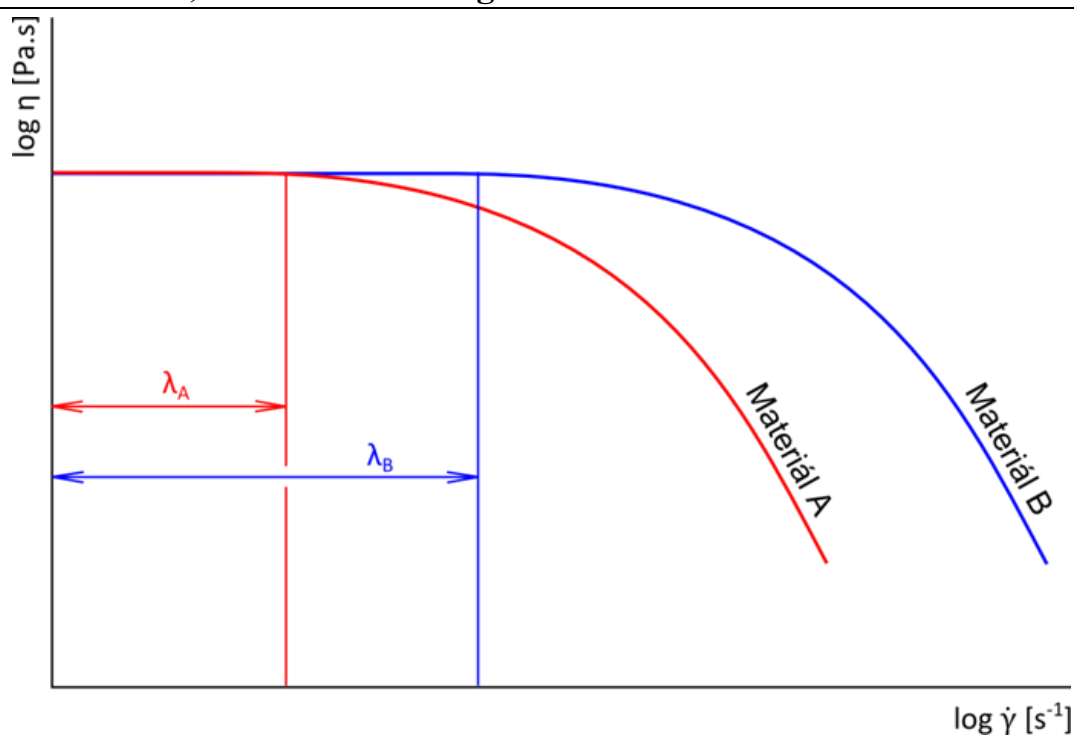
Obr. 3 – Tokové křivky [27]

Tokovou křivku pseudoplastického materiálu lze rozdělit na tři zóny:

- I. oblast maximální newtonské viskozity, zde lze považovat viskozitu za konstantní, rovnou maximální newtonské viskozitě. Makromolekuly zaujmají tvar příslušející maximální entropii systému a při toku se volně přemísťují jako celek,
- II. oblast strukturní viskozity, zde viskozita s rostoucí intenzitou smykového toku klesá. Pokles viskozity je reakcí na rozbalování se makromolekulárních klubek ve směru toku. Takto více či méně rozvinuté makromolekuly se snadněji pohybují a projevuje se to poklesem viskozity,
- III. oblast nekonečného smyku, zde, v oblasti extrémně vysokých rychlostí, se viskozita stává opět nezávislou na smykové rychlosti. To je způsobené dokonalým rozbalením makromolekulárních klubek. [27]

1.3.1 Relaxační čas

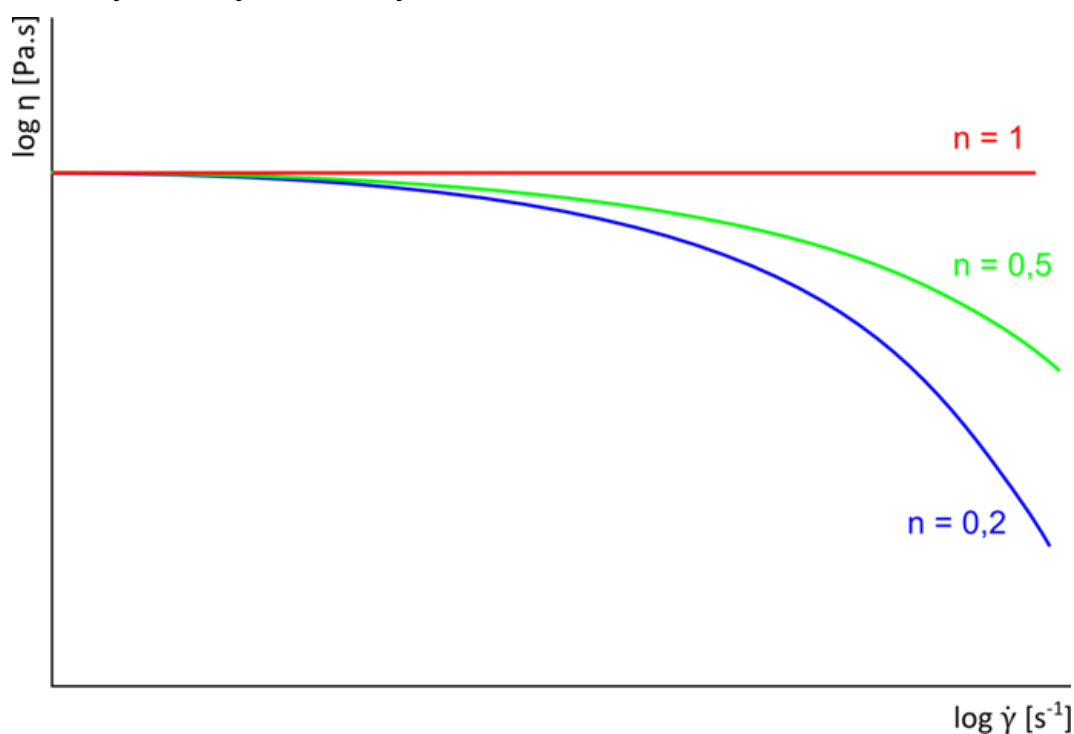
Relaxační čas je doba, kdy proběhne v materiálu 63% všech napěťových změn při přechodu z jednoho rovnovážného stavu do druhého. U tokové křivky je relaxační čas reprezentovaný délkou Newtonského platu. Na Obr. 8 jsou znázorněny dvě tokové křivky o různých parametrech λ , tedy relaxačního času. [27]



Obr. 4 – Materiály s různými relaxačními časy [27]

1.3.2 Index neneutonského chování

Polymerní tavenina patří mezi látky pseudoplastické, proto s klesající hodnotou viskozity roste rychlost smykové deformace. [27]



Obr. 5 – Materiály s různými indexy neneutonského chování [27]

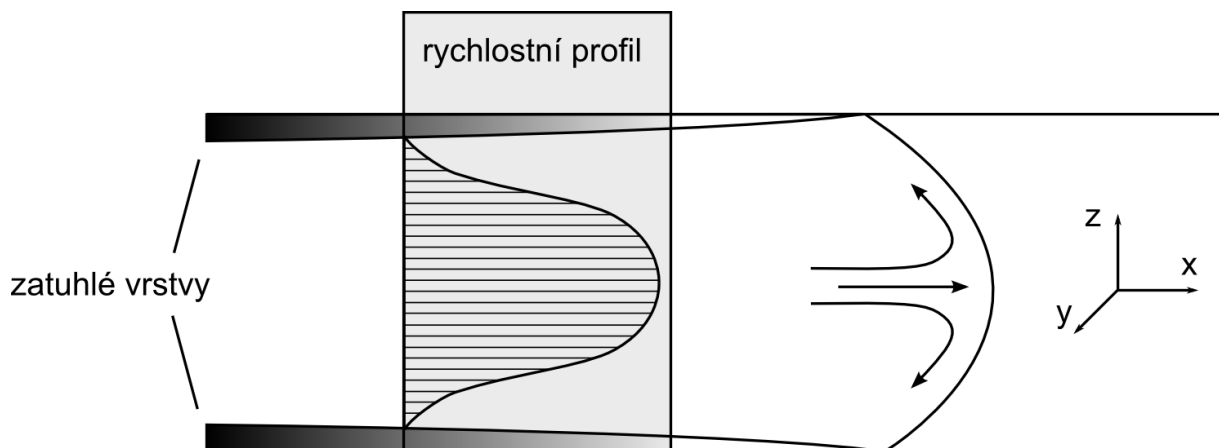
Index newtonského chování charakterizuje míru odklonu od látky newtonské, které je přiřazený index $n = 1$. S klesajícím indexem newtonského chování klesá tlak a napětí při toku. Obr. znázorňuje, že čím je odklon od newtonského chování větší, tím je odpor taveniny proti tečení při vyšších rychlostech menší. [27]

1.4 Vstřikování elastomerů

Vstřikování je způsob tváření, kdy se zplastikovaný materiál vysokou rychlostí plní (vstřikuje) do dutiny formy, která je temperovaná na určitou teplotu. Materiál se plastikuje v plastikační jednotce, která je součástí vstřikovacího stroje. Vstřikování probíhá do uzavřených forem za vysokého tlaku. [3,18,28,42]

1.5 Fontánový tok

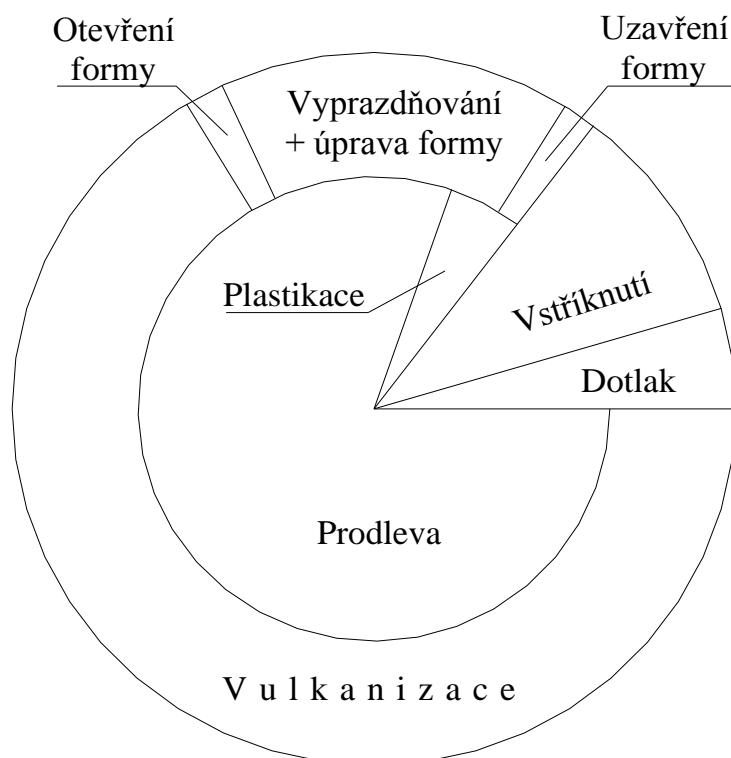
U procesu vstřikování se předpokládá fontánový tok, ten je způsoben absencí smyku vstřikovaného materiálu na stěně dutiny formy. Materiál plní dutinu je tlačěn ke stěně formy silou materiálu tekoucího ze středu proudu. Čelo taveniny se biaxiálně protahuje a nabaluje se na ohřívanou stěnu dutiny formy. Později vstupující tavenina do dutiny formy tak teče mezi již ztuhlými vrstvami, avšak s povrchovou teplotou mnohem nižší, než je teplota dutiny formy. Molekuly této taveniny se mohou volně pohybovat vpřed ve směru toku. [28, 49, 62]



Obr. 6 – Fontánový tok

1.6 Vstřikovací cyklus

Čas, po který se plní dutina formy, se nazývá doba plnění. Po zaplnění dutiny formy se působí na materiál dále tlakem, který se nazývá dotlak. Dotlak bývá stejný nebo nižší než vstřikovací tlak. Smyslem dotlaku je částečně kompenzovat vliv smrštění. [25, 55,56]



Obr. 7 – Vstříkovací cyklus elastomerních směsí

Vulkanizace by měla začít až po zaplnění dutiny. Během vulkanizace se ze syrové kaučukové směsi, za pomoci vulkanizačního činidla, zvýšené teploty a tlaku, stává elastický vulkanizát. Tato z vulkanizovaná pryž je vyhozena z formy a nechá se zchladnout na teplotu okolí. [55, 56, 58]

Časová prodleva před uzavřením formy a zahájením nového cyklu slouží pro uložení vložek do formy, případně k úpravě dutiny formy, odstranění zbytků materiálu a přetoků. Při vstříkávání elastomeru se často používá separačního prvku, který se nanese na tvarové části, aby se eliminovala lepivost směsi a vulkanizátu ke stěně formy. U plně automatizovaných procesů tato prodleva prakticky odpadá. [46,50, 58]

Technologie vstříkování byla během let vyvinuta z technologií lisování a přetlačování. Oproti svým předchůdcům má několik výhod:

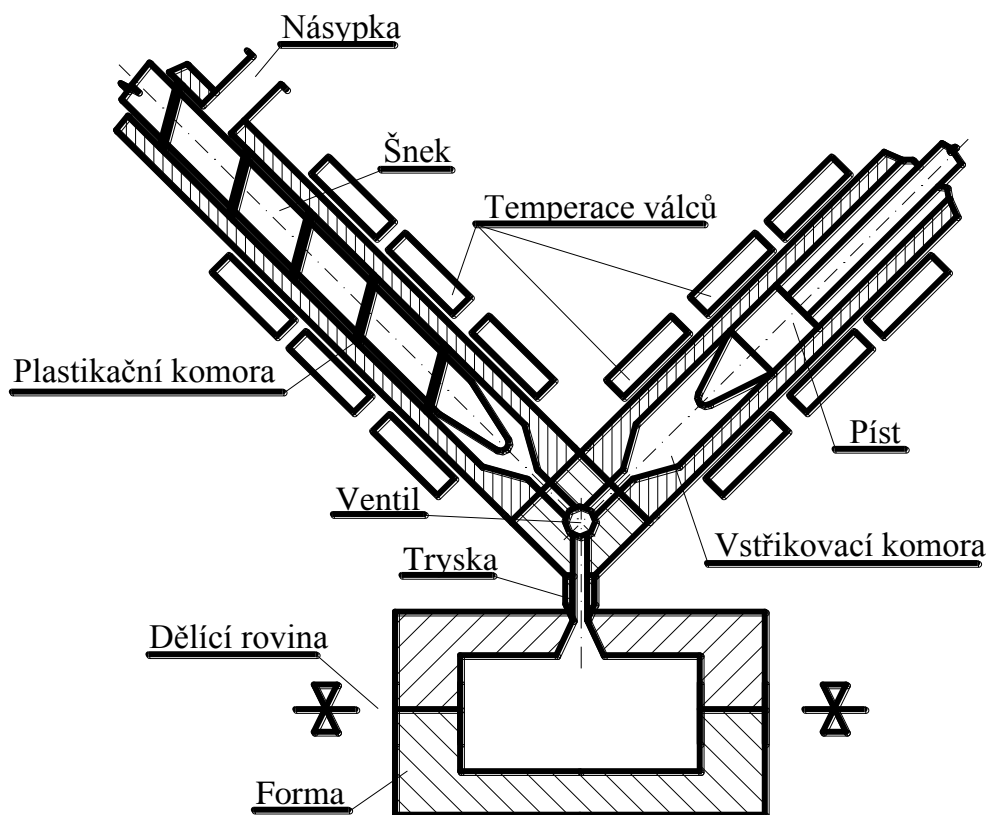
- výhoda je dána zejména úsporou času. Materiál je homogenizován v plastikační jednotce za zvýšené teploty, do formy se tedy dostává předehřátý, což vede ke zkrácení vulkanizace,
- vstříkovací stroj umí nadávkovat určité množství směsi, nevzniká odpad v podobě přetoků a nemusí být dělána navážka přesného množství směsi, tak jak je tomu u lisování. Jediným odpadem je vtokový systém,

- průběh plnění dutiny lze regulovat, jak vstřikovacím tlakem, tak dotlakem, nebo jejich kombinací,
- další výhodou je, že tento proces lze automatizovat. [46, 55, 56, 58]

1.7 Vstřikovací stroj

Stroje pro vstřikování mají mnoho důležitých funkcí. Od přípravy samotné směsi, zajištění její plastikace a dopravy, až po vystříknutí a vulkanizaci. Vše musí probíhat za přesně daných technologických podmínek, aby se předešlo vadám a cyklus byl co nejefektivnější. [10, 11, 57]

Vstřikovacích strojů existuje několik druhů, které se liší svou funkcí. Především přípravou směsi s ohledem na ohřev a dopravu materiálu a z toho plynoucí schopnost homogenizace směsi. [10, 61, 65]



Obr. 8 – Princip vstřikovacího stroje pro elastomery [50]

Podle konstrukce lze vstřikovací stroje rozdělit na: pístové, šnekové a kombinované (s předplastikací). Pro praktickou část byl použit stroje REP V27/Y125, který má oddělenou plastikační a vstřikovací komoru, tedy vstřikovací stroj kombinovaný.

Šnek plastikuje směs a dopravuje ji přes jednosměrný ventil, do oddělené vstřikovací komory. Stroje tohoto typu mohou generovat vstřikovací tlak až 25

MPa, kvalitně zpracovat vysoce viskózní materiály a efektivně plnit objemné, či vícenásobné dutiny vstříkovací formy. [51]

Materiál vstupuje do vstříkovacího stroje ve formě pásku, který lze připravit například na vytlačovacím stroji.

1.8 Vstříkovací forma

Vstříkovací forma je nástroj, který slouží k výrobě vstříkovaných výrobků (výstříků), je temperovaná a zavírána uzavírací silou. Během procesu vstříkování a dotlaku je forma přidržována přidržovací silou, která musí zabezpečit její těsnost. [10, 37, 43]

Dutina formy může být definovaná jako čas formy, která propůjčuje svůj tvar budoucímu výrobku a je definovaná dvěma členy vstříkovací formy:

- tvárnice, negativní část formy, která dává výrobku jeho vnější podobu, negativní tvar;
- tvárník, pozitivní část formy, která dává výrobku jeho vnitřní podobu, pozitivní tvar. [43, 26]

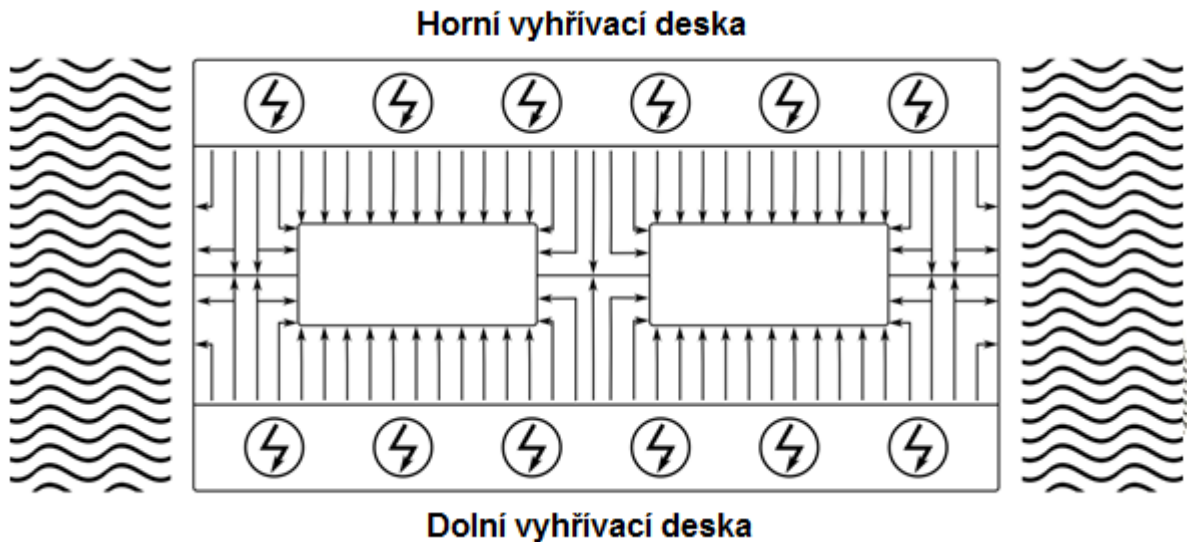
Výroba dílů vstříkováním vzniká při působení tlaku, teploty a dalších potřebných parametrů. Z toho plynou základní požadavky na stroj a formu, které spolu úzce souvisí. U formy se vyžaduje:

- vysoká přesnost a požadovaná kvalita funkčních ploch zhotovené dutiny formy a ostatních funkčních dílů,
- maximální tuhost a pevnost jednotlivých částí formy i celku pro zachycení potřebného tlaku,
- správná funkce formy, vhodný vtokový systém, vyhazování, odzdušnění, temperování a podobně,
- optimální životnost zaručená konstrukcí, materiály ale i výrobou. [10, 43]

1.8.1 Temperování formy

Podmínkou dobrých tepelných poměrů v dutině formy je nutnost umístit tvarovou dutinu formy co nejvíce do středu od formy. Pokud je forma vícenásobná, je nutné, aby jednotlivé dutiny byly zrcadlově symetrické podle osy formy. Nerovnoměrná teplota formy způsobuje nehomogenitu výrobku. Teplota formy by se měla pohybovat v rozsahu ± 2 °C. [10,45]

Jak lze vidět na obrázku 9, vstříkovací forma je temperována pomocí horní a dolní vyhřívací desky. Teplotní ztráty jsou omezeny na její obvod. [10,46]



Obr. 9 – Šíření tepla průřezem formy [27]

Aby byla dosažena plynulá regulace a stálá teplota formy, jsou ve formě instalovány teplotní senzory, které jsou napojeny na stroj, tvoří tak zpětnou vazbu a při správném nastavení regulují a udržují konstantní teplotu formy. Tyto senzory se umísťují co nejbližší dutině formy. [27,46]

1.9 Historie vývoje gumárenského materiálu

Základním stavebním materiálem v gumárenství je kaučuk. Je to elastomer schopný vulkanizace, tj. polymer, převeditelný chemickou reakcí z lineárního do rovnoměrně zesíťovaného stavu. [18,20]

První zmínku o kaučuku lze dohledat v díle „Všeobecná historie nesmírného kontinentu a ostrovů Ameriky“ španělského historika Herrera-Tordesilase. Popisuje zde hry amerických domorodců s pružnou koulí, kterou bychom dnes nazvali plným míčem. Tyto míče si američtí Indiáni zhotovovali z vyschlé tekutiny, vytékající z poraněných stromů, volně rostoucích v subtropickém pásmu Amerických ostrovů. Nazývali je „Hveve“ což v překladu znamená „Plačící strom“ odtud i latinský název „Hevea“. Do Evropy se přírodní kaučuk dostal již r. 1736 a jeho první použití bylo využito k výrobě nepromokavých plachet a hlavně pytlů pro přepravu pošty. Skutečný základ gumárenství však položil až v roce 1839 Charles Goodyear. Společně s Nathanielem Haywardem se snažili zlepšit kvalitu kaučukových výrobků a časem vypracovali postup modifikace kaučuku založený na solarizačním ohřevu s pomocí účinku oxidu siřičitého. Během dalšího výzkumu Goodyear zjistil, že síra chemicky reaguje s kaučukem a nejprve experimentálně dokázal, že směs kaučuku a síry poskytuje zahříváním produkt nových vlastností. Svůj objev přihlásil k patentování a v roce 1844 mu byl patent udělen.

Hlavní rozvoj gumárenského průmyslu nastal až po vynálezu pneumatiky. První ji patentoval v r. 1845 Robert Thomson. Byla to vlastně hadice z pogumovaného textilu, opatřená koženým pouzdrem, přišroubovaná na obvod dřevěného kola. Thomsonův vynález však našel praktické uplatnění až po r. 1888, kdy obdobnou pneumatiku, určenou pro jízdní kola patentoval John Dunlop. Byl to ovšem zásadní vynález, který umožnil další technický pokrok v dopravě a také vývoj automobilu. [17,18]

1.10 Rozdělení kaučuku

Kaučuk je základní složka, která dává jak směsi, tak z vulkanizované gumě základní charakteristické vlastnosti. Existuje široká škála kaučuků s typickými vlastnostmi, podle kterých volíme vhodný kaučuk pro danou aplikaci. [17,18]

Tab. 1 – Zkratky a relativní spotřeba nejběžněji používaných kaučuků [18]

Zkratka	Název	Spotřeba [%]	Použití
NR	přírodní kaučuk	32	pro všeobecné použití
IR	izoprenový kaučuk	3	
SBR	butadien-styrenový kaučuk	37	
EPD/EPDM	ethylen-propylenový kaučuk	7	
BR	butadienový kaučuk	10	
IIR	butylkaučuk	3	
CR	chloroprenový kaučuk	3	olejovzdorné
NBR	butadien-akrylonitrilový kaučuk	3	
ACM	akrylátový kaučuk	0,5	
OT	polysulfidový kaučuk	0,1	
MQ	silikonový kaučuk	0,1	
FPM	fluorouhlíkový kaučuk	0,1	teplavzdorné

Charakteristickou vlastností, závislou na molární hmotnosti kaučuku a její disperzitě, je jeho viskozita. Charakterizuje zpracovatelnost kaučuku, tj. schopnost být mechanicky hněten a dále zpracováván. K tomuto účelu se nejčastěji používá viskozita Mooney. Její hodnota se u tzv. přímo zpracovatelných kaučuků pohybuje většinou kolem 50 ML (1+4) při 100 °C. [18]

1.10.1 Přírodní kaučuk

Přírodní kaučuk je získávaný ze stromu *Havea brasiliensis*, který se vyskytuje v subtropickém až v tropickém páse. S umělým pěstováním tohoto stromu se začalo po roce 1900 v Jižní Americe, jihovýchodní Asii a Africe. Po nařezání stromové kůry začne vytékat bílá kapalina, nazývaná latex, která obsahuje (30 - 40)% koloidních částic kaučuku, z jednoho stromu je možné získat (5 - 25) kg kaučuku. Kaučuk se vysráží například pomocí kyseliny mravenčí, vypere vodou

a vysuší. V závislosti od sušícího média vznikne bílá krepa (teplý vzduch) nebo hnědá krepa (dým). [17,18]

Většina dodávaných typů přírodního kaučuku má vzhledem k vysoké molekulové hmotnosti vysokou viskozitu a musí být před zpracováním nejprve upraveny plastikací (tzv. mechanickým odbouráním, lámáním dlouhých řetězců, za účelem schopnosti kaučuku přijímat další přísady). Po plastikaci mají směsi obvykle dobré zpracovatelské vlastnosti, dobrou pevnost před vulkanizací (tzv. green strength), vysokou konfekční lepivost a vysokou rychlost vulkanizace.[17,18]

1.10.2 Syntetický kaučuk

Hlavními představiteli syntetických kaučuků pro běžné použití jsou homopolymery a kopolymery izoprenu a butadienu. Obsahují v hlavních řetězcích svých makromolekul dvojně vazby, jsou tedy nenasycené. Proto k jejich vulkanizaci nejčastěji využíváme elementární síru. Nejběžnějším plnivem jsou pro ně saze. [17,18]

Velký počet různých druhů průmyslově vyráběných kaučuků si vyžádal jejich klasifikaci a jejich dlouhé názvy často vedli k používání zkratk. Zavedené mezinárodní zkratky vychází z třídění kaučuku do osmi základních skupin podle chemické struktury. [17,18]

Tab. 2 – Mezinárodní klasifikace kaučuku do základních skupin [18]

Označení skupiny	Chemická struktura makromolekulárního řetězce
M	nasycený uhlovodíkový řetězec
R	nenasycený uhlovodíkový řetězec
N	řetězec obsahující atomy dusíku
O	řetězec obsahující atomy kyslíku
Q	řetězec obsahující siloxanové vazby (-Si-O-)
T	řetězec obsahující atomy síry
U	řetězec obsahující současně atomy dusíku a kyslíku
Z	řetězec obsahující současně atomy fosforu a dusíku

1.11 Kaučuková směs

Při vývoji receptury je nutné podle požadavku uvažované aplikace vybrat nejdříve vhodný kaučuk. Vlastnosti vybraného kaučuku poté modifikovat pomocí přísad a chemikálií tak, aby výsledný produkt co nejvíce vyhovoval zvoleným podmínkám, kterým bude budoucí výrobek vystavený. Řadou pomocných

látek je možné ulehčit zpracovatelnost kaučukové směsi a jinými přísadami redukovat cenu výsledné směsi. [17,18]

Jednotlivé vlastnosti kaučukové směsi není možné hodnotit izolovaně, je nutné je uvažovat ve vztahu k podmínkám budoucí aplikace, kde se mohou různé vlivy navzájem kombinovat (teplota, doba expozice, mechanické napětí, přítomnost chemikálií a jejich koncentrace atd.). [17,18]

Kaučuková směs vzniká přidáním jednotlivých přísad, které dávají konečnému výrobku žádané vlastnosti. Jsou-li vmíchány do kaučuku jen některé přísady a je vynechána některá ze složek kaučukové směsi (např. jednotlivá složka vulkanizačního systému nebo celý vulkanizační systém), je připravena předsměs. Nejběžnější jsou předsměsi složené z kaučuku, změkčovadla a plniva. Scházející složky se do předsměsi přidávají až před definitivním zpracováním kaučukové směsi a její vulkanizací. Předsměsi je možno velmi dlouho skladovat bez nebezpečí samovolného znehodnocení. Naproti tomu při dlouhodobém skladování kompletních kaučukových směsí by mohlo dojít k jejich navulkanizování. Vulkanizační systém totiž reaguje (i když pomalu) i při běžné teplotě (kolem 20 °C) a proto úplné kaučukové směsi mají omezenou dobu skladování. [17,18]

Kaučukové směsi pro vstřikování musí mít dobré tokové vlastnosti. Z toho důvodu je omezené i dávkování ztužujících plniv, které zhoršují tokové vlastnosti. Zvláště pak jsou kladené velké nároky na vulkanizační systém směsi. Požaduje se dostatečně dlouhá bezpečnost směsi a vysoká rychlost vulkanizace, což znamená, že směs může setrvat relativně delší dobu při zvýšené teplotě, vyvinuté během plastikace, bez toho, aby došlo k navulkanizování materiálu. Kaučuková směs se proto skládá z vhodného množství urychlovačů a retardérů vulkanizace.[17,18]

1.11.1 Kaučuk

Jeho obsah může být (5 - 95) %. Druh kaučuku v kaučukové směsi může být jeden (např. přírodní kaučuk), který může obsahovat jeden nebo více druhů (podle čistoty, kvality, dostupnosti, účelnosti atd.). Některé kaučukové směsi mohou obsahovat i více druhů kaučuků přírodních a syntetických. Přírodní kaučuk má význačnou lepivost a proto je největší část výrobků z technické gumy vyrobená ze směsi přírodního a různých druhů syntetických kaučuků, které mají sice výrazně horší lepivost, ale také celou řadu lepších vlastností. Míchání obou druhů kaučuků se nerealizuje tedy pouze z ekonomických důvodů, ale i z technických (ne vždy lze vyrábět kaučukové směsi z libovolných typů kaučuků). [17,18]

1.11.2 Plniva

Jejich obsah může být až 80 %. Ovlivňují vlastnosti vulkanizátu, zpracovatelské vlastnosti směsi a její cenu. Dělí se na aktivní a pasivní. Mezi tzv. aktivní plniva patří např. saze, které velmi významně zvětšují odolnost vulkanizátu vůči

oděru. Jednotlivé charakteristiky gumárenských plniv, vlastností kaučukových směsí a vulkanizátů spolu navzájem souvisí. Obecně je možné říci, že:

- zmenšením velikosti částic plniva dojde k zvýšení viskozity Mooney, pevnosti, odolnosti vůči oděru, snížení odrazové pružnosti,
- zvýšení aktivity povrchu plniva se zvýší odolnost vůči oděru a modulu při deformaci > 300%,
- zvýšením tvarového faktoru plniva se docílí zvýšení viskozity Mooney, modulu při deformaci > 300%, sníží se odrazová pružnost alepší se rozměrová stálost. [17,18]

1.11.3 Vulkanizační činidla

Vulkanizační činidla jsou chemické nebo přírodní látky, které mají schopnost chemickými vazbami spojit jednotlivé kaučukové makromolekuly v relativně krátké době. Tím se kaučuk mění na technicky použitelný materiál. Pokud se přidá urychlovač anebo směs urychlovačů, které upravují průběh a stupeň vulkanizace, aktivátory, zvýšená teplota, tlak v materiálu a dostatek času, je směs schopná vulkanizace. Obecně platí, že se vzrůstajícím množstvím síry narůstá tvrdost a klesá tažnost. Podle množství síry lze vulkanizáty rozdělit na gumu:

- měkkou: do 4 dsk síry, vyznačuje se výraznou schopností vratných deformací,
- polotvrdou: 12 – 25 dsk síry, má špatné mechanické vlastnosti a omezené použití,
- tvrdou: nad 25 dsk síry, má význačnou tvrdost, nepatrnou tažnost a omezenou ohebnost. [17,18]

1.11.4 Aktivátory a urychlovače vulkanizace

Jsou látky, které zkracují dobu vulkanizace, snižují vulkanizační teplotu a zpomalují stárnutí. Bez přidání aktivátoru by byla síra velmi málo účinným vulkanizačním činidlem. K dosažení potřebné koncentrace příčných vazeb by bylo třeba ve směsi bez aktivátoru dávkovat podstatně víc síry, proto podstata aktivátoru při vulkanizaci sírou spočívá ve zvýšení síťovací účinnosti vulkanizačního systému. Jako aktivátory se používají různé oxidy kovů: ZnO, MgO, PbO a jiné. Význam urychlovačů vulkanizace nespočívá pouze ve zrychlení procesu, ale i ve zvýšení efektivnosti vázání síry a s tím i zlepšení výsledných vlastností vulkanizátu (odolnost proti teplotě nebo proti stárnutí). Všeobecně platí, že čím je urychlovač vulkanizace aktivnější, tím menší množství se ho přidává do směsi, tím menší množství síry směs vyžaduje a tím je potřeba nižší vulkanizační teplota. Používané urychlovače je možné rozdělit podle rychlosti vulkanizace na:

- pomalé (aminy, gaunidiny),
- rychlé (tiazoly, sulfonamidy),
- velmi rychlé (tiuramy),

- ultraurychlovače (ditiokarbamáty, xantogenáty). [17,18]

1.11.5 Změkčovadla

Změkčovadla zvyšují plasticitu a usnadňují tak mechanické zpracování směsi. Pronikají mezi makromolekuly kaučuku, zvětšují jejich průměrnou vzdálenost, zmenšují propletení, omezují vnitřní tření mezi molekulami a usnadňují tak přeskupování hmoty. Vulkanizát lze pak deformovat menší silou, jsou méně tuhé, mají nižší teplotu křehnutí. Nevýhodou je, že přítomnost změkčovadla zhoršuje mechanické vlastnosti pryže. Další důvody pro použití změkčovadel jsou:

- zlepšení disperze plniv a přísad,
- snížení teploty a spotřeby energie při míchání,
- úprava fyzikálních a mechanických vlastností pryže. [17,18]

1.11.6 Zvláštní přísady

Přidávají se jen do některých kaučukových směsí pro dosažení určitých speciálních vlastností pryže nebo směsi. Patří k nim zejména: nadouvadla, pigmenty, faktisy, desodoranty, prostředky pro spojování pryže s kovy a vlákny, retardéry hoření (zhášedla), antistatické prostředky, brusný materiál, trhaviny apod. [17,18]

1.12 Míchání, tvorba a zpracování kaučukových směsí

Kaučuky není možné bezprostředně zpracovávat v hotové výrobky. Musí nejprve projít procesem přípravného zpracování, to znamená, že musí do nich být přidány a rozptýlené různé přísady, ve většině případů musí být odstraněny těkavé látky, případně další nečistoty, dle způsobu použití. [17,18]

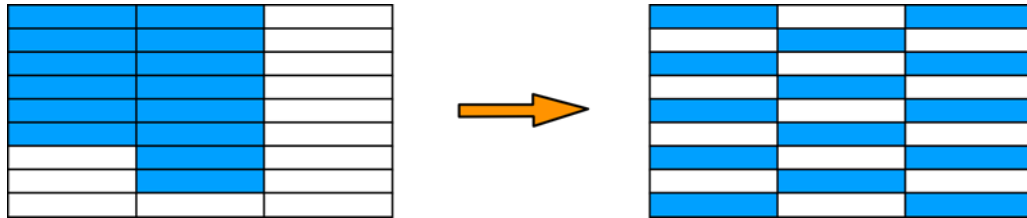
Míchání je prvním procesem při zpracování kaučukových směsí, kdy se přidává do kaučuku napřed předurčené množství různých komponentů v zařízení, kterým je hnětací stroj nebo dvouválec. Míchání představuje základ kaučukové technologie. Problémy vzniknuté špatnou přípravou směsi jsou přenášeny postupně přes jednotlivé procesy až ke konečnému produktu. Míchání může být rozdělené na tři části:

- přeprava surovin a jejich přísad s potřebným navažováním,
- míchací proces (příprava směsi),
- zpracování připravené směsi (válcování, skladování, balení).

Mnoho dodávaných komponentů je složité dávkovat a materiály jsou dodávány do míchacího procesu ve všech možných formách, jako balíky kaučuku, oleje, prášky, tvrdé živice, granule, pasty. Na přípravu hmoty s vysokým stupněm homogenity se nejvíce používá distributivní a disperzní typ míchání. [36, 37]

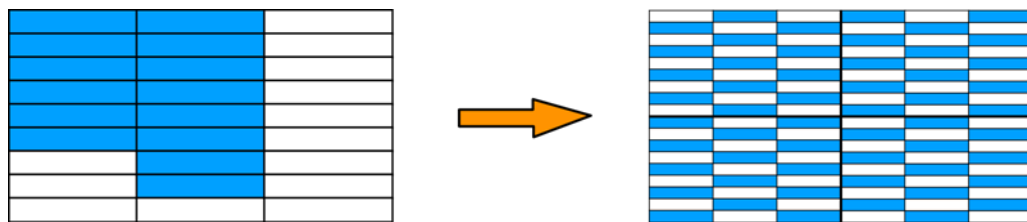
Pomocí distributivního míchání je dosaženo homogenity směsi. V případě ideálního míchání není porušena žádná částice (během procesu se nemění velikost částice), a poměr jednotlivých komponentů je v každém místě stejný.

Hnací silou změny polohy částic je tedy intenzita rotace materiálu v míchací komoře a celkový počet otáček aplikovaný na míchanou dávku. [36]



Obr. 10 – Disperzní míchání

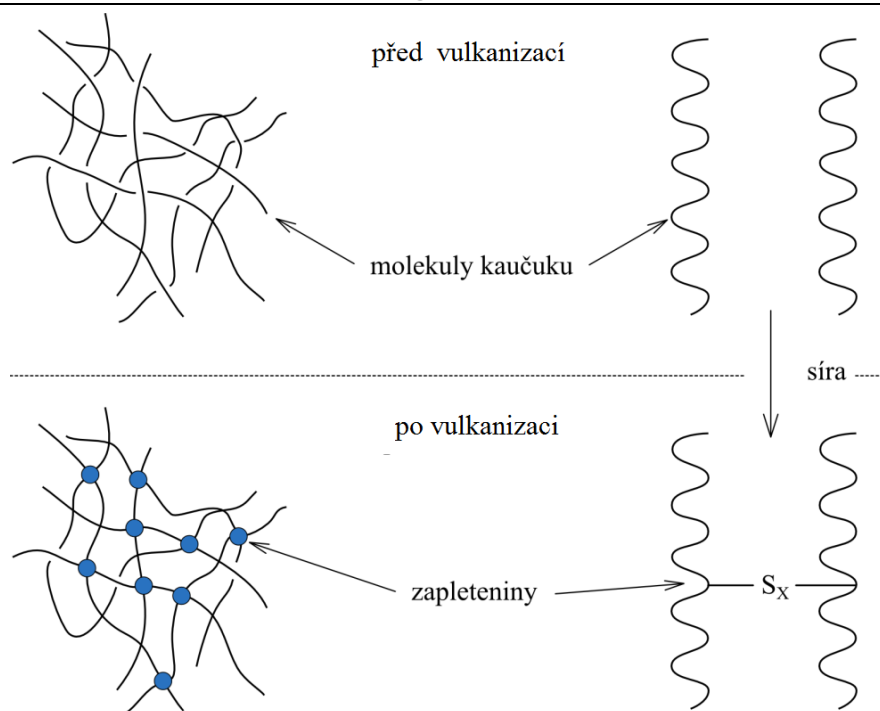
U disperzního míchání na rozdíl od distributivního dochází ke změně tvaru a velikosti částic. Ke změně velikosti většinou dochází aplikováním smykové nebo tlakové síly. Rozhodujícím faktorem pro tento typ míchání je aplikovaná síla a čas působení, závisí zde tedy na krouticím momentu anebo příkonu hnětiče.



Obr. 11 – Distribuční míchání

1.13 Vulkanizace

Proces přeměny lineárních makromolekul kaučuku na prostorově zesíťované makromolekuly se nazývá vulkanizace. Je to poslední technologický postup výroby gumárenského produktu. Zajišťuje tvar a kvalitu výrobku, která je v různé míře ovlivňovaná předcházejícími technologiemi a složením směsi. Probíhají při ní chemické reakce mezi kaučukem a ostatními složkami kaučukové směsi za vzniku chemických příčných vazeb. Koncentrace vulkanizačního činidla (např. síry, dialkylperoxidu aj.) přitom postupně klesá, téměř až na nulovou hodnotu. Optimální hustota vytvořené prostorové sítě je zajišťovaná dvěma na sebe závislými parametry – teplotou a časem. Vyjadřuje se tzv. teplotním koeficientem vulkanizace, který udává vzrůst rychlosti vulkanizace při zvýšení teploty o 10°C. Hodnoty koeficientu se pohybují v rozmezí 1,8 – 2,5 a ovlivňuje ho druh použitého kaučuku a složení směsi. [22]



Obr. 12 – Princip vytvoření příčné sítě [22]

Vulkanizací kaučuk mění prakticky všechny svoje vlastnosti. Ztrácí také rozpustnost v rozpouštědlech; pouze v nich botná, a to tím méně, čím více je z vulkanizován. Teplota skelného přechodu se vulkanizací prakticky nemění (nepatrně vzrůstá). Vulkanizací přírodního a ostatních krystalizujících kaučuků se zmenšuje sklon k jejich samovolné krystalizaci. Tím se rozšiřuje teplotní oblast použitelnosti pryže (např. u přírodního kaučuku až do teplot kolem $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$), což je v mnoha aplikacích důležité (pneumatiky v zimě). Fyzikální vlastnosti pryže, tj. vulkanizovaného kaučuku se však s teplotou mění málo. [22]

Tab. 3 – Vazebná energie chemických vazeb [27]

Typ chemické vazby		Vazební energie [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
křemík - kyslík	-Si-C-	373

Teplotní stálost vazby je daná vazbovou energií. Nejslabší spojení sice tvoří polysulfidická vazba (špatná tepelná odolnost), ale naopak dosahuje největší pevnost, která je zapříčiněná jejich různorodou délkou. [4, 9]

1.14 Změna vlastností přeměnou na pryž

Vytvořením prostorové sítě se zamezí volné pohyblivosti původních makromolekul kaučukového uhlovodíku a tím také toku v materiálu. To se projeví typickými změnami vlastností původního kaučuku, resp. kaučukové směsi, především:

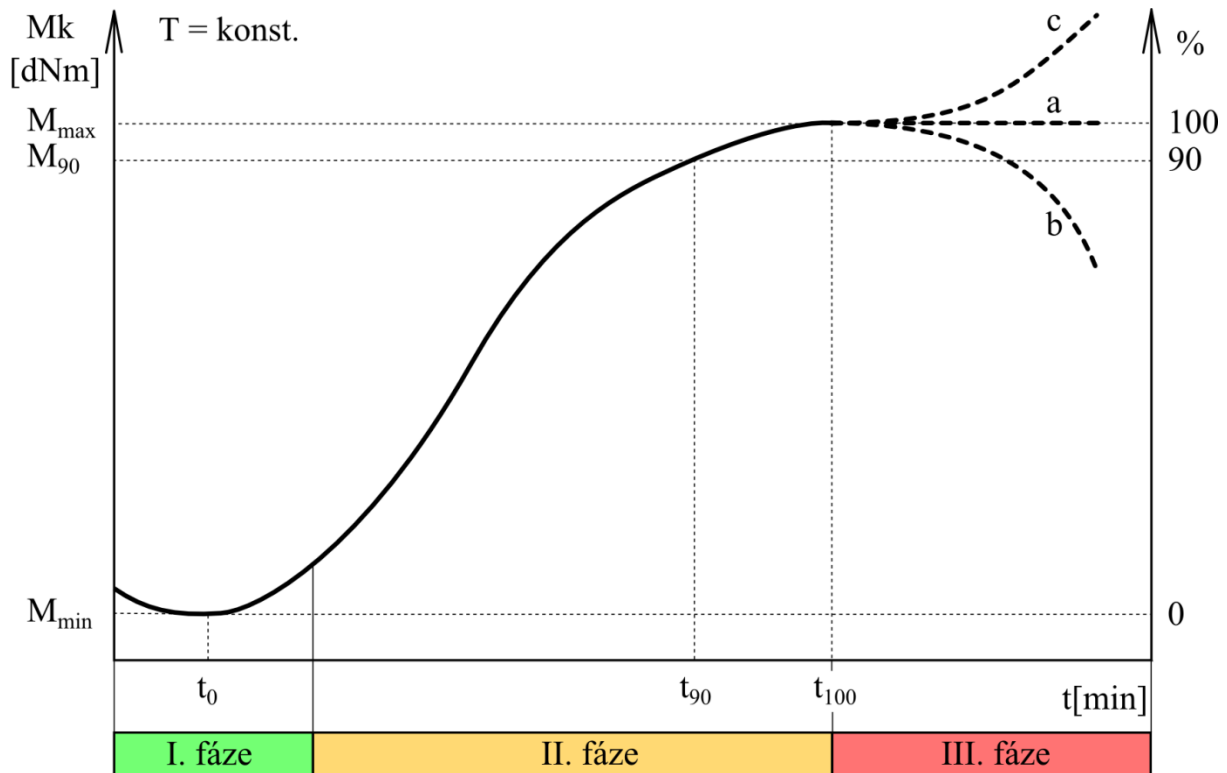
- vulkanizací mizí rozpustnost polymeru. V rozpouštědlech vulkanizát pouze botná. Rozpouštědlem se dají vyextrahovat jen nezesíťované a nízkomolekulární podíly. Botnání se zastavuje na určitém poměru mezi množstvím kaučuku a rozpouštědla. Dostavuje se rovnováha, která je závislá především na stupni zesíťování kaučuku. Proto lze experimentálním stanovením rovnovážného stupně botnání pryže stanovit stupeň její vulkanizace;
- vulkanizací významně vzrůstá pevnost kaučuku až do určité hodnoty; po překročení optimálního stupně zesíťování pryže její pevnost klesá, vzrůstají však moduly a tvrdost. S postupující vulkanizací po počátečním vzrůstu klesá tažnost pryže. Platí zde jednoduché pravidlo, že největší pevnost mají vulkanizáty při tažnosti kolem 500 % až 700 % (podle typu příčných vazeb);
- se vzrůstajícím stupněm vulkanizace se zlepšuje odolnost proti trvalé deformaci. Mění se i další fyzikální vlastnosti pryže, zejména odolnost vůči dynamické únavě a tzv. strukturní pevnost, tj. odpor proti dalšímu trhání porušeného vzorku. Tato důležitá vlastnost má však největší hodnotu při poněkud menším stupni vulkanizace než je optimální stupeň zesíťování z hlediska pevnosti. [34, 60]

1.15 Vulkanizační křivka – zobrazení průběhu vulkanizace

Vulkanizační křivku je možné rozdělit na tři části (*Obr. 13*) [4, 18]:

- **I. indukční periodu**; probíhá reakce vulkanizačních činidel s kaučukem. Tato doba závisí na podmínkách reakce a výběru typu vulkanizačního systému;
- **II. vlastní síťovací reakci**; určuje dobu síťování polymeru a současně změnu fyzikálně mechanických hodnot. Během vlastní síťovací reakce dochází k úbytku vulkanizačního činidla a nastává pokles rychlosti reakce;
- **III. změnu v struktuře vzniklé sítě**; kdy mohou nastat tři situace. Pokud si vulkanizát při vulkanizaci zachová stejnou hodnotu krouticího momentu,

vzniká vulkanizační plató (a); v případě klesání krouticího momentu po dosažení maxima vzniká reverze – rozpad sírných vazeb (b); pokud krouticí moment neustále roste, vulkanizační křivka disponuje tzv. kráčejším modulem (c). [9, 18]



Obr. 13 – Průběh vulkanizace

Vulkanizační křivka slouží pro stanovení základních vulkanizačních charakteristik. Mezi ně patří:

- M_{\min} – minimální krouticí moment, charakterizuje maximální tuhost směsí před vulkanizací;
- M_{\max} – maximální krouticí moment, charakterizující maximální tuhost vulkanizátu;
- t_0 – zpracovatelská bezpečnost, která je označována jako doba, kdy začíná růst krouticí moment, po tuto hodnotu je materiál stále v plastickém stavu;
- t_{90} – označuje čas, potřebný k dosažení 90% rozdílu mezi maximálním a minimálním krouticím momentem ($M_{\max} - M_{\min}$) a nazývá se optimum vulkanizace. [50]

Optimální čas vulkanizace se stanoví jako čas potřebný na vytvoření 90 % příčných vazeb, čemu odpovídá určitý krouticí moment podle vzorce [2, 9]:

$$M_{90} = M_{\min} + 0,9 (M_{\max} - M_{\min}) \quad (6)$$

Hodnota M_{90} je dosažena v čase t_{90} , zesítnění výrobku zde dosahuje 90 %. Po dosažení optima vulkanizace je výrobek vyhozen z formy a dokončení procesu vulkanizace probíhá samovolně mimo formu za pomoci akumulovaného tepla ve výrobku [4, 50].

1.16 Pryž

Výrobek z pryže má určitý tvar, který získal vulkanizací. Ten již nelze dodatečně změnit tvářením, pouze opracováním. Pokud se pryži při používání dává v určitých mezích jiný tvar, je to změna pouze přechodná, způsobená účinkem vnější síly (např. tahem, tlakem, ohybem, smykem a jejich kombinací), která má za následek vznik napětí a z něj pak plynoucí tok anebo únavu.

Pryž je prakticky nestlačitelná, čehož se při její exploataci také využívá. Pokud se pryž "stlačuje", děje se tak vždy deformačně, tj. za změny některého rozměru příslušného předmětu (výrobku). [2]

1.17 Testování vlastností materiálu

Z hlediska zjištění chování kaučukové směsi při zpracování, je potřebné poznat celou řadu její vlastností. Mezi nejčastěji hodnocené veličiny patří viskozita Mooney, hodnoty vulkanizačních charakteristik nebo také změření celých vulkanizačních křivek.

1.18 Měření viskozity Mooney

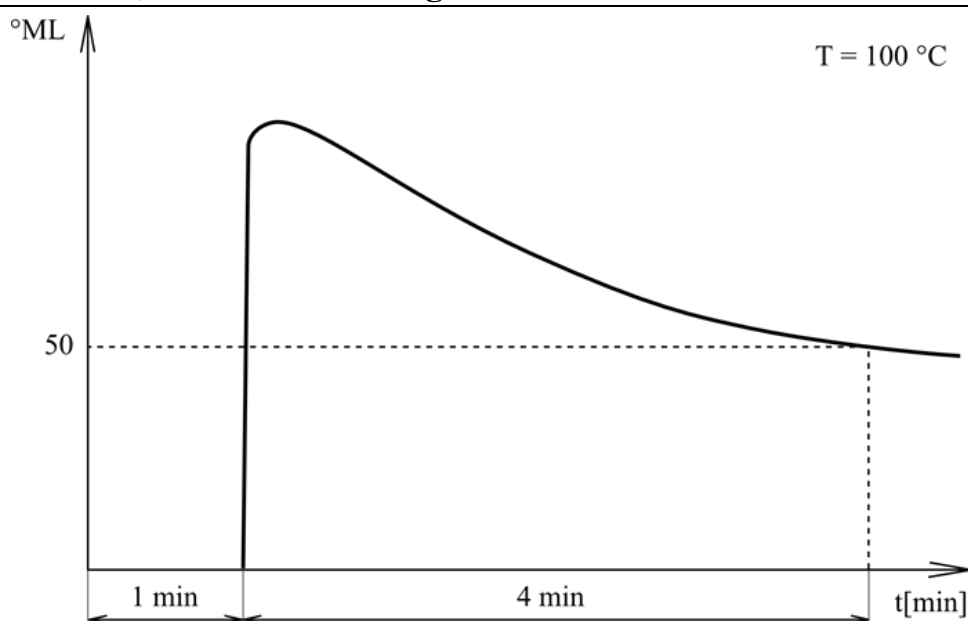
Podstatou zkoušky viskozity Mooney je stanovení krouticího momentu, v jednotkách Mooney při otáčení rotoru v komoře zaplněné zkušebním materiálem. [9]

Zkušební vzorek je tvořen ze dvou kaučukových disků o průměru 50 mm a tloušťce 6 mm, což dostačuje k tomu, aby byla dutina viskozimetru vyplněná. Jeden kaučukový disk má ve středu vyseknutý kruhový otvor, který umožňuje vložení hřídele rotoru. [9]

Viskozita Mooney je hodnota na křivce při 100°C odečtená po 4 minutách od spuštění pohybu rotoru. Celá zkouška standardně trvá 5 minut, před zpuštěním rotoru je kaučukové směsi poskytnutá 1 minuta, čím se zkušební vzorek předehřeje, vyrovná se teplotní pole, po té je možné porovnávat viskozity Mooney z viskozimetrů různých konstrukcí. Typická viskozita Mooney může být vyjádřena vztahem [9]:

$$50 ML (1 + 4) 100^{\circ}C \quad (7)$$

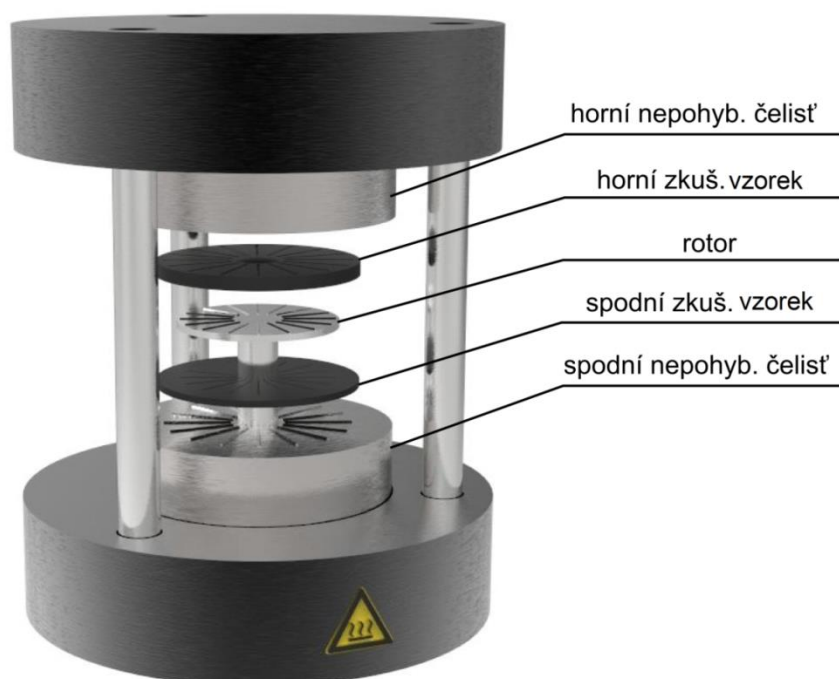
Kde 50 M reprezentuje viskozitu Mooney, L značí typ použitého rotoru (L = large = standardní), 1 je doba předhřevu, 4 doba činnosti rotoru a 100°C je teplota komory při testování. [9]



Obr. 14 – Průběh měření viskozity Mooney [27]

1.18.1 Viskozimetr Mooney

Rozměry viskozimetru Mooney jsou standardizované normou ISO 289-1. Rotor i dutina formy jsou přesně definovány, stejně jako délka jejich povrchu, jejichž úlohou je zamezit skluzu na stěně. Otáčky rotoru jsou normou dané na $2 \pm 0,02\text{ ot. min}^{-1}$. Vyhřívací zařízení musí udržet teplotu v rozmezí $\pm 0,5\text{ °C}$ a uzavírací zařízení vyvinout během testu uzavírací sílu danou normou na $11,5 \pm 0,5\text{ kN}$. [9, 59]



Obr. 15 – Viskozimetr Mooney[27]

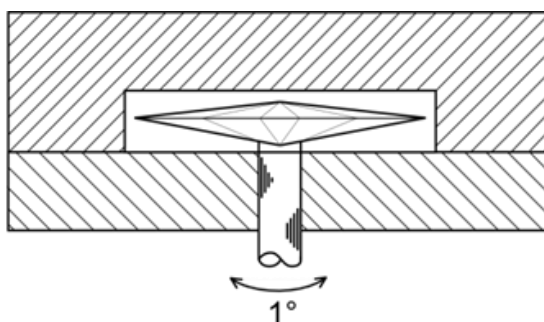
1.19 Měření vulkanizačních charakteristik

Laboratorní měření vulkanizačních charakteristik kaučukové směsi bylo podpořené zavedením vulkametru, tzv. „curemeters“, v polovině 20. století. Tyto přístroje se rychle staly oblíbenými pro svoji jednoduchost až tak, že používání přístroje Mooney se postupně zmenšovalo. [9]

Vulkametry zaznamenávají dynamický smykový modul (odpor krouticího momentu v závislosti na času) cyklicky namáhaného zkušební tělesa během vulkanizace. Dokáží zaznačit celý průběh vulkanizace a využívají se při vývoji nových směsí anebo přímo ve výrobě na hodnocení zpracovatelských vlastností. [9]

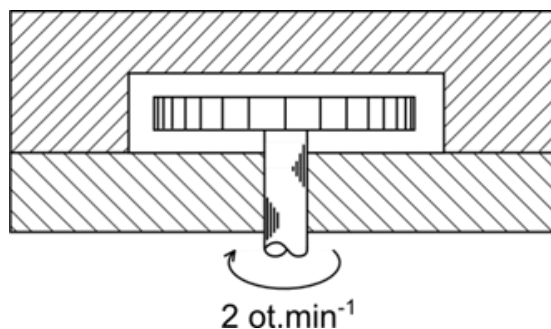
Po značnou dobu byly běžně používané tyto typy vulkametrů [9]:

- Wallace-Shawbury,
- Monsanto (*Obr. 16*), při kterém disk osciluje konstantním úhlem pootáčení a vyvolaný krouticí moment vlivem změny smykového modulu je zaznamenaný do grafu. Oscilační pohyb rotoru vykonává excenter usazený na hřídeli a osciluje s frekvencí 1,67 Hz (100 oscilací/min).



Obr. 16 – Vulkametr Monsanto

Mooney (*Obr. 17*), podmínky jsou totožné jako při měření viskozity Mooney, jediný změněný parametr je teplota formy. Jejím zvýšením začne materiál v dutině formy vulkanizovat. Rychlost vulkanizace je daná jako podíl 30 jednotek Mooney a rozdílu času potřebného k zvýšení krouticího momentu z 5 °ML na 35 °ML. [9]



Obr. 17 – Vulkametr Mooney

1.19.1 Rubber Process Analyzer (RPA 2000)

Vulkametr využívající oscilující disk byl představený průmyslu v roce 1960. Vulkametr využívající rotor popsany v normě ASTM D 2084 disponoval mnohými problémy, jako například:

- přítomností nevyhřátého kovového rotoru nebylo prostředí izotermní. Někdy k vyrovnání teplotního pole je zapotřebí 4 – 5 minut;
- signál vyvolaný krouticím momentem musí být měřený přes hřidel vulkametru. Vlivem přirozeného tření spojeného s pohybem rotoru vzniká v signálu šum, což má za následek snížení citlivosti testu;
- vzhledem k vzniklému tření je velmi složité měřit skutečné dynamické vlastnosti. [9,16]

Přístroj RPA patří do skupiny bezrotorových reometrů, což ho odlišuje od běžných reometrů. Je zde využíván speciální motor s přímým pohonem, který může být naprogramovaný tak, aby došlo ke změně frekvence anebo napětí sinusové oscilace spodní základny hlavy. Zařízení bylo vyvinuté za účelem testování celé řady materiálů. Je možné na něm testovat surové polymery přicházející do výrobního řetězce, připravené směsi, ale taktéž výsledné vulkanizáty [9,16]

Připravený vzorek elastomeru, případně směsi, o hmotnosti okolo 5 g je umístěn do měřícího zařízení, které je uzavřené silou 15 kN. Teplota obou částí formy probíhá s přesností $\pm 0,3$ °C. V případě nutnosti formu ochladit, je možné tak učinit pomocí proudícího vzduchu, kdy je teplotní spád přibližně 30 °C/min. Krouticí moment je přenášený přes materiál ze spodní oscilující části do horní, ve které je umístěný senzor. Změna krouticího momentu je zaznamenávána s pomocí softwaru jsou vyhodnocované měřené veličiny. Konstrukce typu kužel – kužel je zvolená z důvodu dodržení konstantního smykového namáhání vzorku. [64]

Na základě možnosti měnit celou řadu parametrů je možné měřit různé vlastnosti. Všechny veličiny je možné mezi sebou kombinovat a získat tím unikátní výsledky, na základě kterých je možné odhalit příčiny vzniku problémů v procesu výroby. Mezi parametry, které je možné měnit, patří [64]:

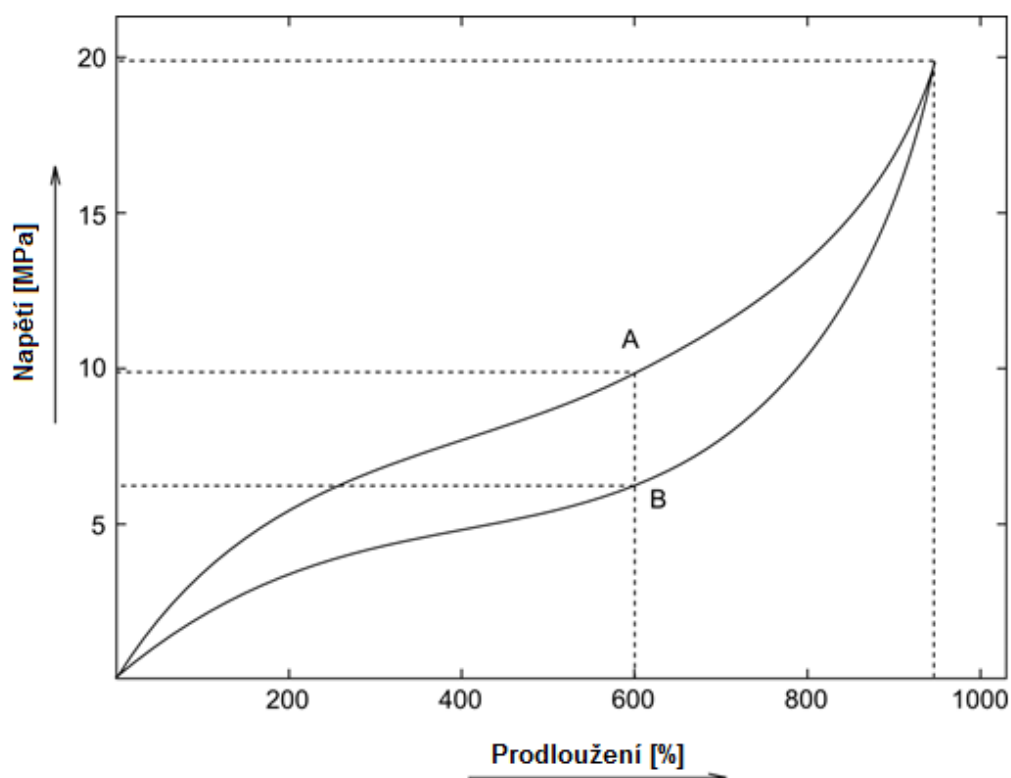
- teplota (30 – 230) °C,
- frekvence oscilace (0,03 – 33) Hz,
- úhel oscilace (0,05 – 90) °,
- čas (0 – 9 999) min.

1.20 Testování mechanických vlastností pryžových výrobků

Mechanické vlastnosti pryžových výrobků jsou spjaty s podmínkami jednotlivých testů, jako je například teplota prostředí nebo čas působení zatěžující síly. Z toho důvodu by se všechny uskutečněné testy měly vykonávat za podmínek, které budou věrohodně reprezentovat prostředí, do kterého je výrobek určený. [9,18, 57]

1.21 Jednoosý tah

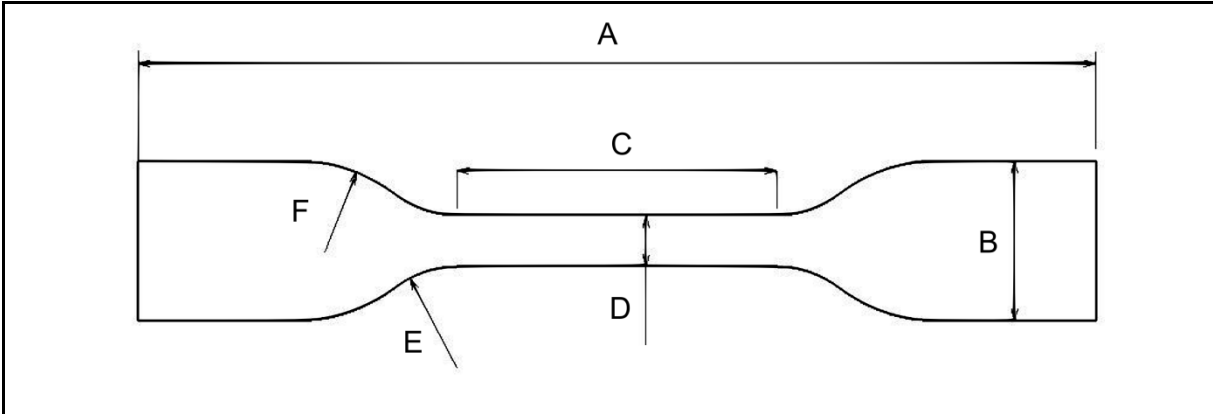
Tahové zkoušky dávají celkový hrubý obraz o vlastnostech pryžového materiálu. Mimo to se pomocí nich kontroluje pravidelnost technologických postupů, jako je například vulkanizace. Pro každou pryž je závislost zatížení na prodloužení charakteristická. Je možné pomocí ní zjistit nejenom konečné zatížení (pevnost), konečné prodloužení (tažnost), ale také zatížení potřebné k určitému prodloužení (modul). Ten velmi často slouží jako měřítko při hodnocení pryže. U pryží se vyhodnocují moduly u různých protažení (100%, 300%, 500% apod.) [9,18]



Obr. 18 – Tahový diagram pryže (rozdílné moduly – stejná tažnost)

Rozměry zkušebních těles jsou dle normy. Jeden z nejvyžívanějších typů zkušebních těles je tvar lopatky. Při tvaru lopatky u tuhých materiálů s tažností jen několik procent nastává deformace převážně jen v zúžené části a přenáší se do rozšířeného tvaru. U pryže, která je silně deformovaná, dochází k přenášení napětí i do rozšířených částí. Ty se deformují a vznikají nepřesnosti v odčítání závislosti napětí na deformaci. Jednotlivé rozměry dle typu tělesa jsou uvedeny v Tab. 4. [9,18]

Tab. 4 – Rozměry těles pro tahovou zkoušku



Rozměr [mm]	Typ 1	Typ 1A	Typ 2	Typ 3	Typ 4
A Celková délka	115	100	75	50	35
B Šířka konců	25 ± 1,0	25 ± 0,5	12,5 ± 1,0	8,5 ± 0,5	6 ± 0,5
C Délka úzké části	33 ± 2,0	20 ± 2,0	25 ± 1,0	16 ± 1,0	12 ± 0,5
D Šířka úzké části	6 ± 0,4	5 ± 0,1	4 ± 0,1	4 ± 0,1	2 ± 0,1
A Přechodový poloměr	14 ± 1,0	11 ± 1,0	8 ± 0,5	7,5 ± 0,5	3 ± 0,1
F Přechodový poloměr	25 ± 2,0	25 ± 2,0	12,5 ± 1,0	10 ± 0,5	3 ± 0,1
Vyhodnoc. délka	25 ± 0,5	20 ± 0,5	20 ± 0,5	10 ± 0,5	10 ± 0,5

1.22 Tvrdost

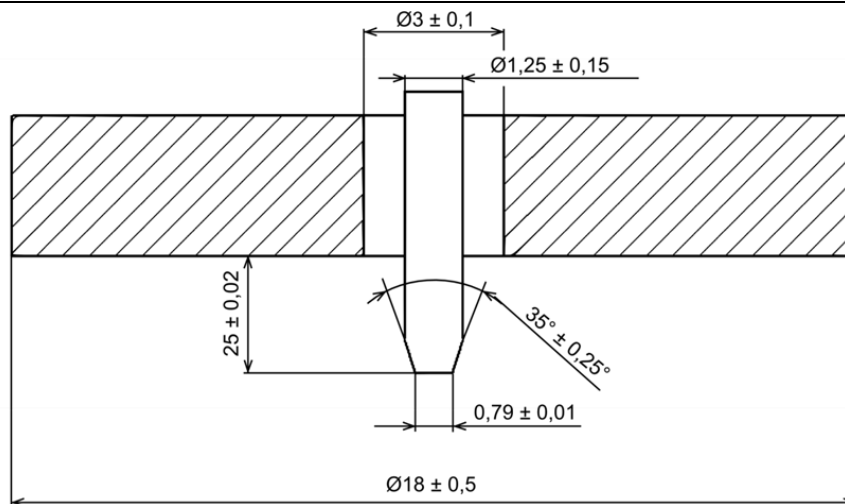
Pokud je předmět vtlačován do povrchu tuhé hmoty, vzniká na povrchu vtisk. U kovů anebo jim podobným materiálům, vzniká trvalá deformace a prohloubení zůstane v povrchu vytlačeno i po odstranění indentoru v podobě odpovídajícímu jeho obrysu. U pryžových materiálů tomu tak není, proto se deformace povrchu musí měřit během vtlačování. Teoreticky platí, že odolnost pryže proti vtlačování závisí při malých deformacích na modulu pružnosti, rozměru zkušebního tělesa a na rozměru tělesa (indentoru), které je vtlačované.

Síla vnikání indentoru do materiálu může být aplikovaná třemi způsoby:

- aplikace konstantní síly, kdy je vyhodnocovaná hloubka indentoru,
- aplikace proměnné síly, která vyvolá konstantní vniknutí indentoru,
- použití odporu pružiny, co má za následek změnu vnikající síly v závislosti na hloubce vniknutí. [9, 14, 18]

1.22.1 Metoda Shore A

Je vhodná pro měření tvrdosti pryže v rozsahu (20-90) jednotek ShA. Měření nižších anebo vyšších tvrdostí není možné považovat za správné, pouze jen za informativní (pro měření nižších hodnot je vhodné použít metodu DVM a pro měření tvrdších vulkanizátů zase metodu Shore D). Měrnou jednotkou je jeden dílek na Shore stupnici, přičemž vyšší číslo značí tvrdší pryž. [9, 12, 48]



Obr. 19 – Schéma tvrdoměru Shore A a rozměry podle ČSN ISO 7619

Přístroj k stanovení tvrdosti Shore A se skládá z těchto částí:

- indentoru, který musí být zhotovený z tyčinky z kalené oceli o průměru $1,25 \text{ mm} \pm 0,15 \text{ mm}$, které vyčnívající konec má tvar ořízlého kužele s vrcholovým úhlem $35^\circ \pm 0,25^\circ$ a s průměrem otupené špičky $0,79 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Hrot vyčnívá z patky přístroje $2,50 \text{ mm} \pm 0,02$ (vysunutí je platné pro odpočet 0 ShA). Při měření vlivem odporu materiálu proti vnikání indentoru ustupuje hrot do vlastního tvrdoměru a převodem (např. mechanickým, změnou akumulovaného napětí) je hodnota tvrdosti zobrazená na vyhodnocovacím zařízení,
- patky, základní destičky tvrdoměru, jejichž průměr musí být $18 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ a středový otvor pro indentor o průměru $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. Její úlohou je zaručit, aby indentor vnikal do měřeného materiálu kolmo. [9 12, 48]

Každá metoda tvrdosti si vyžaduje odlišnou tloušťku zkušební tělesa. Zjišťovaná tvrdost na tvrdoměru Shore s indentorem typu A si vyžaduje zkušební vzorek o tloušťce minimálně 6 mm. Při menších tloušťkách může být zkušební těleso složené z několika vrstev. [9, 48]

Ostatní rozměry zkušební tělesa musí být pro metodu Shore A takové, aby umožňovaly měření ve vzdálenosti minimálně 12 mm od každého okraje, a jednotlivé měřené body musí být od sebe vzdáleny minimálně 6 mm. Od povrchu zkušební tělesa se vyžaduje rovinnost a rovnoběžnost v dostatečné ploše, aby se opěrná patka dotýkala zkušební tělesa na ploše o poloměru nejméně 6 mm od špičky indentoru. [9, 48]

1.22.2 IRHD metoda

Patří mezi mezinárodně uznávané zkoušky tvrdosti (IRHD – International Rubber Hardness Degrees). Tvrdost je měřena z hloubky vtlačení indentoru, který je zatížen specifikovanou silou v zkušebním tělese. Standartní vyhodnocovací

rozsah je v rozmezí (35 – 85) IRHD, ale někdy se využívá až (10-100) IRHD. Aby při častém používání nedocházelo k opotřebování indentoru, byla pro tuto metodu zvolena ocelová kulička přesného rozměru. Podle průměru indentoru, předzatížení a celkového zatížení se metoda IRHD dělí na:

- metodu N, kdy zkušební těleso musí mít tloušťku (8-10) mm a musí být tvořen jednou anebo více vrstvami pryže, přičemž nejtenčí vrstva nesmí být tenčí než 2 mm. Měřicí rozsah metody N je (35 – 85) IRHD.
- metodu H, jejichž podmínky jsou totožné s N s tím rozdílem, že je odlišný průměr indentoru a tím pádem i využitě zařízení. Metoda H se využívá při vulkanizátech s vysokou tvrdostí v rozsahu (85 -100) IRHD.
- metodu L, při které je tloušťka zkušebního tělesa v rozmezí (10 -15) mm přičemž také platí, že musí být tvořené jednou nebo více vrstvami s nejtenčí vrstvou o minimální tloušťce 2 mm. Metoda L se uplatňuje u vulkanizátů, které mají tvrdost nižší než 35 IRHD.
- metodu M, zde je tloušťka zkušebního vzorku $2 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$. Jedná se o tzv. mikrometodu, kdy indentor vniká silou v řádech mN. [9,38]

Tab. 5 – Vlastnosti zkoušky tvrdosti IRHD, metoda N, H, L [38]

Zkouška	Rozměry	Síla působící na kuličku [N]			Síla působící na patku
	[mm]	Kontaktní	Vtlačovací	Celková	[N]
Metoda N (35-85) IRHD	Kulička $2,50 \pm 0,01$	0,30	5,40	5,70	8,30
	Patka $20,00 \pm 1,00$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	$\pm 0,03$	$\pm 1,50$
	Otvor $6,00 \pm 1,00$				
Metoda H (85-100) IRHD	Kulička $1,00 \pm 0,01$	0,30	5,40	5,70	8,30
	Patka $20,00 \pm 1,00$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	$\pm 0,03$	$\pm 1,50$
	Otvor $6,00 \pm 1,00$				
Metoda L (10-35) IRHD	Kulička $5,00 \pm 0,01$	0,30	5,40	5,70	8,30
	Patka $22,00 \pm 1,00$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	$\pm 0,03$	$\pm 1,50$
	Otvor $10,00 \pm 1,00$				

Tab. 6 – Vlastnosti zkoušky tvrdosti IRHD, metoda M [38]

Zkouška	Rozměry [mm]	Síla působící na kuličku [mN]			Síla působící na patku [mN]
		Kontaktní	Vtlačovací	Celková	
Metoda M (mikrometoda)	Kulička $0,395 \pm 0,005$	8,30	145,00	153,30	235,00
	Patka $3,35 \pm 0,15$	$\pm 0,50$	$\pm 0,50$	$\pm 1,00$	$\pm 3,00$
	Otvor $1,00 \pm 0,15$				

Při měření metodou M (mikrotvrdost) musí být zaručené, že nejmenší vzdálenost měřeného bodu nebude bližší než 2 mm od kraje, zatímco při metodách N, H a L nejmenší vzdálenost měřeného bodu je dána tloušťkou zkušebního materiálu, tak jak je uvedené v Tab.7. [9, 38]

Tab. 7 – Rozměry zkušebního tělesa [38]

Celková tloušťka zkušebního tělesa [mm]	Minimální vzdálenost měřeného bodu od kraje tělesa [mm]
4	7,0
6	8,0
8	9,0
10	10,0
15	11,5
25	13,0

2 CÍL PRÁCE

Hlavním cílem disertační práce je studium vlivu tvaru a délky vtokových kanálů na výsledné vlastnosti výrobku z pryže. Pro různé typy vtokových kanálů je pozorována změna tvrdosti a pevnosti v tahu konečného vulkanizátu při různých změnách teploty stěny vstřikovací formy a při různých rychlostech vstřikování. Práce má za úkol prokázat, zda lze pomocí změny geometrie vtokových kanálů zkrátit nejdelší část vstřikovacího cyklu, kterou je samotná vulkanizace.

Postup při řešení disertační práce:

- Výroba univerzální vstřikovací formy s ohledem na snadnou výměnu tvarových desek.
- Návrh a konstrukce tvarových desek s vhodnými dutinami pro testování mechanických vlastností.
- Simulace vstřikovacího procesu k podrobnějšímu popisu nejen vlivu délky, průřezu a tvaru vtokových kanálů, ale také vlivu reologických vlastností materiálu, jako je index newtonského chování a relaxační čas.
- Nalezení vhodných procesních parametrů pro nastavení vstřikovacího cyklu pomocí tokových analýz.
- Příprava zkušebních těles vstřikováním pro mechanické zkoušky.
- Výběr vhodné metody pro ověření zmíněného vlivu tak, aby pro praxi byla použitelná a flexibilní.
- Provedení mechanických zkoušek a porovnání výsledků u jednotlivých trajektorií.
- Statistické vyhodnocení výsledků z experimentů, zpracování a vyhodnocení naměřených dat.

3 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

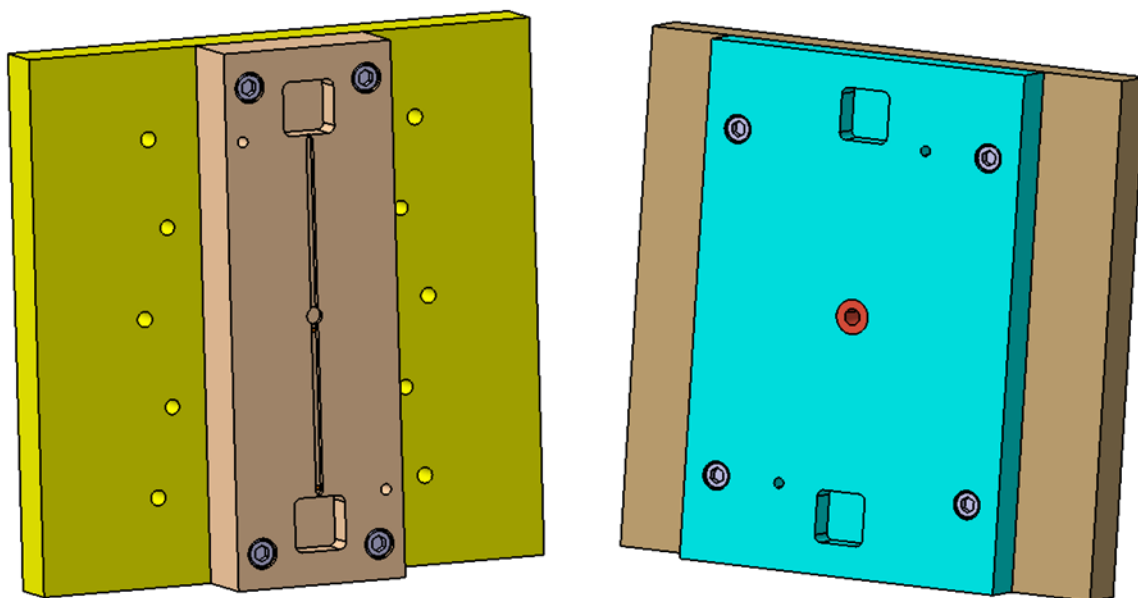
Praktická část dizertační práce byla rozdělena do 2 hlavních experimentálních celků. Cílem prvního celku bylo zjistit pomocí počítačových analýz vliv jednotlivých typů trajektorií a změn materiálových vlastností pomocí programu Cad-mould 3D-F Rubber na koncové vlastnosti výrobku, zejména na čas, kdy při uvedené změně lze dosáhnout optima vulkanizace, tedy 90% vzniklých příčných vazeb. Tato zjištění pomohou k vytvoření trajektorií pro druhý experimentální celek, který se zabývá praktickým měřením koncových vlastností výrobků a to pomocí zkoušek tvrdosti a pevnosti v tahu.

3.1 Model a vstřikovací forma

Pro vypracování praktické části bylo nutné navrhnout, zkonstruovat a vyrobit vstřikovací formu. Tato vstřikovací forma se skládá ze dvou částí, horní a dolní. Obě upínací desky tvoří univerzální rám pro vstřikovací stroj REP a jsou konstruovány tak, aby mohly být použity i pro jiný typ tvarových vložek.

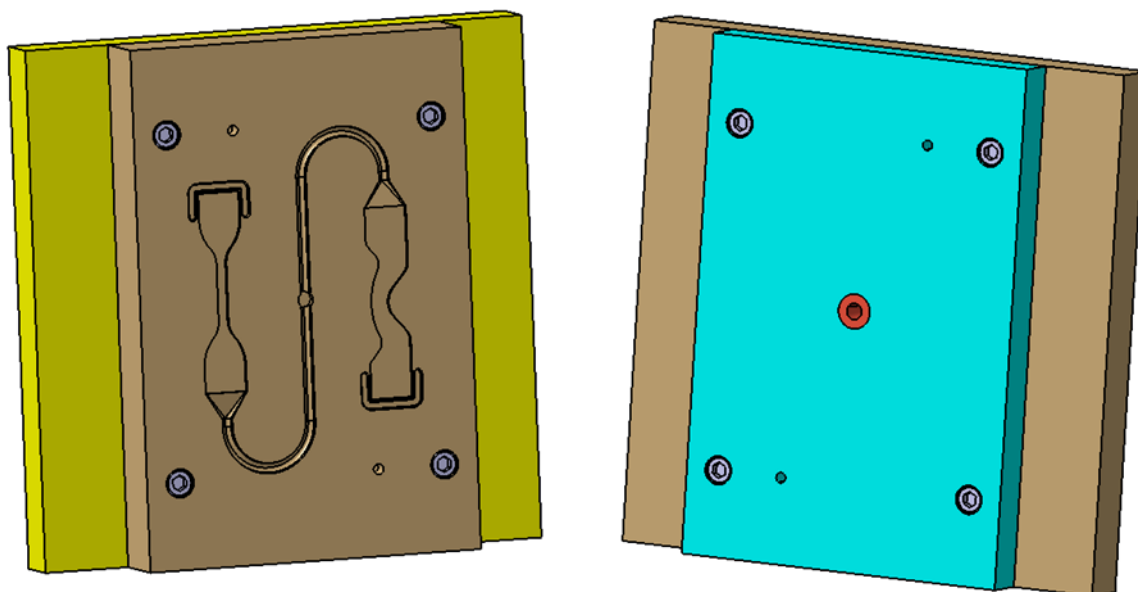
Horní část se skládá ze dvou desek (upínací a tvarová), vtokové vložky a středícího kroužku.

Spodní část formy je navržena z upínací desky a osmi snadno vyměnitelných tvarových desek. Tyto desky jsou měněny dle potřeby a pro přesné ustavení jsou použity válcové kolíky o průměru 6 mm.



Obr. 20 – Pohled do dělicí roviny formy pro tlustostěnné výrobky

Ve skutečnosti bylo vyrobeno 10 různých tvarových desek (6 pro tlustostěnné výrobky, 4 pro tenkostěnné výrobky) s různými délkami, průřezy a typy trajektorií. Tvary a rozměry kanálů jsou popsány v příslušných kapitolách.



Obr. 21 – Pohled do dělicí roviny formy pro tenkostěnné výrobky

Všechny desky byly vyrobené ze slitiny hlinku EN AW-7022. Materiál je slitinou hliníku, zinku hořčíku a mědi (AlZnMgCu) a patří mezi nejpevnější slitiny hliníku. V průmyslu se používá na výrobu forem pro vstřikování malých sérií, nebo při technologii vyfukování, dále se dá materiál použít pro výrobu různých upínek a přípravků.

Tab. 8 – Složení slitiny použité na tvarové desky

[%]	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. 9 – Fyzikální vlastnosti materiálu formy

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

Polotovary jsou dodávány po tepelné úpravě s označením T6, což znamená, že materiál byl ohřátý na teplotu žíhání a poté následně podstoupil precipitační vytvrzování. Tyto desky jsou dodány v požadovaném rozměru s přídatkem na obrábění. Poté byly desky přebroušeny na drsnost Ra 0,2 μm .

Tvarové dutiny byly vyráběny na číslicově řízeném obráběcím stroji a to na frézce AZK HWT C-442 CNC.

Pro vytvoření NC programu byl použit software NX 8.0 od firmy Siemens. Obráběcí programy byly sestaveny z následujících částí v této posloupnosti:

- hrubování dutiny (frézování s přídatkem),
- dokončení dutiny formy (frézování na čisto),
- frézování přídržovače vtoku,
- hrubování rozvodného kanálu,
- dokončování rozvodného kanálu,
- frézování vtokového ústí mezi kanálem a dutinou,
- vrtání děr pro středící kolíky,
- navrtání děr pro šrouby,
- frézování přetokové drážky.

Další operace (vrtání děr pro šrouby, vrtání a tvorba závitu pro teplotní senzory, ojehlení a odvzdušnění) pro dokončení a správnou funkci tvarových desek byly provedeny na konvenčních strojích. Celý návrh, výroba a sestavení vstřikovací formy proběhl na zařízeních, které jsou k dispozici na Ústavu výrobního inženýrství.

3.2 Vstřikovací stroj

Samotný proces výroby zkušebních těles probíhal v dílnách Ústavu výrobního inženýrství, kde se nachází vertikální vstřikovací stroj REP V27 Y125. Maximální uzavírací síla stroje je 57 kN, plastikační jednotka používá šnek o průměru 20 mm, vstřikovací jednotka má kapacitu 125 cm^3 a do stroje je možné upnout formu o maximálních rozměrech 300 x 300 x 495 mm. Stroj umožňuje připojení teplotních senzorů. Tyto senzory jsou umístěny ve tvarových deskách formy a jsou propojeny s vstřikovacím strojem. Slouží k regulaci teploty a správné temperaci formy.

Vstřikovací stroj je schopný vyvinout maximální vstřikovací tlak 200 bar (1 bar = 100 000 pa). Vstřikovací dávka je zadávána v jednotkách mm/s a určuje posuv pístu vstřikovací jednotky, přičemž 1 mm posuvu pístu je roven 0,152 cm^3 směsi. Po spuštění stroje je potřebné vytemperovat vstřikovací formu, plastikační a vstřikovací jednotku. Jednotlivé parametry jsou ukryté pod dvojmístným číselným označením. Tabulka níže zobrazuje význam a označení jednotlivých parametrů.



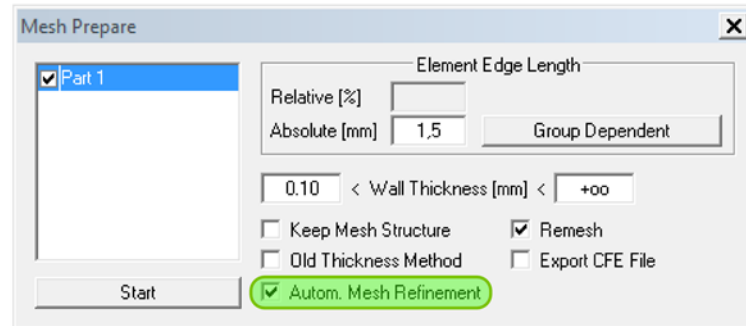
Obr. 22 – Vstřikovací stroj REP V27 Y125

Tab. 10 – Parametry vstřikovacího stroje

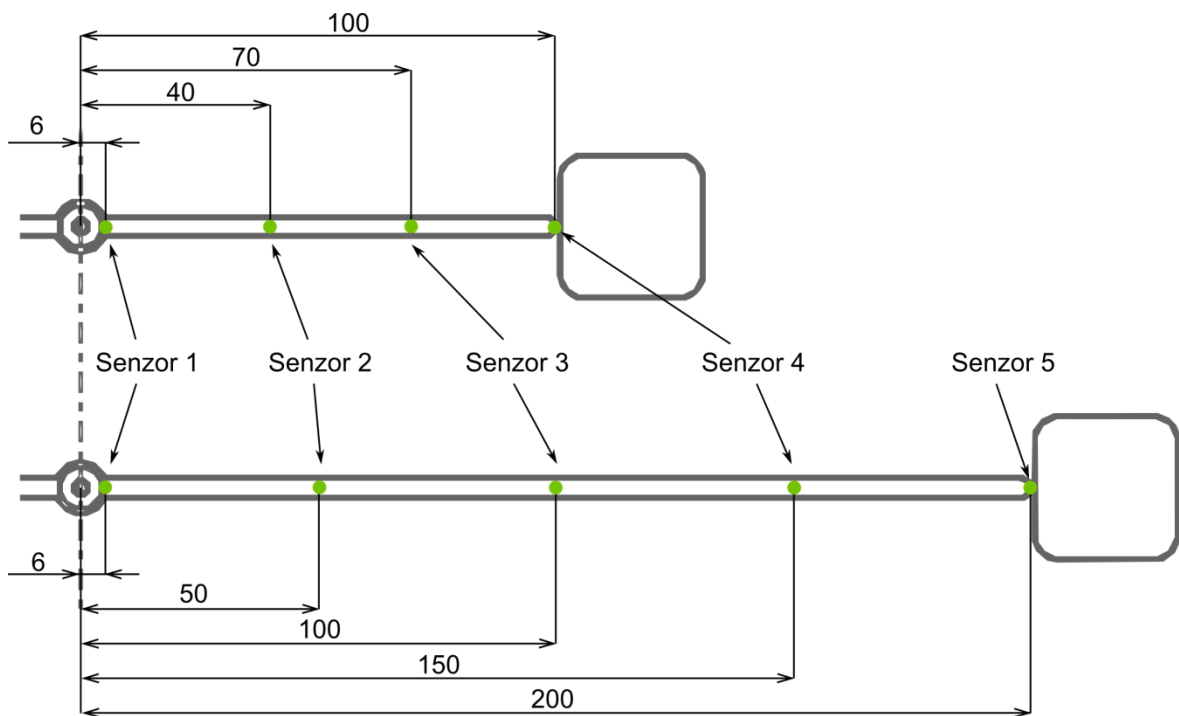
Parametr	Popis činnosti	Jednotky
21	Rychlost vstřikování (dráha pístu za sekundu)	[mm/s]
30	Celková dávka směsi (délka dráhy pístu)	[mm]
41	Vstřikovací tlak udávaný v barech (maximálně 200 bar)	[bar]
51	Bod na dráze pístu, od kterého působí vstřikovací tlak	[mm]
56	Doba vulkanizace od skončení vstřikování	[min]
61	Teplota plastikační komory	[°C]
62	Teplota vstřikovací komory	[°C]
65	Teplota horní vyhřívání desky	[°C]
67	Teploty spodní vyhřívání desky	[°C]

3.3 Tvorba výpočtových analýz

Počítačové analýzy byly prováděny v softwaru Cadmould 3D-F od firmy Simcon. Tento program využívá metodu konečných prvků. Přesnost výpočtů závisí na hustotě uzlových bodů. Pro výpočet byla použita vzdálenost uzlových bodů 1,5 mm. Program také disponuje možností automatického upravení sítě (Automatic Mesh Refinement) přidáním tzv. nodů, bez změny ostatních uzlových bodů a tím pádem i bez změny geometrické sítě.



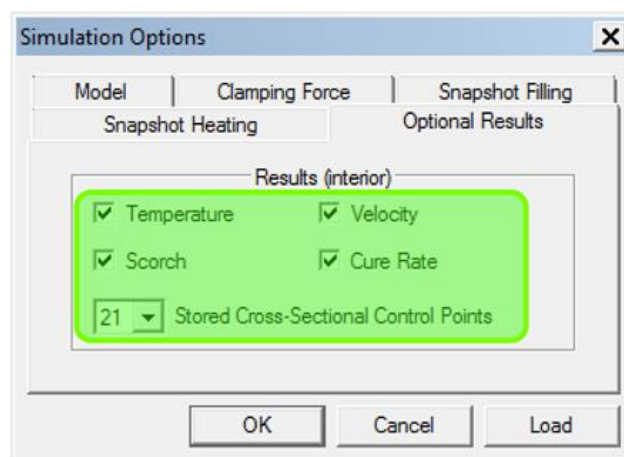
Obr. 23 – Zvolené podmínky v Mesh prepare



Obr. 24 – Rozmístění senzorů na délce kanálů

Každý model, bez ohledu na geometrii, byl osazen senzory, jejichž množství se lišilo od délky vtokových kanálů. Díky nim mohla být zjišťována teplota, tlak i stupeň vulkanizace podél vtokového kanálu. Poslední senzor byl vždy umístěn ve vtokovém ústí.

Hlavní důraz experimentu byl kladen na výpočet teplotního pole v průřezu kanálu a s tím spojené veličiny. Model byl v tloušťce rozdělen do 21 vrstev, přičemž každý řez se stal nositelem výsledku teploty, rychlosti, míry vulkanizace a bezpečnosti směsi.



Obr. 25 – Zpřístupnění vnitřních výsledků

3.4 Materiálové charakteristiky směsi



Obr. 26 – RPA 2000

Chování kaučukové směsi je z hlediska reologického řazeno mezi pseudoplastické látky. Jejich viskozita klesá s narůstající rychlostí smykové deformace. Každá elastomerní směs má svoji specifickou recepturu, je složená z jednotlivých komponentů, které ovlivňují nejen vlastnosti směsi při zpracování, ale také vlastnosti vulkanizátu (výstřiku). Tyto vlastnosti byly měřeny pro použitý materiál na přístroji RPA 2000 od Alpha Technologies. U reologických

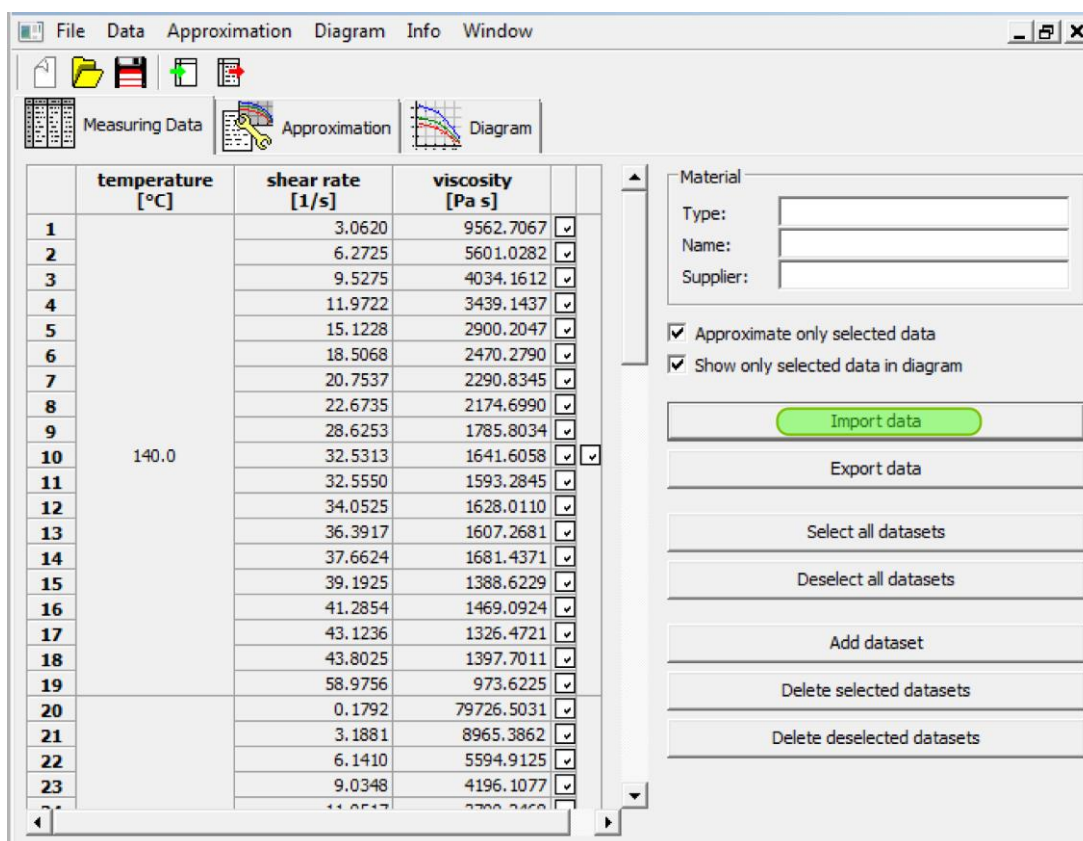
vlastností byly zjišťovanými veličinami rychlost smykové deformace a viskozita, tyto hodnoty byly měřeny při teplotách (140, 150, 160 a 170) °C. Vulkanizační vlastnosti směsi byly zjišťované z odporu ve formě krouticího momentu, který materiál kladl vůči rotoru, v daném čase při teplotách (140, 150, 160 a 170) °C.

Testovaným materiálem byla běhounová směs s označením T6730, jejíž složení je podrobněji zobrazeno v Tab. 11.

Tab. 11 – Složení testované směsi

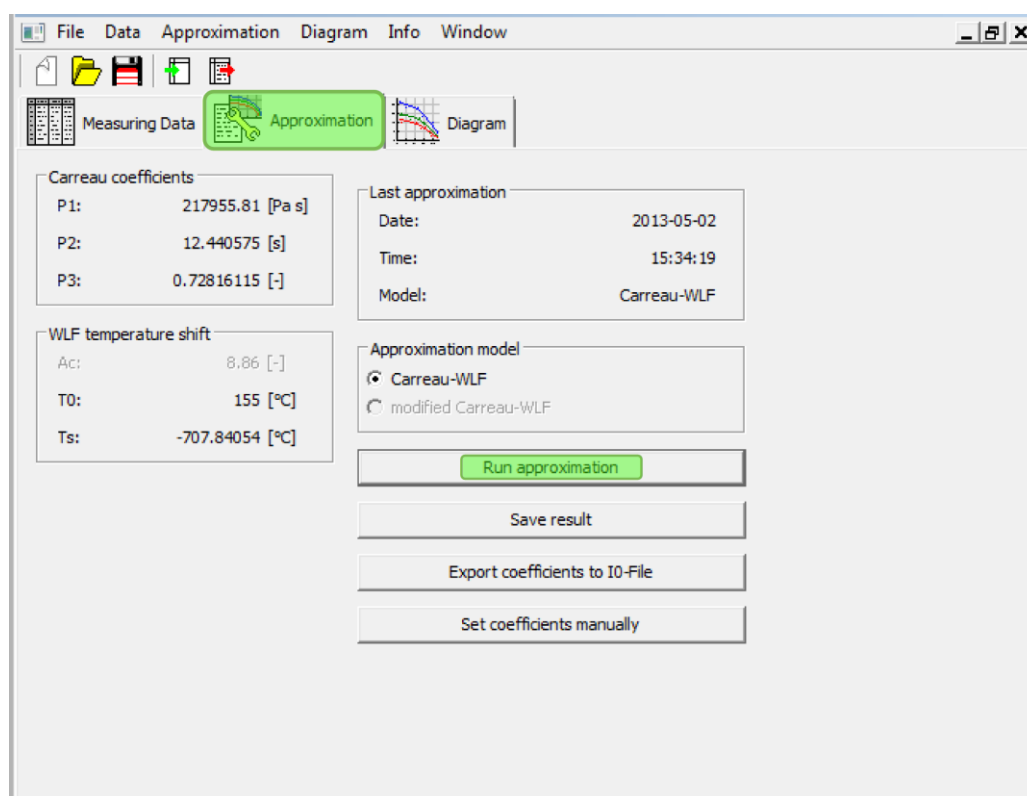
Syntetický kaučuk	37 %
Plnivo (saze)	27,5 %
Změkčovadla	9 %
Aktivátory	1,1 %
Antidegradanty	1,1 %
Síra	0,7 %
Urychlovače	0,6 %
Vratný odpad	23 %

3.4.1 Simfit 5.0



Obr. 27 – Ukázka importu naměřených dat

Program Simfit 5.0 je aproximační software, který umožňuje z naměřených dat získat potřebné materiálové koeficienty pro tvorbu simulací. Tento software je charakteristický svým jednoduchým ovládáním. Pro zjištění potřebných parametrů potřebných na spuštění analýz je potřeba vybrat příkaz „Viscosity approximation“ anebo „Cure rate approximation“. Po výběru příkazu je importován soubor s naměřenými údaji. Tokové vlastnosti jsou pro sledovaný materiál uvedeny v Tab. 12 a vulkanizační vlastnosti směsi popisuje Tab.13.



Obr. 28 – Aproximace vstupních dat v podobě získaných parametrů

Tab. 12 – Reologické vlastnosti

Carreau - William Landel Ferry model		
P_1	[Pa.s]	217955,81
P_2	[s]	12,441
P_3	[-]	0,728
T_0	[°C]	155
T_s	[°C]	-70,841

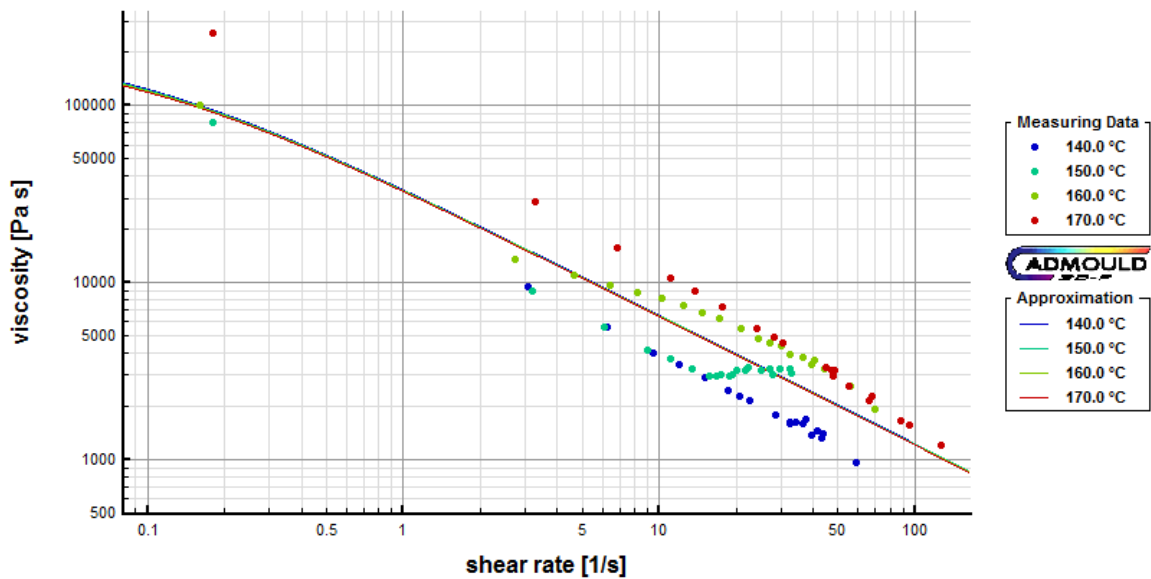
Kde $P_1 = (\eta_0)$ je viskozita při velmi nízkých smykových napětích. $P_2 = \left(\frac{1}{\lambda}\right)$ je relaxační čas materiálu, P_3 parametr, který určuje index newtonského chování ($n = 1 - P_3$). Referenční teplota je určena parametrem T_0 .

Carreau – William Landel Ferry model viskozity je daný vztahem:

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \frac{\eta_0 \cdot a_T}{(1 + \lambda \cdot a_T \cdot \dot{\gamma})^{1-n}} \quad (8)$$

Příčemž ostrost přechodu z newtonské do pseudoplastické oblasti je vyjádřena vztahem:

$$a_T = \left(\frac{8,86 \cdot [T_0 - T_S]}{101,6 + T_0 - T_S} - \frac{8,86 \cdot [T - T_S]}{101,6 + T - T_S} \right) \quad (9)$$



Obr. 29 – Diagram závislosti viskozity na intenzitě smykového toku v měřené směsi

Tab. 13 – Vulkanizační vlastnosti směsi

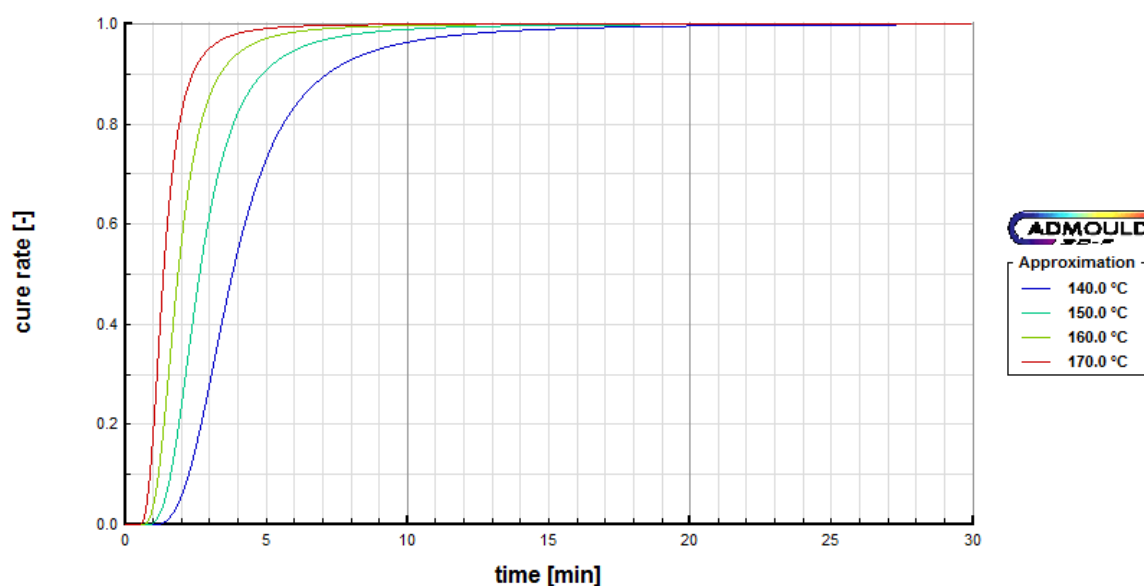
Deng/Isayev model vulkanizace			
Bezpečnost směsi	$\log_{10}(T_0)$	[min]	-2,925
	T_0	[°K]	2473,74
Vulkanizační systém	$\log_{10}(K_0)$	[1/min ⁿ]	11,371
	E_a	[J/mol]	97121,9
	n	[-]	1,342

Program Cadmould 3D-F na vyjádření průběhu vulkanizace využívá Deng – Isayev model, který má tvar:

$$\alpha = \frac{K \cdot t^n}{1 + K \cdot t^n} \quad (10)$$

Přičemž rychlost probíhající chemické reakce je vyjádřena Arrheniovou rovnicí:

$$K(T) = K_0 e^{\left(\frac{-E}{R.T}\right)} \quad (11)$$



Obr. 30 – Diagram závislosti rychlosti vulkanizace na čase v měřené směsi

Tyto získané materiálové parametry sloužily k nastavení reálného procesu, tedy k nastavení parametrů na vstřikovacím stroji.

3.5 Mechanické zkoušky

3.5.1 Zkouška tvrdosti

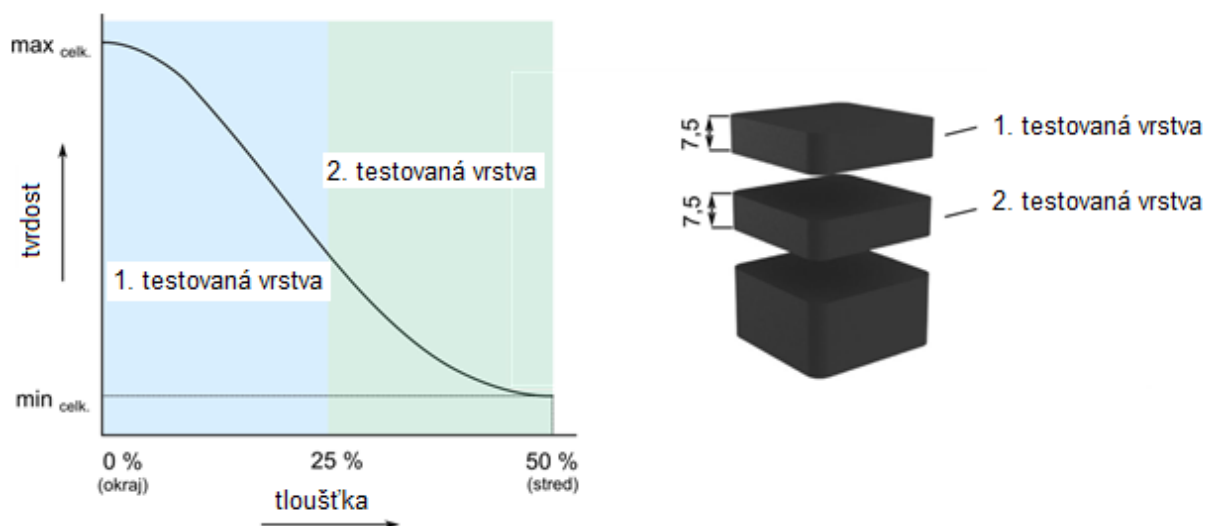
Tvrdość vulkanizátu bylo možné měřit pomocí dvou metod:

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

Vzhledem k tomu, že vystříknutá kostka nebyla záměrně plně zvulkanizována, nebyla její tvrdost homogenní v celém průřezu. Proces vstřikování byl nastaven tak, aby mohl být měřen rozdíl tvrdosti v jednotlivých vrstvách a tím zjištěn vliv jednotlivých kanálů na výslednou tvrdost kostky v jednotlivých vrstvách.

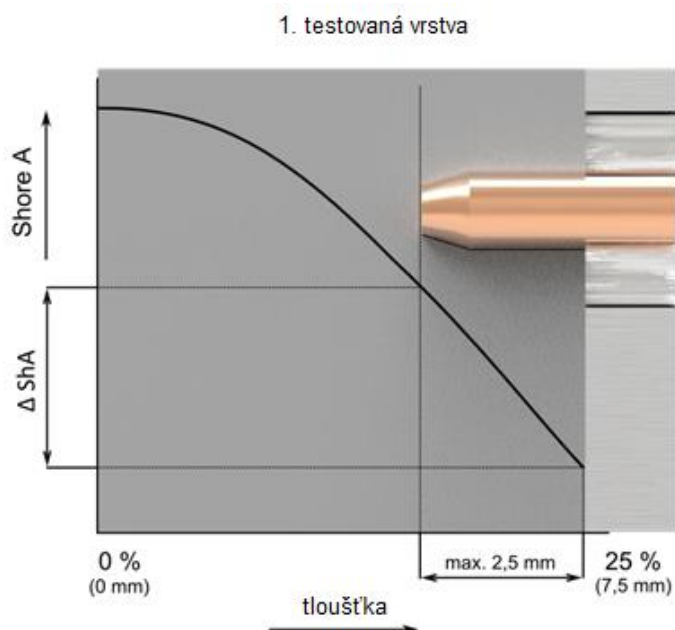
Předpokládaná tvrdost je nejnižší ve středu tlustostěnného zkušebního tělesa (kostky), kde není materiál plně zvulkanizován a největší na povrchu, kde byl materiál plně zvulkanizovaný (u tenkostěnných těles tvrdost nebyla měřena).

Mezi tvrdostí a vzniklými příčnými vazbami po vulkanizaci je předpokládána úzká závislost, proto křivka závislosti množství příčných vazeb na tloušťce a křivka závislosti tvrdosti na tloušťce budou mít analogický tvar. Na Obr. 31 je zobrazena křivka tvrdosti mezi první a druhou vrstvou.



Obr. 31 – Závislost tvrdosti na tloušťce

Při měření tvrdosti metodou Shore A může indentor vniknout do materiálu maximálně do hloubky 2,5 mm (tento stav odpovídá tvrdosti 0 ShA). V tomto případě zkoušené vrstvy tělesa nejsou homogenní, co se týká tvrdosti a vnikáním indentoru se mění odpor materiálu proti vniknutí (Obr. 32).



Obr. 32 – Zobrazení změny tvrdosti při metodě Shore A

Pokud byla měřena tvrdost Shore A ze dvou stran v jednom řezu kostky, tvrdoměr ukazoval rozdílné hodnoty, protože indentor vnikal do velké hloubky od místa řezu a proto byla metoda Shore A označená jako nevyhovující a tvrdost byla dále vyhodnocovaná pomocí normy ČSN EN ISO 48 na tvrdoměru IRHD

od společnosti Affri System. Podle předpokládaného rozsahu tvrdosti byla použita metoda N.



Obr. 33 – Tvrdoměr Affri IRHD

Tab. 14 – Vlastnosti přístroje IRHD

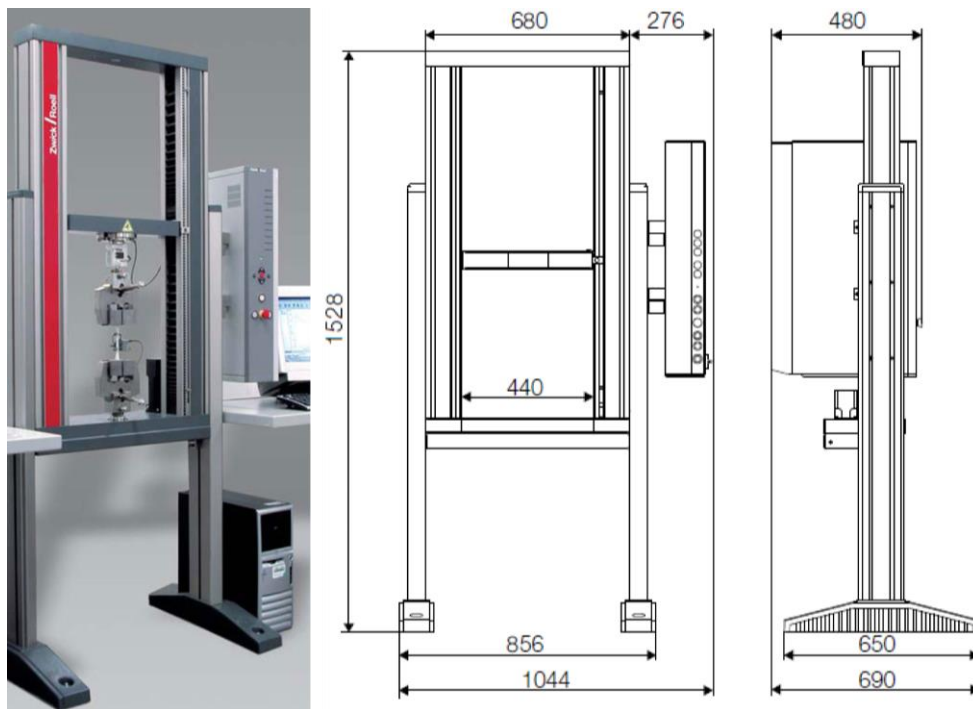
výrobce:	Affri System
typ měření:	IRHD
princip fungování:	podle normy ISO 48
měřené metody:	metoda L (10 - 35) IRHD
	metoda N (30 - 85) IRHD
	metoda H (85 - 100) IRHD
	metoda M (mikrotvrdost)
rozsah přístroje:	10 - 100 IRHD
rozlišitelnost přístroje:	0,1°
přesnost přístroje:	0,2°

3.5.2 Tahová zkouška tlustostěnných výrobků

Tahová zkouška byla prováděna na stroji Zwick/Roell Z005 (Obr. 35). Nejprve musel být výstřik (kostka) dělen na požadované vrstvy. K řezání vrstev došlo na stroji Fortuna UAF 470 (Obr. 34), který je schopný oddělovat vrstvy od tloušťky 0,2 mm. Potřebná tloušťka zkušební tělesa je 1 mm, proto i jednotlivé vrstvy byly řezány na tento rozměr. Byly odebrány dvě krajní vrstvy, nahoře a dole kostky rovnoběžně s dělicí rovinou, dále střední vrstva a dvě mezivrstvy v poloviční vzdálenosti mezi středem a krajem kostky.



Obr. 34 – Dělicí stroj Fortuna UAF 470



Obr. 35 – Základní rozměry stroje Zwick/Roell Z005

Poté co z jednotlivých vrstev bylo vyseknuto těleso pro tahovou zkoušku, byla tato zkouška provedena na stroji Zwick/Roell Z005, přičemž prodloužení zkušebních těles bylo měřeno na laserovém extenzometru. Zkouška byla realizována až 24 hodin po vyseknutí. Během této doby došlo k relaxaci a uvolnění napětí ve vzorku vzniklým dělením.

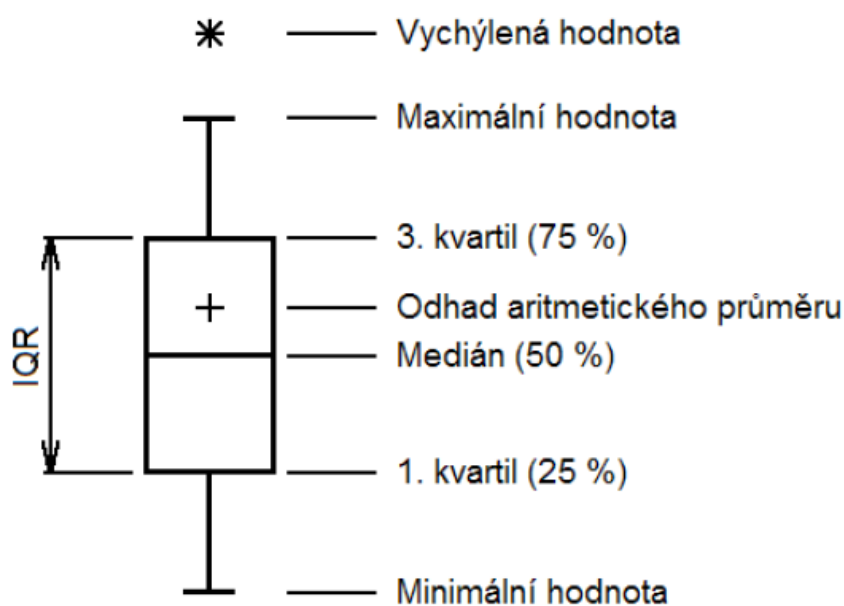
Tab. 15 – Základní parametry stroje Zwick/Roell Z005

Zatěžující síla FN:	[kN]	5
Šířka pracovního prostoru:	[mm]	440
Výška pracovního prostoru:	[mm]	1070
Max. posuv pohyblivé čelisti:	[mm]	1000
Celková výška stroje:	[mm]	1528
Celková šířka stroje:	[mm]	1044
Celková hloubka stroje:	[mm]	690
Celková hmotnost stroje:	[kg]	161
Minimální rychlost čelistí:	[mm/s]	0,001
Normalizovaná rychlost čelistí:	[mm/s]	500
Přesnost rychlosti (z nastavené):	[%]	0,05

3.5.3 Vyhodnocení dat pomocí Box-plotového diagramu

Naměřené hodnoty byly zpracovány v programu MS Excel, jednalo se o hodnoty z analýz i z praktického měření tvrdosti a pevnosti v tahu. V příloze jsou data zobrazena pomocí Box – plotového diagramu a jsou zpracovány v programu Minitab Release 16.

Box – plotový diagram umožňuje zobrazení až sedm statistických veličin plus zobrazení vychýlených hodnot.



Obr. 36 – Box-plotový diagram [58]

V průběhu vyhodnocování naměřených dat byly u jednotlivých měření popisovány níže uvedené veličiny:

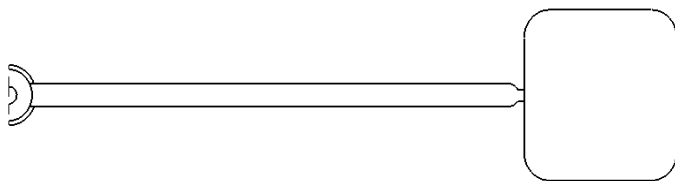
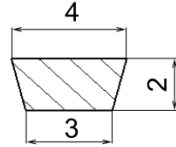
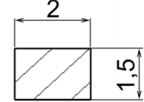
- *Počet „n“* - udává velikost výběrového statistického souboru dat.
- *Odhad aritmetického průměru „x“* - udává odhad střední hodnoty výběrového statistického souboru dat.
- *Odhad směrodatné odchylky „s“* - udává, o kolik se naměřené hodnoty průměrně odchyľují od odhadu aritmetického průměru.
- *Odhad rozptylu „s²“* - udává kvadratickou hodnotu odhadu směrodatné odchylky.
- *Minimální hodnota „Min“* - udává minimální naměřenou hodnotu vyskytující se ve výběrovém statistickém souboru dat.
- *1. Kvartil „Q₁“* - udává 25% kvantil výběrového statistického souboru dat.
- *Medián výběrového souboru „M“* - udává 50% kvantil výběrového statistického souboru dat.
- *3. Kvartil „Q₃“* - udává 75% kvantil výběrového statistického souboru dat.
- *Maximální hodnota „Max“* - udává maximální naměřenou hodnotu vyskytující se ve výběrovém statistickém souboru dat.
- *Variační rozpětí „R“* - definuje rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou nacházející se ve výběrovém statistickém souboru dat.
- *Interkvartilové rozpětí „IQR“* - udává rozdíl mezi třetím kvantilem Q₃ a prvním kvantilem Q₁ výběrového statistického souboru. [58]

4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

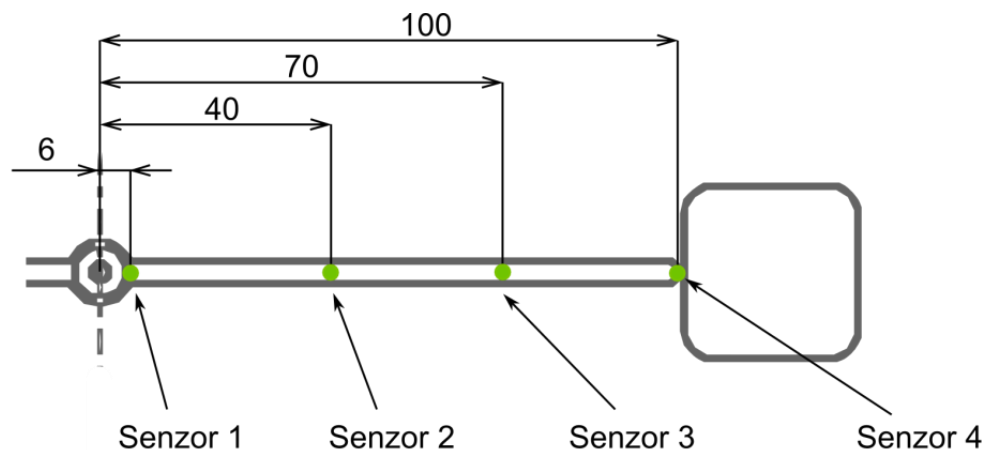
4.1 Vliv změny indexu neneutonského chování na průběh vulkanizace

První část simulací se věnuje vlivu změny reologických vlastností, konkrétně indexu neneutonského chování materiálu, na průběh vstřikování. Výsledky zobrazují, jak velký podíl má změna materiálové konstanty na vznik tepla vlivem disipační energie. Simulace byly realizovány na jednom typu modelu při jedné teplotě formy a různých rychlostech vstřikování.

Tab. 16 – Geometrie kanálu a procesní podmínky

Trajektorie kanálu	
Geometrie	
Průřez kanálu [mm]	
Vtokové ústí [mm]	
Rychlost [mm/s]	5; 10; 15; 20; 30
Teplota [°C]	170 °C

Geometrie vtokového kanálu byly na délce osazené 4 senzory k získání výsledků v jednotlivých částech kanálu.



Obr. 37 – Umístění senzorů ve vtokovém kanálu

Pro simulace byl použit materiál z databáze softwaru Cadmould NBR 60 Shore, u kterého byl měněn index neneutonského chování tak, jak lze vidět v Tab. 17.

Tab. 17 – Reologické vlastnosti směsi

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
T_0	[°C]	90
T_S	[°C]	-88,44

Index neneutonského chování byl měněný v rozmezí (0,2 – 1,0) a v programu Cadmould 3D-F je nadefinovaný jako $n = 1 - P_3$.

Tab. 18 – Vulkanizační vlastnosti směsi

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

Z procesních podmínek byla měněna pouze rychlost vstřikování. Další nastavené procesní parametry výpočtové analýzy jsou vyobrazeny v Tab. 19.

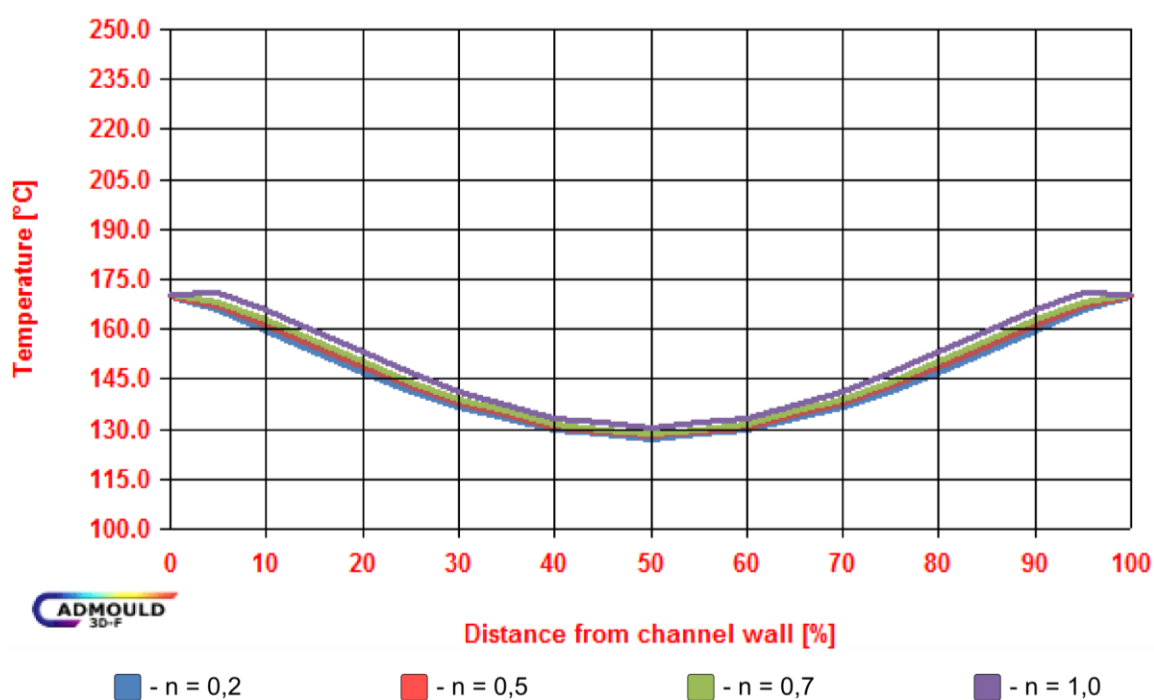
Tab. 19 – Procesní parametry

Veličiny	Jednotky	Varianta				
		I.	II.	III.	IV.	V.
Rychlost pístu stroje	[mm/s]	5	10	15	20	30
Průtokové množství	[cm ³ /s]	0,7	1,5	2,3	3,0	3,8
Tlakem řízené plnění při	[%]	99				
Teplota taveniny	[°C]	100				
Teplota formy	[°C]	170				
Vulkanizace ve formě	[s]	600				
Vulkanizace mimo formu	[s]	200				

4.1.1 Rychlost pístu $v = 5 \text{ mm/s}$ Tab. 20 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 5 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$

	Čas vstřikování	Potřebný tlak	Teplota ve vtok. ústí	Vulkanizace
	[s]	[bar]	[°C]	[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 potřebný na tok materiálu od trysky k vtokovému ústí je přibližně 6,0 s, po kterých nejvyšší teplotní rozdíl u materiálu s $n = 0,2$ a $n = 1$ činí přibližně 5 °C . Vulkanizace je tímto teplotním navýšením zkrácená asi o 19 s.

Obr. 38 – Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_3 ($T = 170 \text{ °C}$, $v = 5 \text{ mm/s}$)

Při malých rychlostech vstřikování je míra disipačního tepla malá. Výhodou pomalého toku materiálu přes rozvodný kanál je fakt, že materiál se prohřeje po celé svojí tloušťce, ve středu rozvodného kanálu i na cca 130 °C .

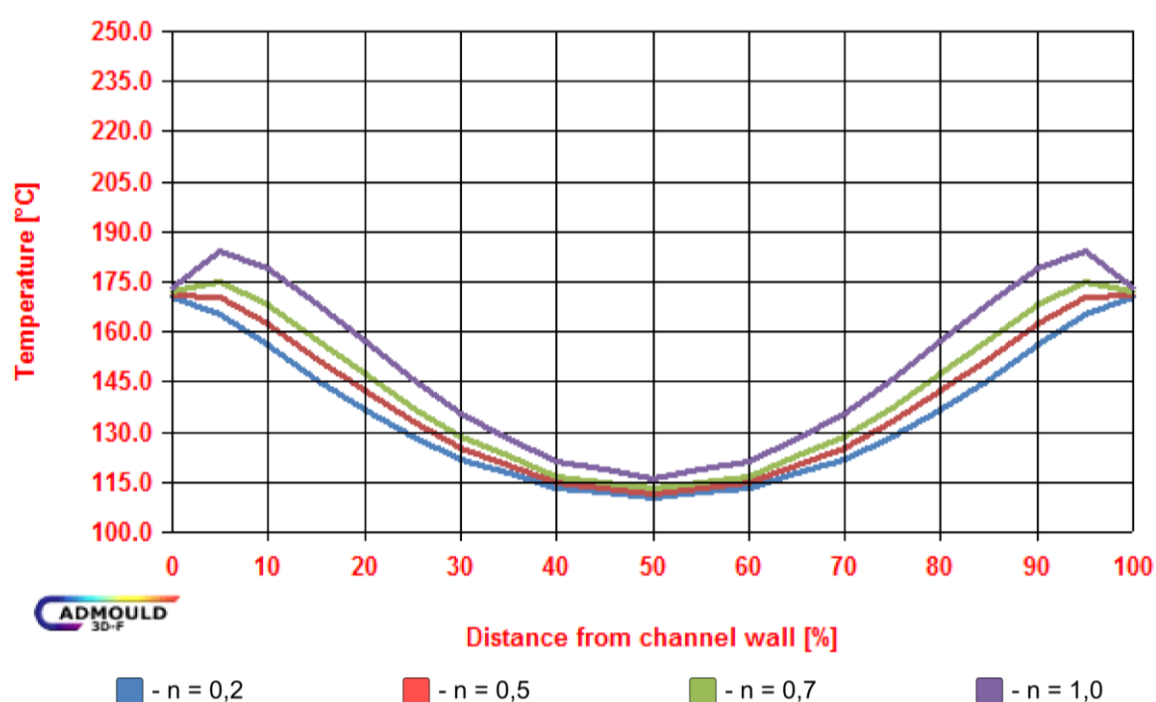
Tab. 21 – Generované smykové napětí ve vtokovém ústí ($T = 170 \text{ °C}$)

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

4.1.2 Rychlost pístu $v = 10 \text{ mm/s}$ Tab. 22 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 10 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$

	Čas vstřikování	Potřebný tlak	Teplota ve vtok. ústí	Vulkanizace
	[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 stroje k vtokovému ústí materiál překoná za téměř 2,9 s. Největší rozdíl teploty ve vtokovém ústí je mezi materiály s indexem neneutronského chování 0,2 a 1,0 a to přibližně 15 °C , přičemž tento nárůst teploty zkrátí čas vulkanizace o přibližně 45 s.

Obr. 39 - Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_3 ($T = 170 \text{ °C}$, $v = 10 \text{ mm/s}$)

Zvyšováním vstřikovacího tlaku důsledkem změny parametru P_3 , postupně narůstá hodnota vzniklého smykového napětí (Tab. 23), čím dochází ke zvýšenému zahřívání materiálu vlivem disipace a tím pádem i ke zkrácení času vulkanizace.

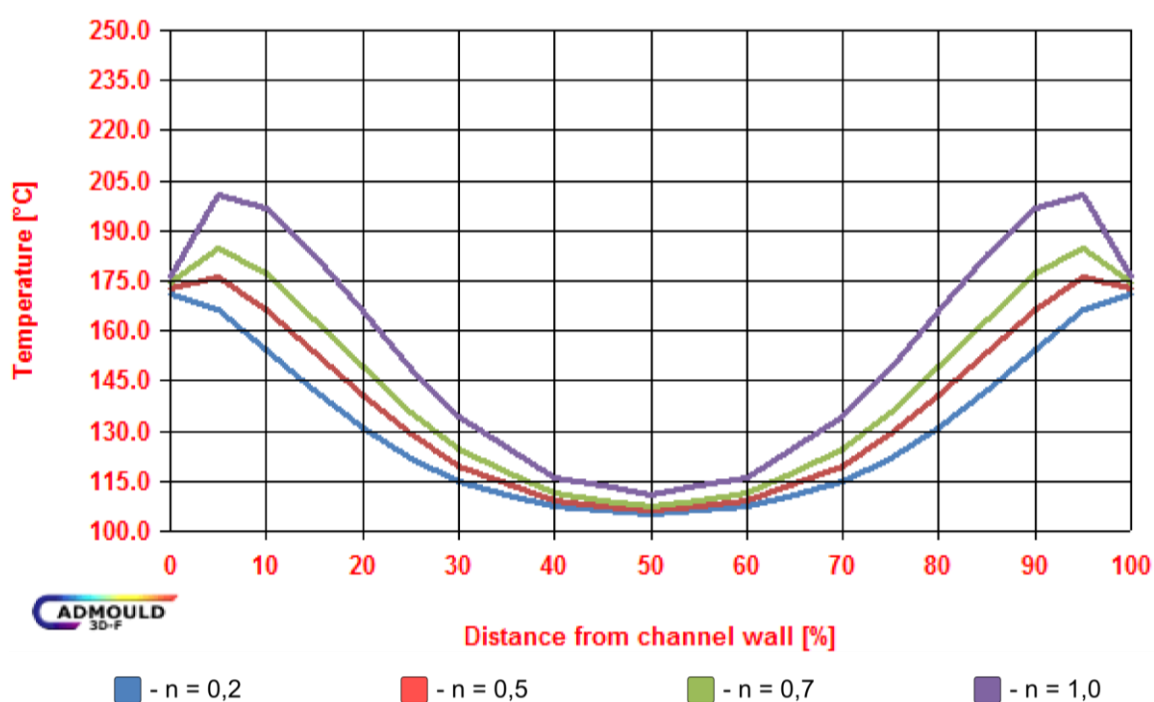
Tab. 23 – Generované smykové napětí ve vtokovém ústí ($T = 170 \text{ °C}$)

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

4.1.3 Rychlost pístu $v = 15 \text{ mm/s}$ Tab. 24 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 15 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$

	Čas vstřikování	Potřebný tlak	Teplota ve vtok. ústí	Vulkanizace
	[s]	[bar]	[°C]	[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 potřebný na dosažení vtokového ústí čelem taveniny je přibližně 1,9 s. Největší difference teplot ve vtokovém ústí je mezi materiálem s $n = 0,2$ a $n = 0,1$ – přibližně 24 °C , čím se opět zkrátí vulkanizační čas okolo 62 s.

Obr. 40 - Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P3 ($T = 170 \text{ °C}$, $v = 15 \text{ mm/s}$)

Z Obr. 40 je zřejmé, že množství disipované energie narůstá s klesajícím odklonem od newtonského chování. Čím je hodnota indexu nenewtonského chování vyšší, tím je vyšší smykové napětí při toku materiálu (Tab. 25).

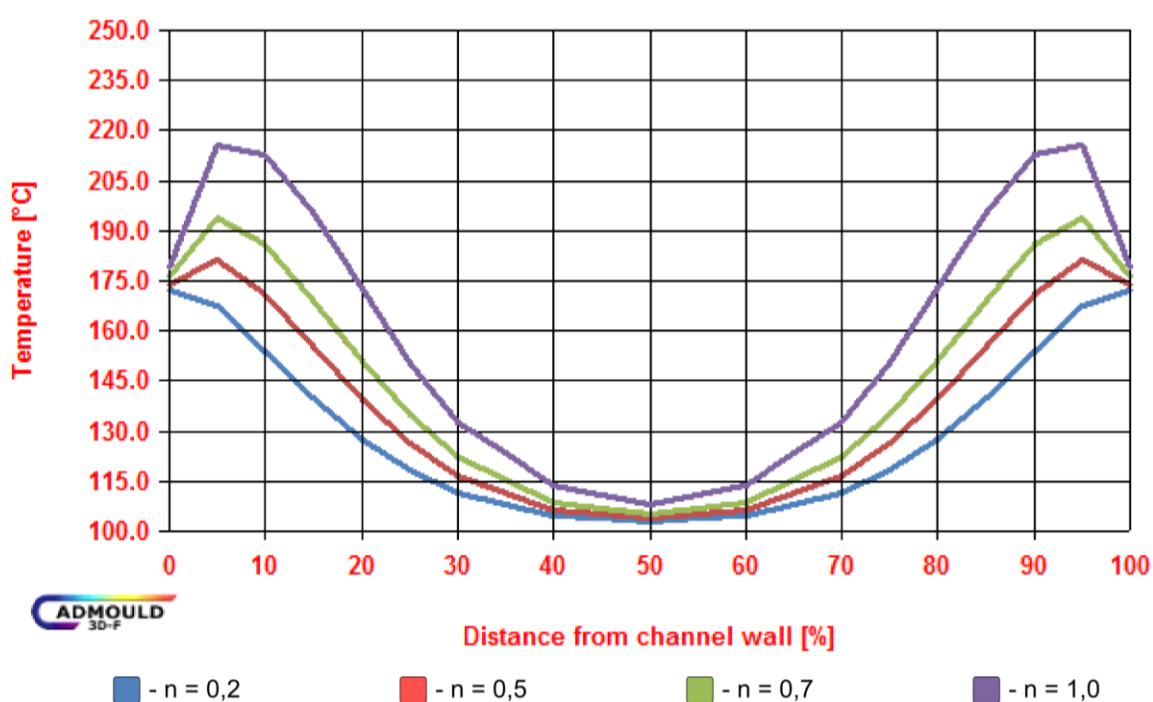
Tab. 25 – Generované smykové napětí ve vtokovém ústí ($T = 170 \text{ °C}$)

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

4.1.4 Rychlost pístu $v = 20\text{ mm/s}$ Tab. 26 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 20\text{ mm/s}$, $T = 170\text{ °C}$

	Čas vstřikování	Potřebný tlak	Teplota ve vtok. ústí	Vulkanizace
	[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 dosáhne úroveň senzoru 4, vtokového ústí přibližně za 1,4 s. Opět je největší rozdíl průměrné teploty ve vtokovém ústí mezi materiálem s $n = 0,2$ a $n = 1,0$ a činí okolo 31 °C , což urychlí vulkanizaci o asi 73 s.

Obr. 41 - Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_3 ($T = 170\text{ °C}$, $v = 20\text{ mm/s}$)

Stejná tendence jako v předcházejících případech, index newtonského chování ovlivňuje množství disipovaného tepla a tím i smykové napětí (Tab. 27), teplotu, potřebný tlak na zaplnění dutiny formy a čas vulkanizace.

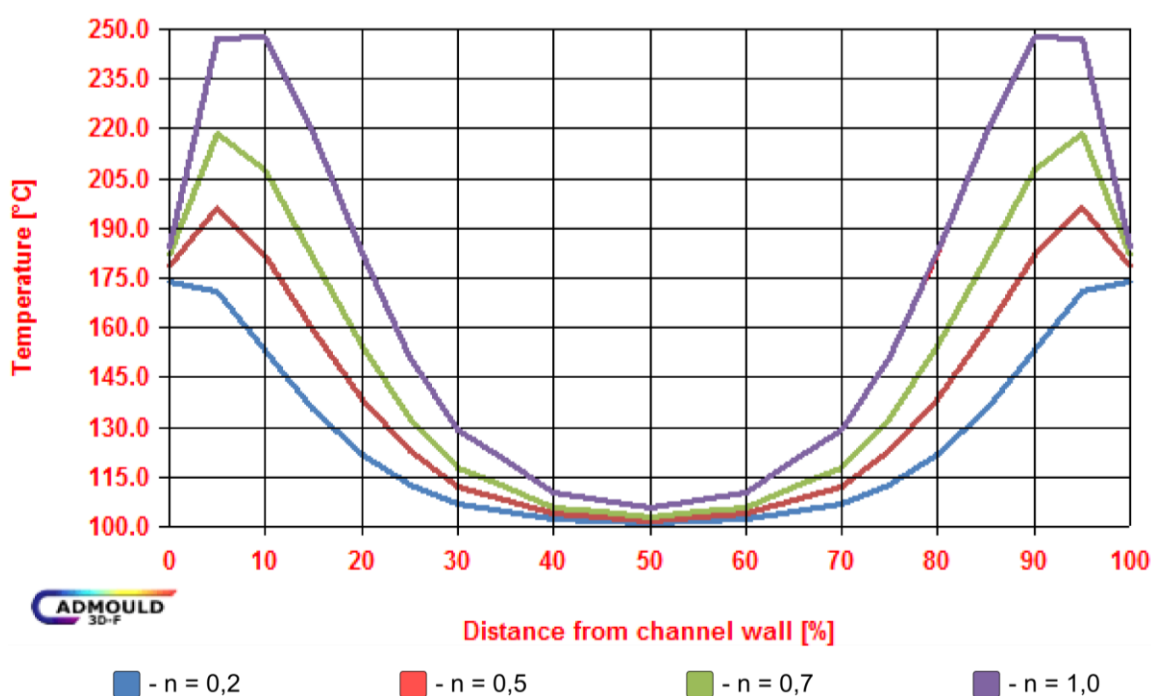
Tab. 27 – Generované smykové napětí ve vtokovém ústí ($T = 170\text{ °C}$)

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

4.1.5 Rychlost pístu $v = 30$ mm/sTab. 28 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 30$ mm/s, $T = 170$ °C

	Čas vstřikování [s]	Potřebný tlak [bar]	Teplota ve vtok. ústí [°C]	Vulkanizace [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

Doba, kdy materiál projede přes rozvodný kanál před vstupem do dutiny formy je přibližně 0,9 s. Největší rozdíl průměrné teploty ve vtokovém ústí je téměř 42 °C, čím se sníží vulkanizační čas skoro o 90s mezi materiály $n = 0,2$ a $n = 1,0$.

Obr. 42 - Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_3 ($T = 170$ °C, $v = 30$ mm/s)

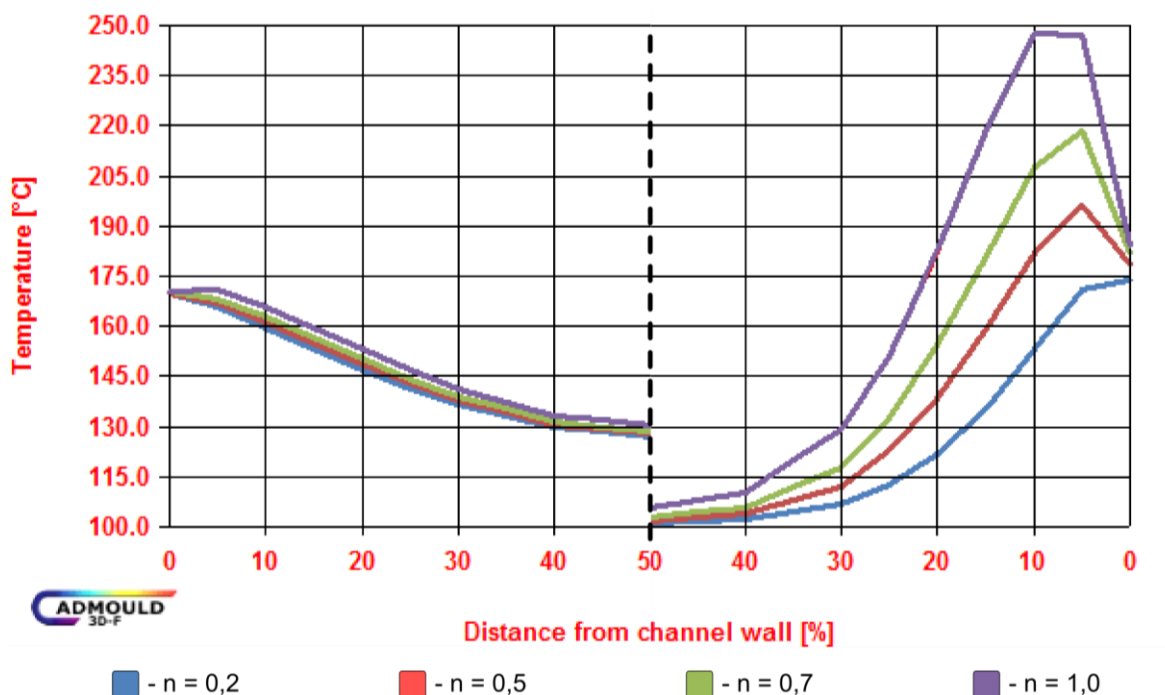
S narůstající rychlostí vstřikování narůstá taktéž podíl disipační energie. Největší smykové napětí je opět u materiálu s indexem nenevtonského chování $n = 1,0$, při kterém je taktéž potřebný největší tlak na zaplnění dutiny formy.

Tab. 29 – Generované smykové napětí ve vtokovém ústí ($T = 170$ °C)

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

4.1.6 Shrnutí výsledků

Čím je odklon od newtonského chování vyšší, tím více narůstá potřebný tlak na zaplnění dutiny formy. S narůstajícím tlakem a klesajícím časem vstřikování, podstupuje materiál větší smykové namáhání, což má za následek nárůst teploty a tím i zkrácení vulkanizačního času.



Obr. 43 – Porovnání teplotních profilů při $v = 5 \text{ mm/s}$ (vlevo) a $v = 30 \text{ mm/s}$ (vpravo)

Pokud je použit materiál s výrazným odklonem od newtonského chování, je výhodnější ho zpracovat při nižších rychlostech vstřikování. V tomto případě dominuje ohřev materiálu vlivem přestupu tepla. Naopak, pokud materiál má mírný odklon od newtonského chování, je výhodnější, aby byl vstřikován při vyšších rychlostech, kdy převažuje ohřev směsí pomocí disipace – přeměny mechanické energie na tepelnou, avšak za cenu nutnosti generování vysokého vstřikovacího tlaku, který není možné vždy na vstřikovací stroji vyvinout. Výhodou je zkrácení vstřikovacího cyklu.

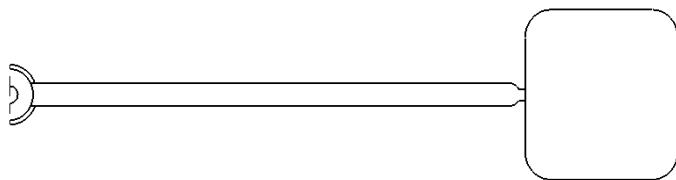
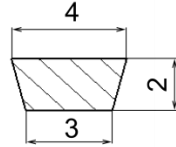
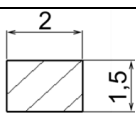
Tab. 30 – Rozdíl výsledných hodnot mezi materiály $n = 0,2$ a $n = 0,1$ ($T = 170^\circ\text{C}$)

170 °C	vulkanizace [s]			\bar{T} senzor 4 [°C]			vstřikovací 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

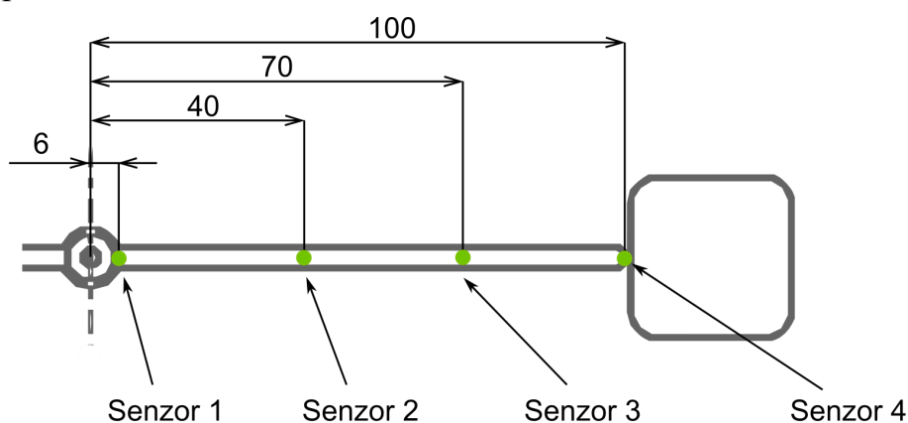
4.2 Vliv změny relaxačního času na průběh vulkanizace

Druhá část simulací vstřikování navazuje na první, věnuje se vlivu dalšího materiálového parametru a tím je relaxační čas. Simulace byly realizované na stejném modelu, jako v předchozí úloze, při stejné teplotě formy a různých rychlostí vstřikování.

Tab. 31 – Geometrie kanálu a procesní podmínky

Trajektorie kanálu	
Geometrie	
Průřez kanálu [mm]	
Vtokové ústí [mm]	
Rychlost [mm/s]	5; 10; 15; 20; 30
Teplota [°C]	170 °C

Geometrie vtokového kanálu byly na délce opět osazeny 4 senzory k získání výsledků v průřezu kanálu.



Obr. 44 – Umístění senzorů ve vtokovém kanálu

Materiál byl použit z databáze softwaru Cadmould NBR 60 Shore, u kterého byl v tomto případě měněn relaxační čas, tak jak lze vidět v Tab. 32.

Tab. 32 – Reologické vlastnosti směsi

Carreau - William Landel Ferry model		
P_1	[Pa.s]	16486,1
P_2	[s]	1;0,1;0,01;0,001
P_3	[-]	0,728
λ	[1/s]	1; 10; 100; 1000
T_0	[°C]	90
T_S	[°C]	-88,44

Relaxační čas zde byl měněn v rozmezí (1 – 1000) a v programu Cadmould 3D-F je nadeřinovaný jako $\lambda = 1/P_2$.

Tab. 33 – Vulkanizační vlastnosti směsi

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

Z procesních podmínek byla změněna pouze rychlost vstřikování. Další nastavené procesní parametry výpočtové analýzy jsou vyobrazeny v Tab. 34.

Tab. 34 – Procesní parametry

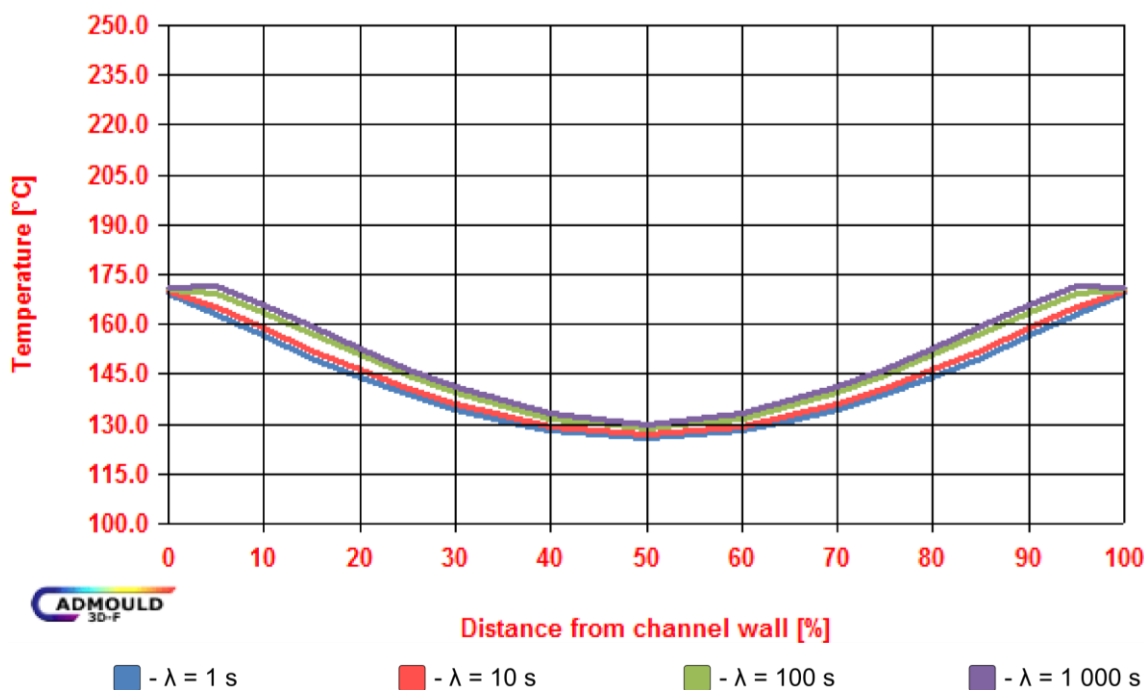
Veličiny	Jednotky	Varianta				
		I.	II.	III.	IV.	V.
Rychlost pístu stroje	[mm/s]	5	10	15	20	30
Průtokové množství	[cm ³ /s]	0,7	1,5	2,3	3,0	3,8
Tlakem řízené plnění při	[%]	99				
Teplota taveniny	[°C]	100				
Teplota formy	[°C]	170				
Vulkanizace ve formě	[s]	600				
Vulkanizace mimo formu	[s]	200				

4.2.1 Rychlost pístu $v = 5 \text{ mm/s}$

Tab. 35 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 5 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$

	Čas vstřikování	Potřebný tlak	Teplota ve vtok. ústí	Vulkanizace
	[s]	[bar]	[°C]	[s]
$\lambda = 1$	79,9	47	142,1	390
$\lambda = 10$	79,9	254	143,7	385
$\lambda = 100$	80,1	735	147,3	373
$\lambda = 1000$	80,1	998	149,0	365

Z výsledků je patrné, že tlak potřebný k zaplnění dutiny formy a potřebný k dodržení stálé rychlosti vstřikování roste se zvětšující se konstantou λ . I když tlak s relaxačním časem narůstá, naopak čas k dosažení optima vulkanizace klesá. Rozdíl mezi $\lambda = 1 \text{ s}^{-1}$ a $\lambda = 1000 \text{ s}^{-1}$ při rychlosti $v = 5 \text{ mm/s}$ činí 25 s.



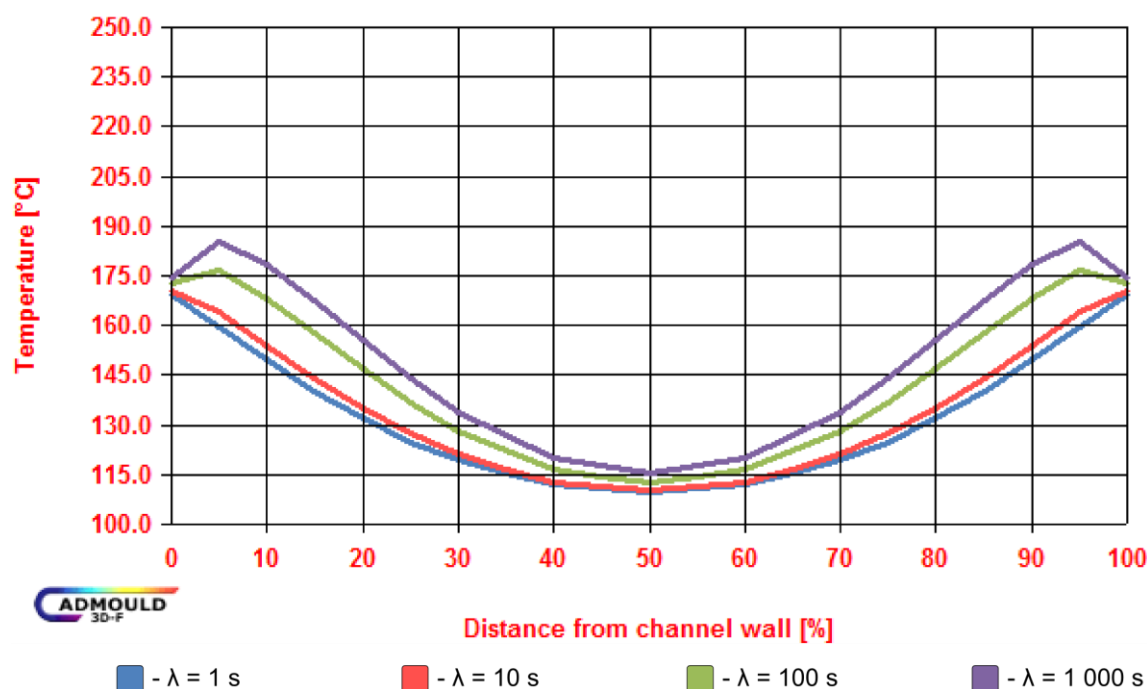
Obr. 45 – Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_2 ($T = 170 \text{ °C}$, $v = 5 \text{ mm/s}$)

4.2.2 Rychlost pístu $v = 10 \text{ mm/s}$

Tab. 36 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 10 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$

	Čas vstřikování	Potřebný tlak	Teplota ve vtok. ústí	Vulkanizace
	[s]	[bar]	[°C]	[s]
$\lambda = 1$	37,3	57	130,5	404
$\lambda = 10$	37,2	327	132,8	400
$\lambda = 100$	37,4	1234	141,3	377
$\lambda = 1000$	37,3	1914	147,9	359

U rychlosti pístu $v = 10$ mm/s lze vidět u materiálů s vyšší hodnotou relaxačního času, že se začíná projevovat disipace stejně tak, jak tomu bylo u materiálů s malým odklonem od newtonského chování.



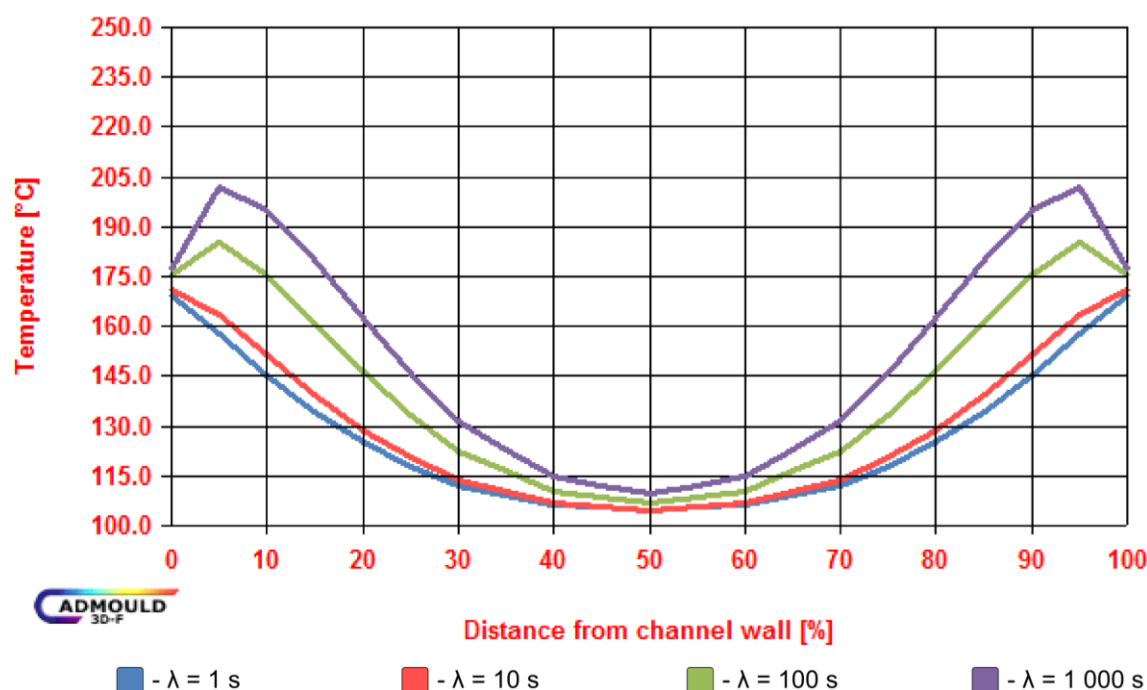
Obr. 46 – Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_2 ($T = 170$ °C, $v = 10$ mm/s)

4.2.3 Rychlost pístu $v = 15$ mm/s

Tab. 37 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 15$ mm/s, $T = 170$ °C

	Čas vstřikování	Potřebný tlak	Teplota ve vtok. ústí	Vulkanizace
	[s]	[bar]	[°C]	[s]
$\lambda = 1$	24,3	62	125,1	410
$\lambda = 10$	24,3	369	128,0	407
$\lambda = 100$	24,3	1541	140,6	380
$\lambda = 1000$	24,4	2548	151,8	351

S rostoucí rychlostí vstřikování, roste míra vlivu disipace. Dutina je zaplněna dříve, vzrostl i vstřikovací tlak. U materiálu $\lambda = 1000$ s⁻¹ začíná být disipace tolik význačná, že čas k dosažení optima vulkanizace je u tohoto materiálu nižší, než u rychlosti $v = 10$ mm/s.



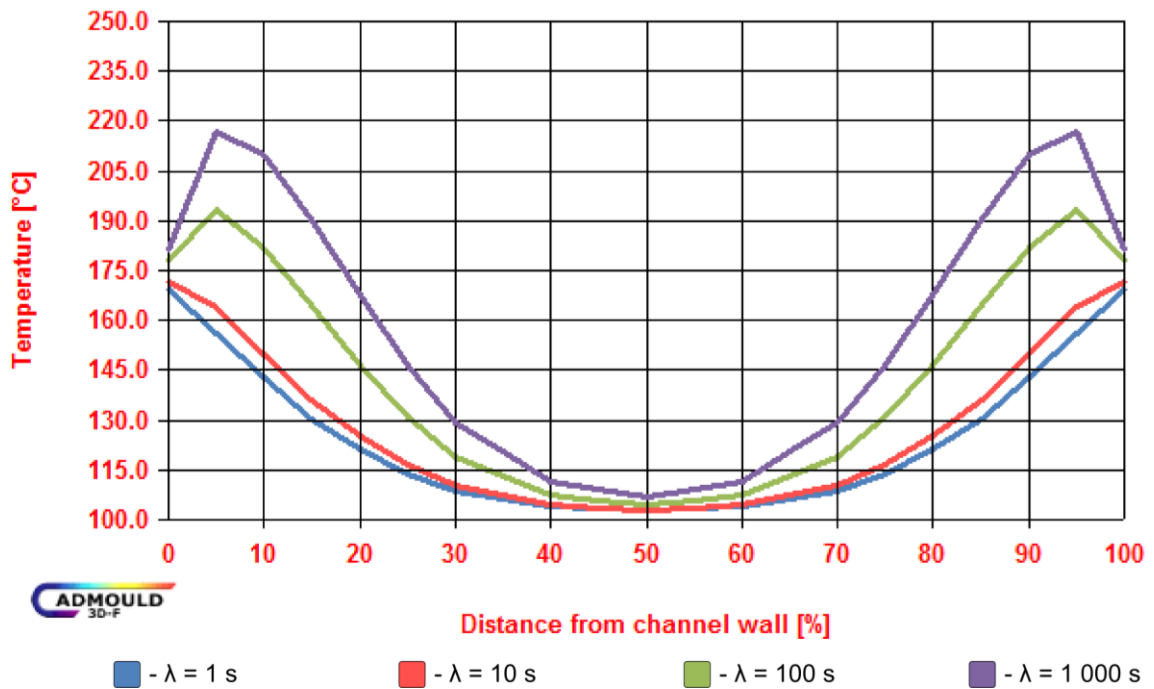
Obr. 47 – Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_2 ($T = 170$ °C, $v = 15$ mm/s)

4.2.4 Rychlost pístu $v = 20$ mm/s

Tab. 38 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 20$ mm/s, $T = 170$ °C

	Čas vstřikování	Potřebný tlak	Teplota ve vtok. ústí	Vulkanizace
	[s]	[bar]	[°C]	[s]
$\lambda = 1$	18,6	66	122,4	415
$\lambda = 10$	18,6	396	125,5	409
$\lambda = 100$	18,7	1729	140,8	378
$\lambda = 1000$	18,7	2956	155,5	345

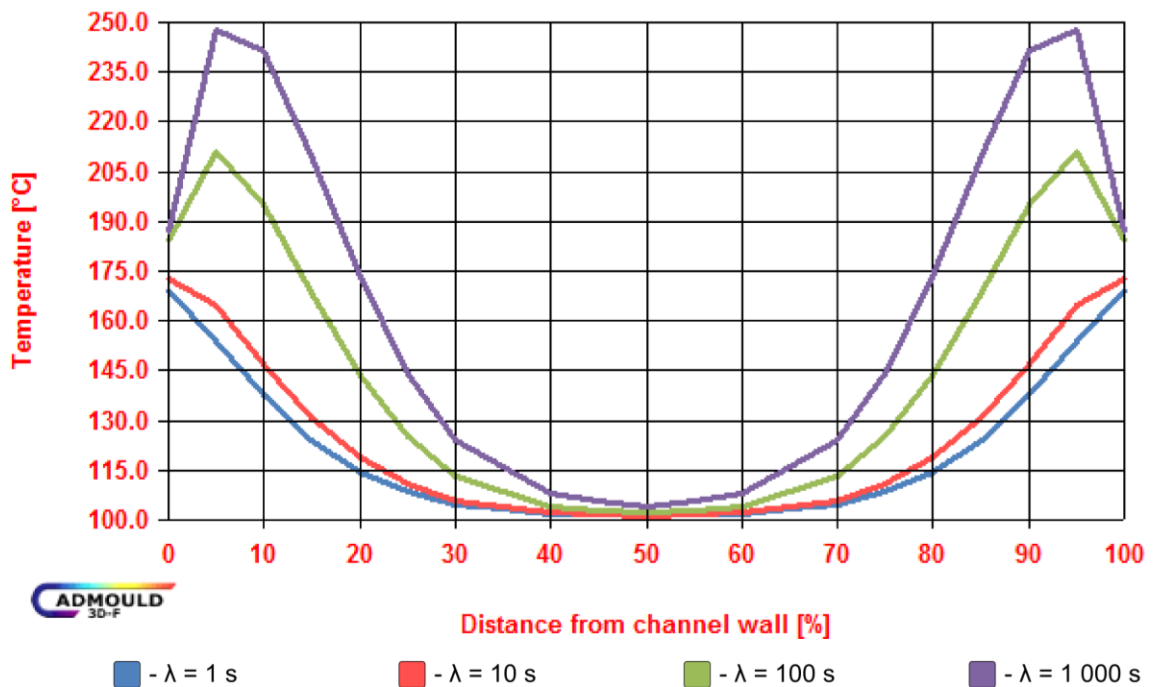
U rychlosti $v = 20$ mm/s průběhy křivek navazují na stejnou tendenci jako u předchozích. Vstřikovací tlak nadále roste, čas vstřikování klesá. Čas potřebný pro z vulkanizování 90% všech příčných vazeb klesá u materiálu s vyšším relaxačním časem ($\lambda = 100$ s⁻¹ a vyšší). U těchto materiálů se projevuje ovlivnění teploty taveniny více disipací než přestupem.



Obr. 48 – Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_2 ($T = 170$ °C, $v = 20$ mm/s)

4.2.5 Rychlost pístu $v = 30$ mm/s

Nejvyšší analyzovaná rychlost vstřikování byla $v = 30$ mm/s, která odpovídala průtokovému množství $3,8$ cm³/s. Čas potřebný na zaplnění dutiny formy byl téměř 12, 2 s. Během tohoto času se materiál ve středu vtokového kanálu nestihl vůbec ohřát. U materiálu s velkým relaxačním časem průměrná teplota ve vtokovém ústí prudce vzrostla.



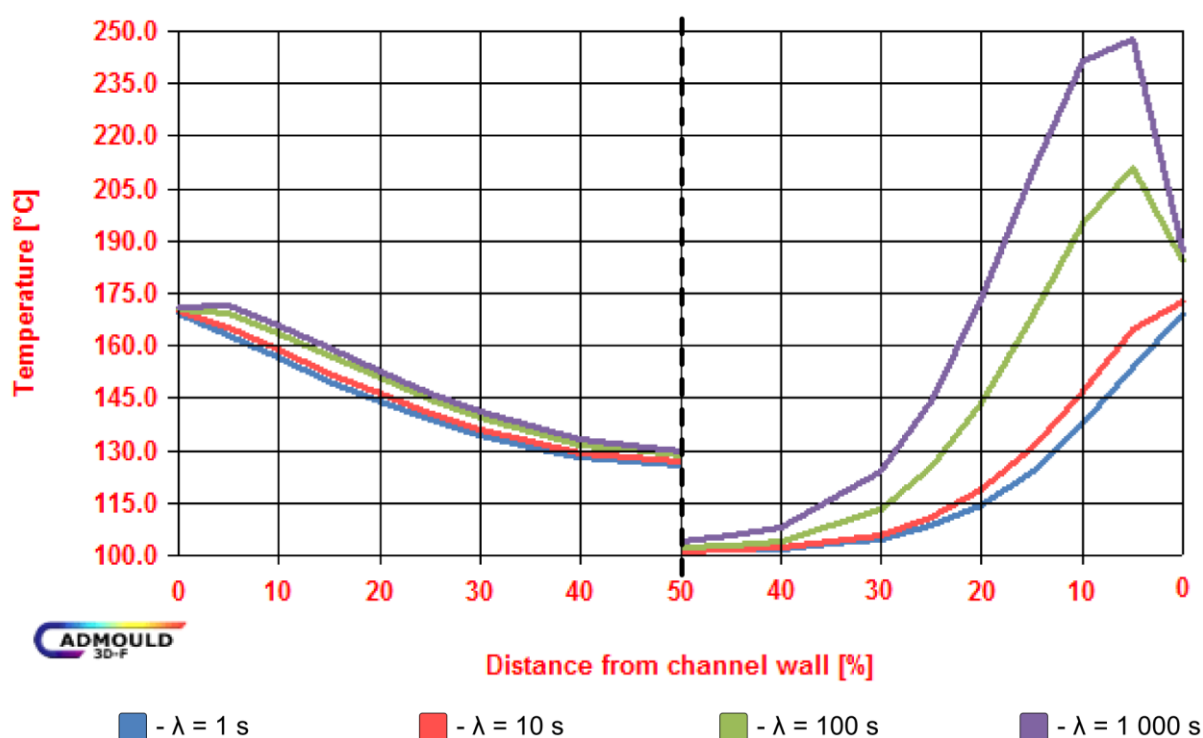
Obr. 49 – Průběh teploty v tloušťce vtokového ústí při změně P_2 ($T = 170$ °C, $v = 30$ mm/s)

Tab. 39 – Výsledky ze simulací u rychlosti (pístu) $v = 30 \text{ mm/s}$, $T = 170 \text{ °C}$

	Čas vstřikování	Potřebný tlak	Teplota ve vtok. ústí	Vulkanizace
	[s]	[bar]	[°C]	[s]
$\lambda = 1$	12,1	73	118,5	419
$\lambda = 10$	12,2	441	122,5	412
$\lambda = 100$	12,2	2018	142,4	381
$\lambda = 1000$	12,2	3599	163,0	338

4.2.6 Shrnutí úlohy

Čím je hodnota relaxačního času vyšší, tím narůstá potřebný tlak na zaplnění dutiny formy. S narůstajícím tlakem a klesajícím časem vstřikování, podstupuje materiál větší smykové namáhání, to má za následek nárůst teploty a tím i zkrácení vulkanizačního času.


 Obr. 50 – Porovnání teplotních profilů při $v = 5 \text{ mm/s}$ (vlevo) a $v = 30 \text{ mm/s}$ (vpravo)

 Tab. 40 – Rozdíl výsledných hodnot mezi materiály $\lambda = 1$ a $\lambda = 1000$ ($T = 170 \text{ °C}$)

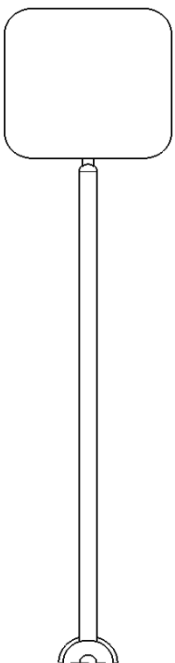
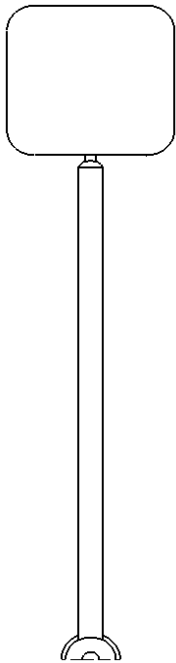
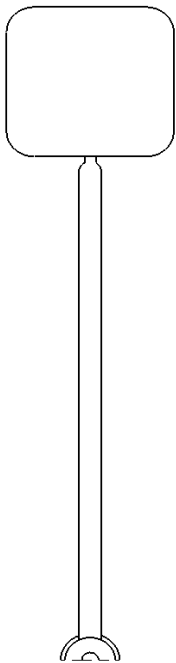
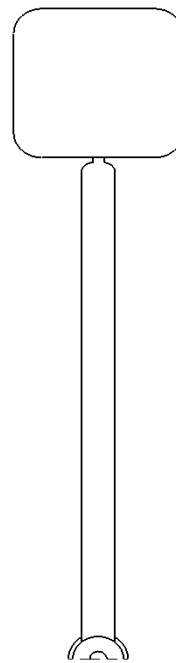
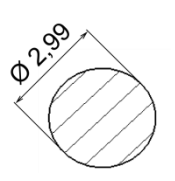
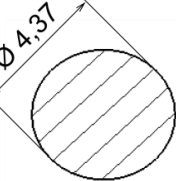
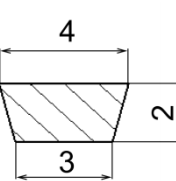
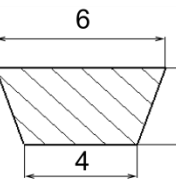
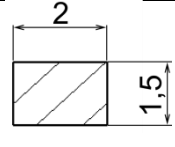
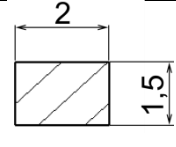
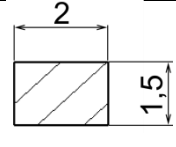
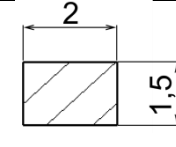
170 °C	vulkanizace [s]			\bar{T} senzor 4 [°C]			vstřikovací tlak [bar]		
	$v = 5$	$v = 30$	Δ	$v = 5$	$v = 30$	Δ	$v = 5$	$v = 30$	Δ
$\lambda = 1$	390	419	+29	142,1	118,5	-23,6	47	73	+26
$\lambda = 1000$	365	338	-27	149,0	163,0	+14	998	3599	+2601

Pokud má materiál nízkou hodnotu relaxačního času, je výhodnější ho zpracovat při nižších rychlostech vstřikování. V tomto případě dominuje ohřev materiálu vlivem přestupu tepla. Naopak, má-li materiál vysokou hodnotu relaxačního času, je výhodnější, aby byl vstřikován při vyšších rychlostech, kdy převa-

žuje ohřev směsi pomocí disipace – přeměny mechanické energie na tepelnou, avšak za cenu nutnosti generování vysokého vstřikovacího tlaku, který není možné vždy vyvinout na vstřikovacím stroji, výhodou však je zkrácení vstřikovacího cyklu.

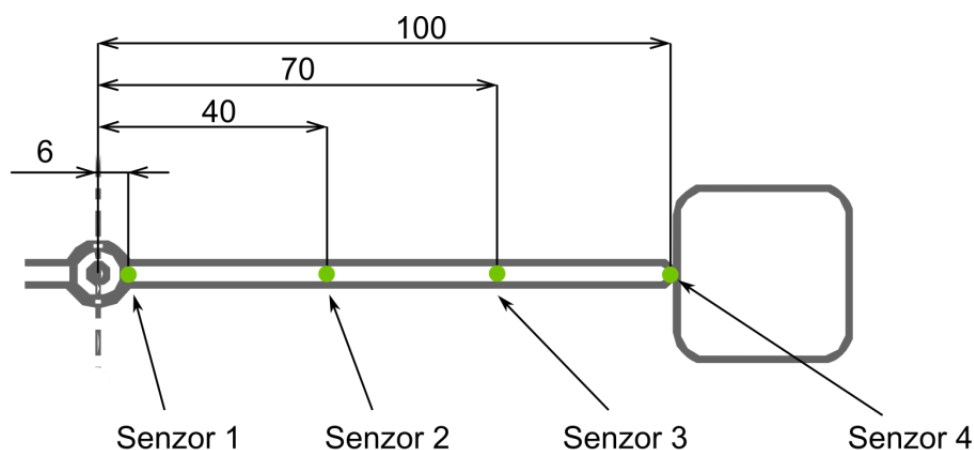
4.3 Vliv průřezu vtokového kanálu na průběh vulkanizace

Tab. 41 – Geometrie vtokových kanálů

	A	B		C	D
Geometrie vtokového kanálu					
Průřez [mm]					
Vtokové ústí [mm]					
Plocha	7 mm ²	15 mm ²		7 mm ²	15 mm ²
Teplota stěny formy	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

Třetí úloha se zabírala vlivem tvaru průřezu kanálu na průběh vulkanizace. Tento vliv byl opět realizovaný v simulačním programu Cadmould 3D-F.

Průřez se podél délky kanálu neměnil, byl tedy konstantní. Na modely byly umístěny čtyři senzory, které sloužily pro zobrazení průběhu teplotního pole.



Obr. 51 – Umístění senzorů ve v tokovém kanále

Proměnnými veličinami v nastavení procesních podmínek byla rychlost vstřikování, která je v analýzách vyjádřena pomocí průtokového množství materiálu procházející přes trysku a teplota formy. Množství vstřikovaného materiálu se mění v rozmezí $(0,7 - 38) \text{ cm}^3/\text{s}$ a teplota formy je parametr měněný v rozsahu $(155 - 185)^\circ\text{C}$. Nadefinované procesní podmínky jsou shrnuté v Tab. 42.

Tab. 42 – Procesní podmínky

Veličiny	Jednotky	Varianta				
		I.	II.	III.	IV.	V.
Rychlost pístu stroje	[mm/s]	5	10	50	150	250
Průtokové množství	[cm^3/s]	0,7	1,5	7,6	22,8	38,0
Tlakem řízené plnění při	[%]	99				
Teplota taveniny	[$^\circ\text{C}$]	100				
Teplota formy	[$^\circ\text{C}$]	155; 170; 185				
Vulkanizace ve formě	[s]	600				
Vulkanizace mimo formu	[s]	200				

Materiál použitý v analýzách byl stejný jako v předchozích úlohách NBR 60 Shore. Nebyly u něj upravovány žádné parametry.

4.3.1 Teplota 155°C

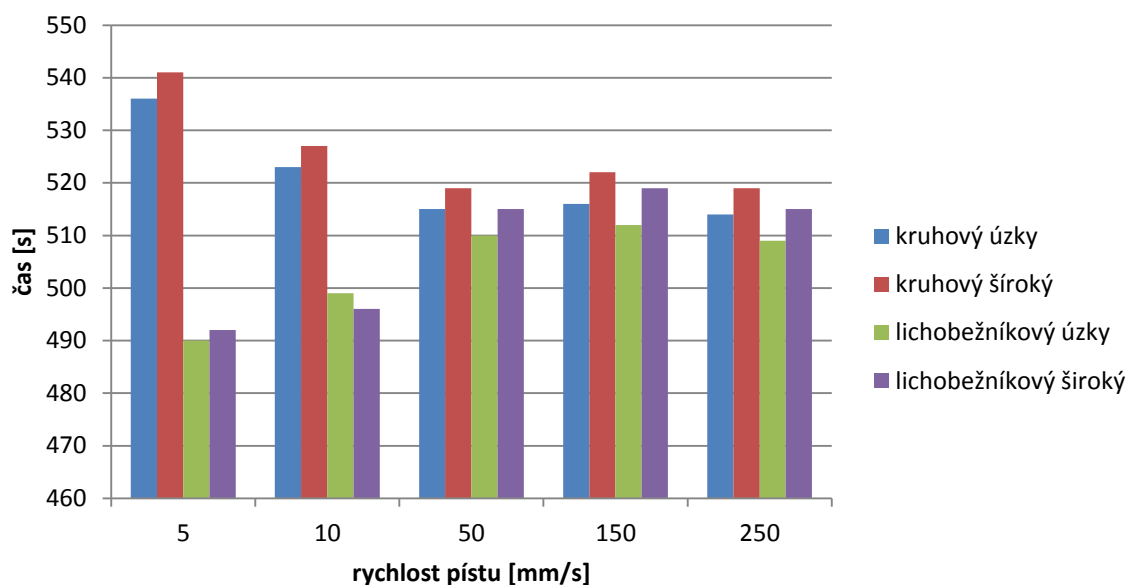
Teplota stěny formy byla nastavená na 155°C , úloha byla vypočítána pro pět variant rychlosti. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 43 – 46. V Tab. 43 je uvedena doba plnění formy pro různé nastavení rychlosti vstřikování.

Tab. 43 – Čas vstřikování při 155 °C

v [mm/s]	T=155°C VSTŘIKOVÁNÍ [s]			
	úzký		široký	
	kruhový	lichoběžníkový	kruhový	lichoběžníkový
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. 44 – Čas potřebný na vytvoření 90% příčných vazeb

v [mm/s]	T=155°C VSTŘIKOVÁNÍ + VULKANIZACE [s]			
	úzký		široký	
	kruhový	lichoběžníkový	kruhový	lichoběžníkový
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



Obr. 52 – Graf závislosti rychlosti vstřikování a tvaru kanálu na čase vulkanizace (155 °C)

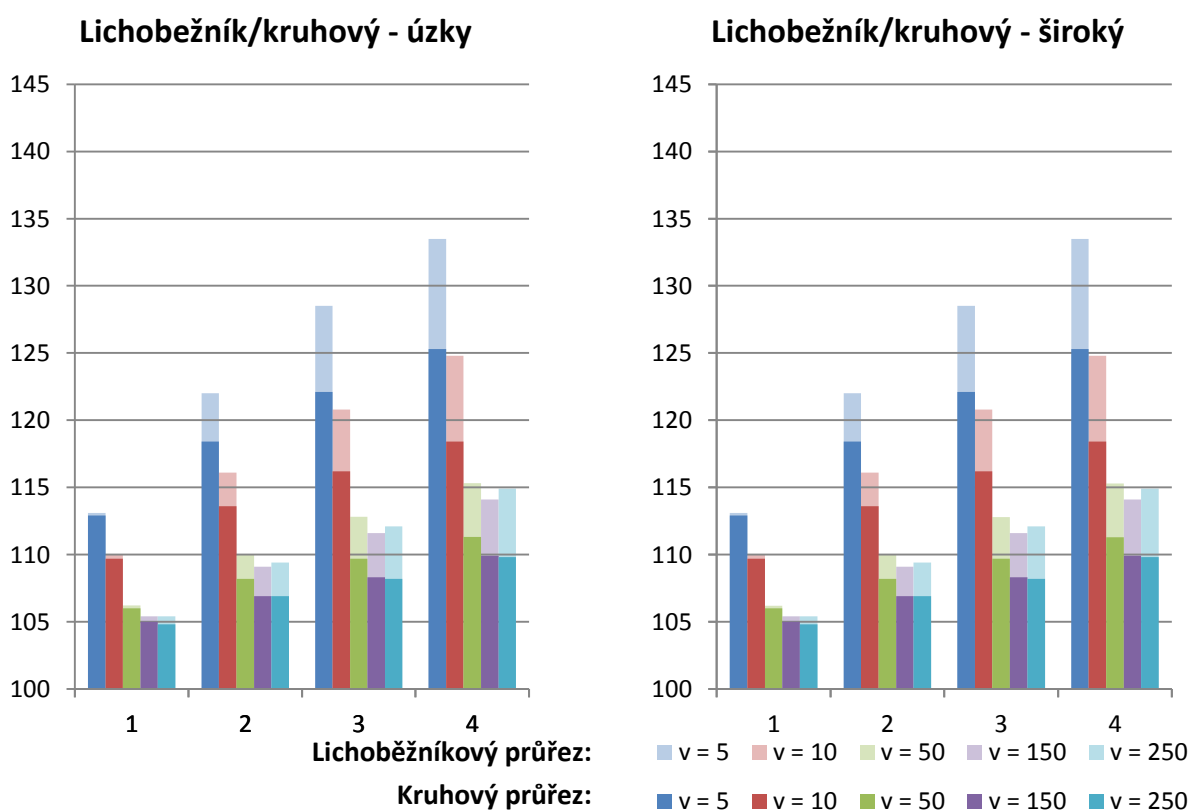
Tab. 44. informuje o čase, kdy směs dosáhla 90% příčných vazeb (tzv. optima vulkanizace). Materiál je ohříván již ve vtokovém kanálu během vstřikování, proto je tento výsledek složen z doby vstřikování i doby ohřevu (vulkanizace) po naplnění dutiny formy. Tyto výsledky jsou také zobrazeny v následujícím grafu (Obr. 52). Tab. 45 – 46 informují o změně teplot v jednotlivých senzorech.

Tab. 45 – Vývin teplotního pole ve vtokovém systému (úzké průřezy – 155 °C)

155 °C KRUHOVÝ - ÚZKÝ					155 °C LICHOBĚŽNÍKOVÝ - ÚZKÝ				
v	Číslo senzoru				v	Číslo senzoru			
[mm/s]	1.	2.	3.	4.	[mm/s]	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. 46 – Vývin teplotního pole ve vtokovém systému (široké průřezy – 155 °C)

155 °C KRUHOVÝ - ŠÍROKÝ					155 °C LICHOBĚŽNÍKOVÝ-ŠÍROKÝ				
v	Číslo senzoru				v	Číslo senzoru			
[mm/s]	1.	2.	3.	4.	[mm/s]	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. 53 – Porovnání teploty v jednotlivých senzorech při úzkém a širokém průřezu (155 °C)

4.3.2 Teplota 170 °C

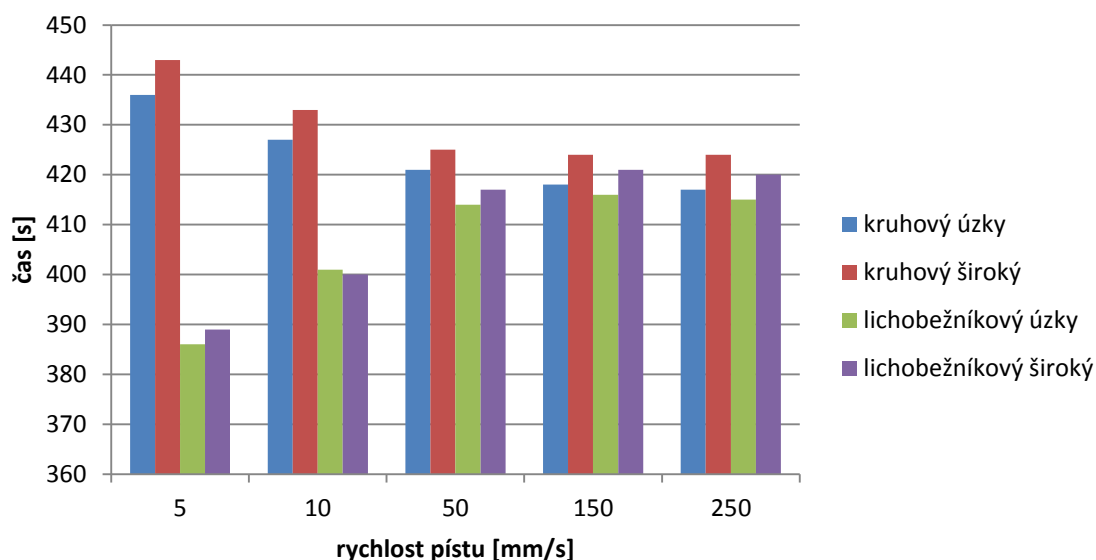
Procesní parametry a nastavení analýz jsou stejné jako v předcházející úloze, došlo pouze ke zvýšení teploty stěny formy na 170°C. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 46 – 50. V Tab. 46 je uvedena doba plnění formy pro různé nastavení rychlosti vstřikování.

Tab. 47 – Čas vstřikování při 170 °C

T=170°C	VSTŘIKOVÁNÍ [s]			
	úzký		široký	
v [mm/s]	kruhový	lichoběžníkový	kruhový	lichoběžníkový
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. 48 – Čas potřebný na vytvoření 90% příčných vazeb

T=170°C	VSTŘIKOVÁNÍ + VULKANIZACE [s]			
	úzký		široký	
v [mm/s]	kruhový	lichoběžníkový	kruhový	lichoběžníkový
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



Obr. 54 – Graf závislosti rychlosti vstřikování a tvaru kanálu na čase vulkanizace (170 °C)

Tab. 48. informuje o čase, kdy směs dosáhla 90% příčných vazeb (tzv. optima vulkanizace). Materiál je ohříván již ve vtokovém kanálu během vstřikování,

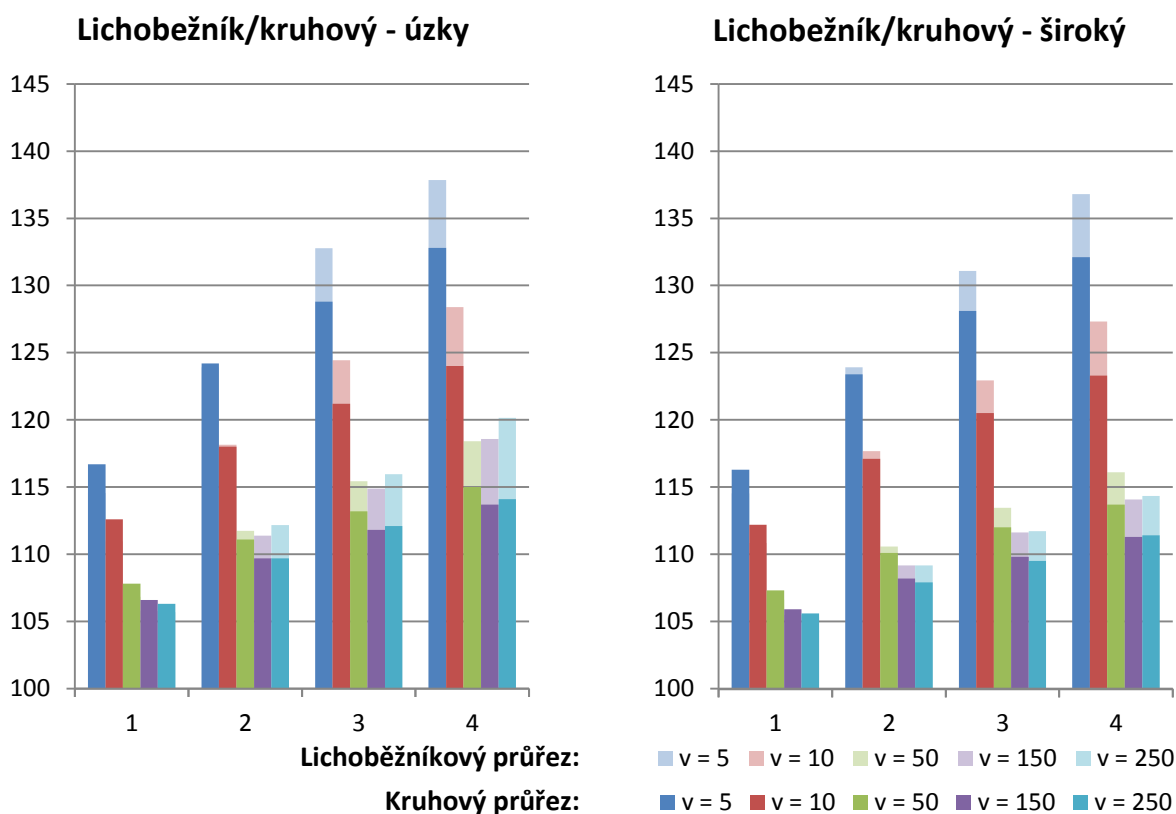
proto je tento výsledek složen z doby vstřikování i doby ohřevu (vulkanizace) po naplnění dutiny formy. Tyto výsledky jsou také zobrazeny v následujícím grafu (Obr. 54). Tab. 49 – 50 informují o změně teplot v jednotlivých senzorech.

Tab. 49 – Vývin teplotního pole ve vtokovém systému (úzké průřezy – 170 °C)

170 °C KRUHOVÝ - ÚZKÝ					170 °C LICHOBĚŽNÍKOVÝ - ÚZKÝ				
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. 50 – Vývin teplotního pole ve vtokovém systému (široké průřezy – 170 °C)

170 °C KRUHOVÝ - ŠÍROKÝ					170 °C LICHOBĚŽNÍKOVÝ-ŠÍROKÝ				
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. 55 – Porovnání teploty v jednotlivých senzorech při úzkém a širokém průřezu (170 °C)

4.3.3 Teplota 185 °C

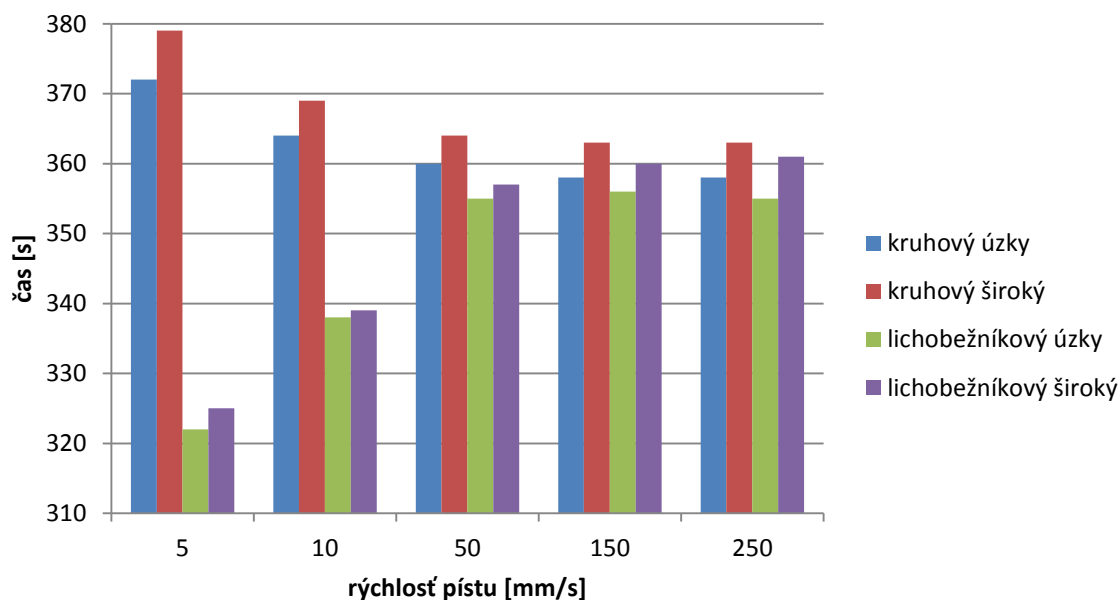
Nastavení teploty stěny formy bylo zvýšeno na 185 °C. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 51 – 54. V Tab. 51 je uvedena doba plnění formy pro různé nastavení rychlosti vstřikování.

Tab. 51 – Čas vstřikování při 185 °C

T=185°C	VSTŘIKOVÁNÍ [s]			
	úzký		široký	
v [mm/s]	kruhový	lichoběžníkový	kruhový	lichoběžníkový
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. 52 – Čas potřebný na vytvoření 90% příčných vazeb

T=185°C	VSTŘIKOVÁNÍ + VULKANIZACE [s]			
	úzký		široký	
v [mm/s]	kruhový	lichoběžníkový	kruhový	lichoběžníkový
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



Obr. 56 - Graf závislosti rychlosti vstřikování a tvaru kanálu na čase vulkanizace (185 °C)

Tab. 52. informuje o čase, kdy směs dosáhla 90% příčných vazeb (tzv. optima vulkanizace). Materiál je ohříván již ve vtokovém kanálu během vstřikování,

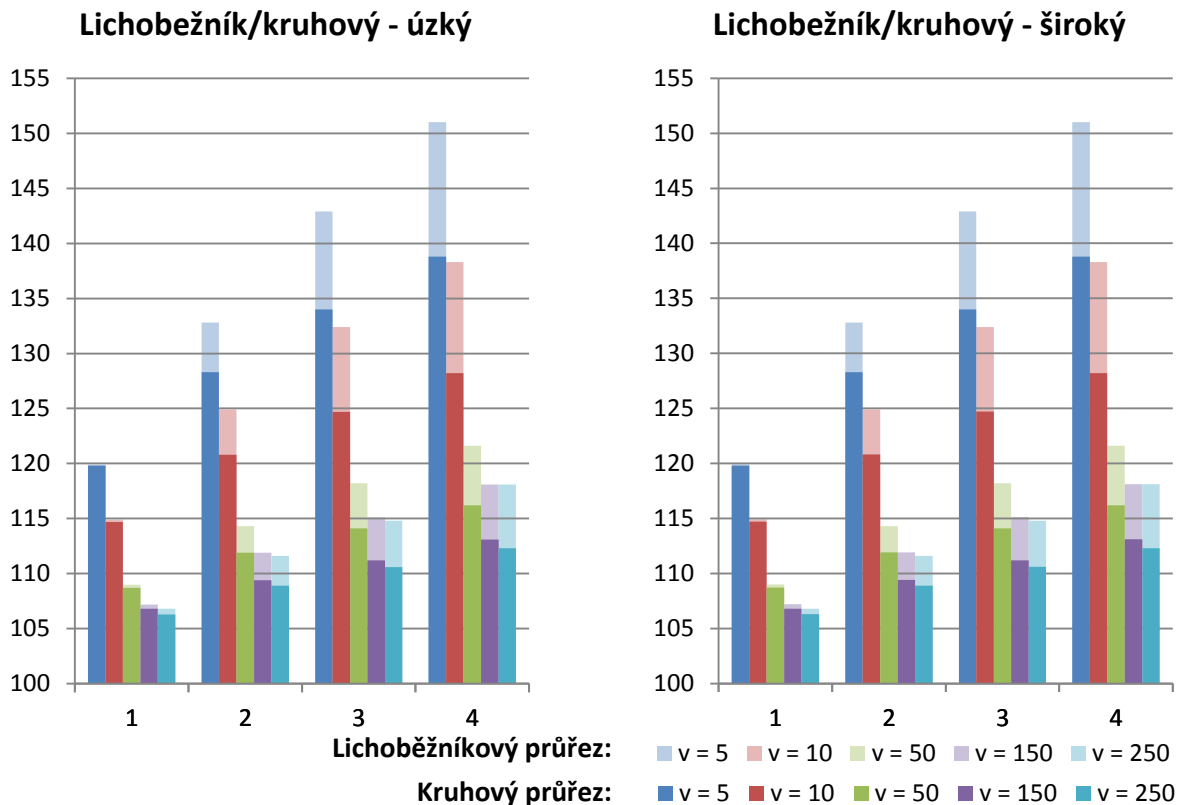
proto je tento výsledek složen z doby vstřikování i doby ohřevu (vulkanizace) po naplnění dutiny formy. Tyto výsledky jsou také zobrazeny v následujícím grafu (Obr. 56). Tab. 53 – 54 informují o změně teplot v jednotlivých senzorech.

Tab. 53 – Vývin teplotního pole ve vtokovém systému (úzké průřezy – 185 °C)

185 °C KRUHOVÝ - ÚZKÝ					185 °C LICHOBĚŽNÍKOVÝ - ÚZKÝ				
v [mm/s]	Číslo senzoru				v [mm/s]	Číslo senzoru			
	1.	2.	3.	4.		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. 54 – Vývin teplotního pole ve vtokovém systému (široké průřezy – 185 °C)

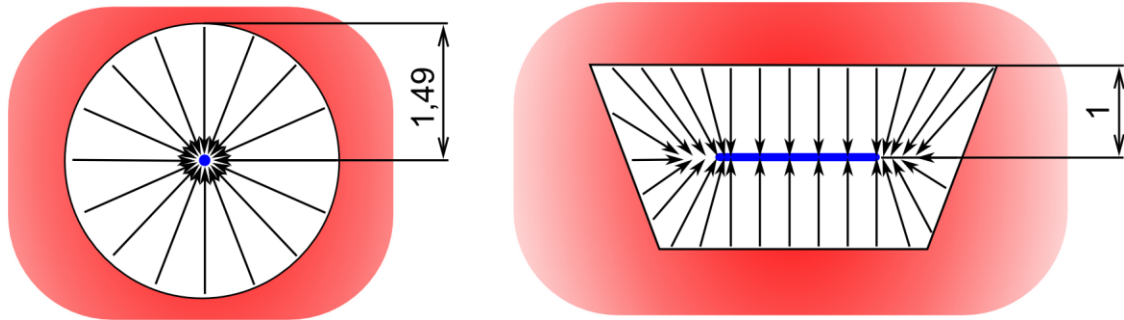
185 °C KRUHOVÝ - ŠIROKÝ					185 °C LICHOBĚŽNÍKOVÝ-ŠIROKÝ				
v [mm/s]	Číslo senzoru				v [mm/s]	Číslo senzoru			
	1.	2.	3.	4.		1.	2.	3.	4.
5	119,8	128,3	134	138,8	5	119,9	132,8	142,9	151,0
10	114,7	120,8	124,7	128,2	10	114,9	124,9	132,4	138,3
50	108,7	111,9	114,1	116,2	50	109,0	114,3	118,2	121,6
150	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. 57 – Porovnání teploty v jednotlivých senzorech při úzkém a širokém průřezu (185 °C)

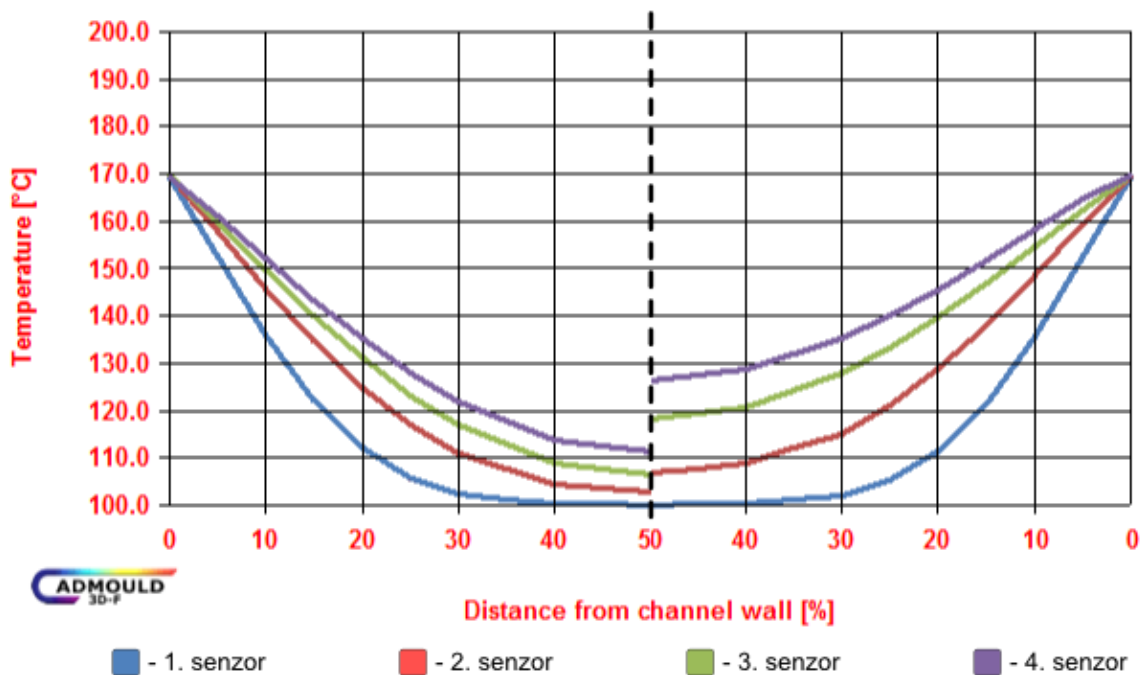
4.3.4 Diskuze výsledků

U lichoběžníkových vtokových kanálů je zjevný vyšší nárůst teploty z důvodu větší kontaktní plochy s dutinou formy při zachování průřezu 15 mm^2 . Zatímco u lichoběžníkového průřezu je obvod kanálu 11,12 mm, u kruhového průřezu je obvod jen 9,36 mm. Druhým důvodem je fakt, že nejvzdálenější část lichoběžníkového vtokového kanálu je od vytemperované dutiny formy vzdálená maximálně 1 mm, u kruhového průřezu je to pouze 1,49 mm.



Obr. 58 – Nejvzdálenější bod u vtokových kanálů

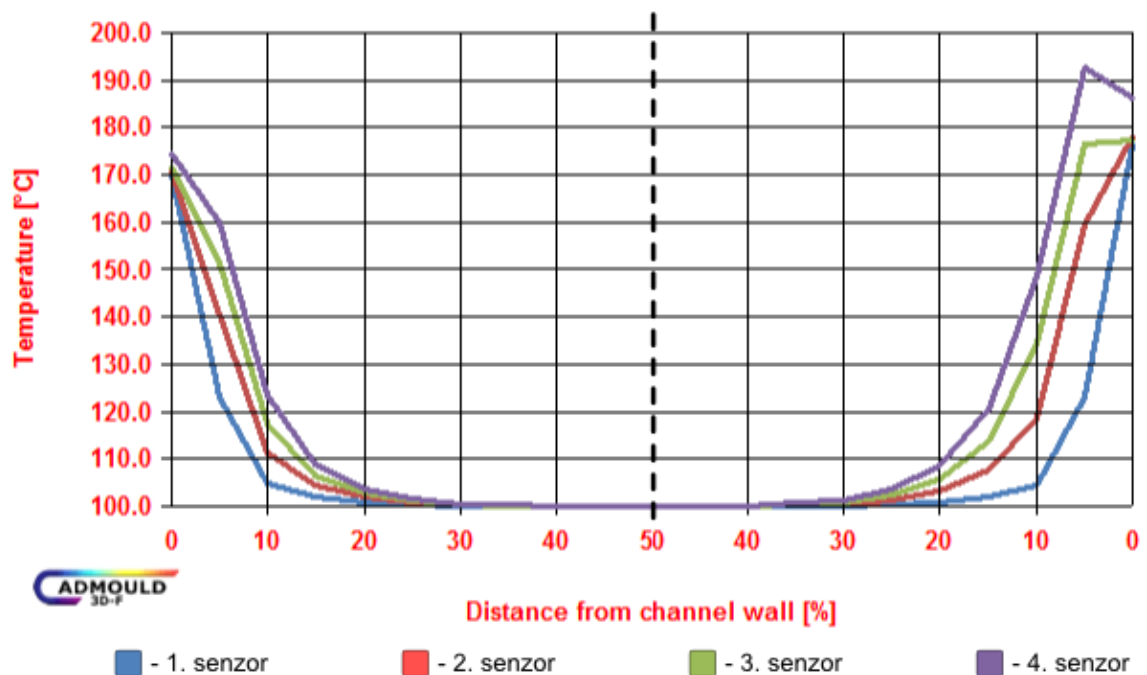
Největší rozdíl mezi kruhovým a lichoběžníkovým průřezem je možné vidět při pomalých rychlostech, kdy je materiálu poskytnut dostatek času na zvýšení teploty ve vtokovém systému a do dutiny formy tak vstupuje více předehřátý. Na obrázku je možné sledovat průběh teplotního pole u nízkých rychlostí vstříkávání pro kruhový a lichoběžníkový průřez.



Obr. 59 – Vývoj teploty u kruhového (vlevo) a lichoběžníkového (vpravo) kanálu ($170 \text{ }^\circ\text{C}$, $v = 5 \text{ mm/s}$)

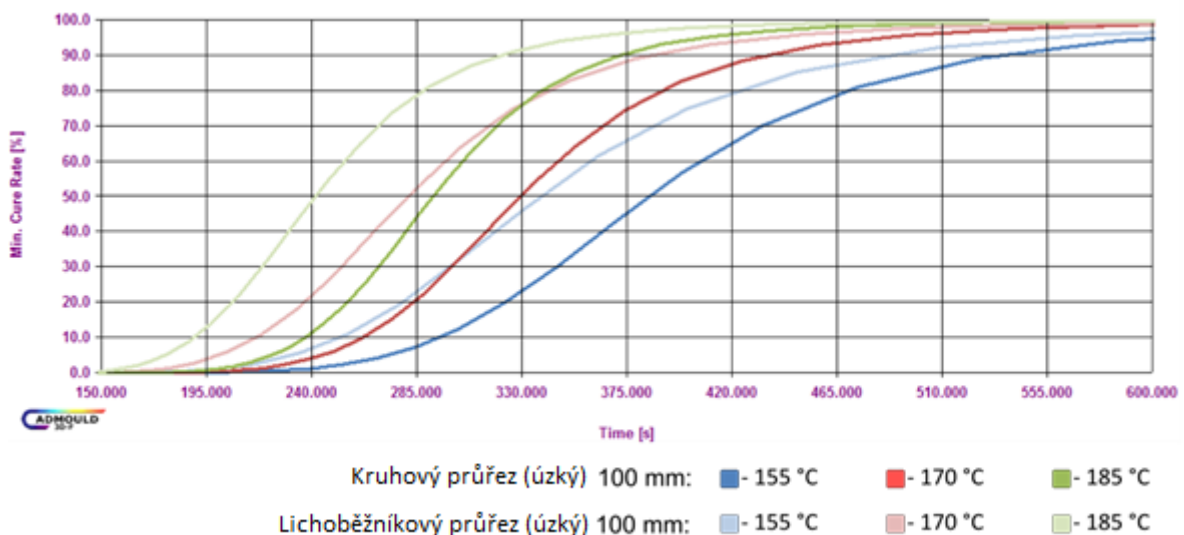
Podobnou tendenci je možné vidět také u dalších teplot, při kterých proběhly výpočtové analýzy ($155 \text{ }^\circ\text{C}$, $185 \text{ }^\circ\text{C}$). Změna nastává i u vyšších rychlostí vstří-

kování, kde se začíná projevovat vliv přeměny disipační energie na energii tepelnou.



Obr. 60 – Vývin teploty u kruhového (vlevo) a lichoběžníkového (vpravo) kanálu (170 °C, $v = 250 \text{ mm/s}$)

Vzhledem k potřebnému času na vytvoření 90% všech příčných vazeb lze usoudit, že jako výhodnější varianta se jeví vstřikování materiálu při vyšších teplotách formy a nižších rychlostech pístu, kde materiál získává teplo převážně od stěny formy vlivem delšího toku přes rozvodný systém u malé intenzity smykového toku. Pro rychlost vstřikování $v = 5 \text{ mm/s}$ jsou v Obr. 61 vyobrazeny vulkanizační křivky pro jednotlivé teploty a oba typy průřezů kanálů.



Obr. 61 – Průběh vulkanizace při rychlosti $v = 5 \text{ mm/s}$

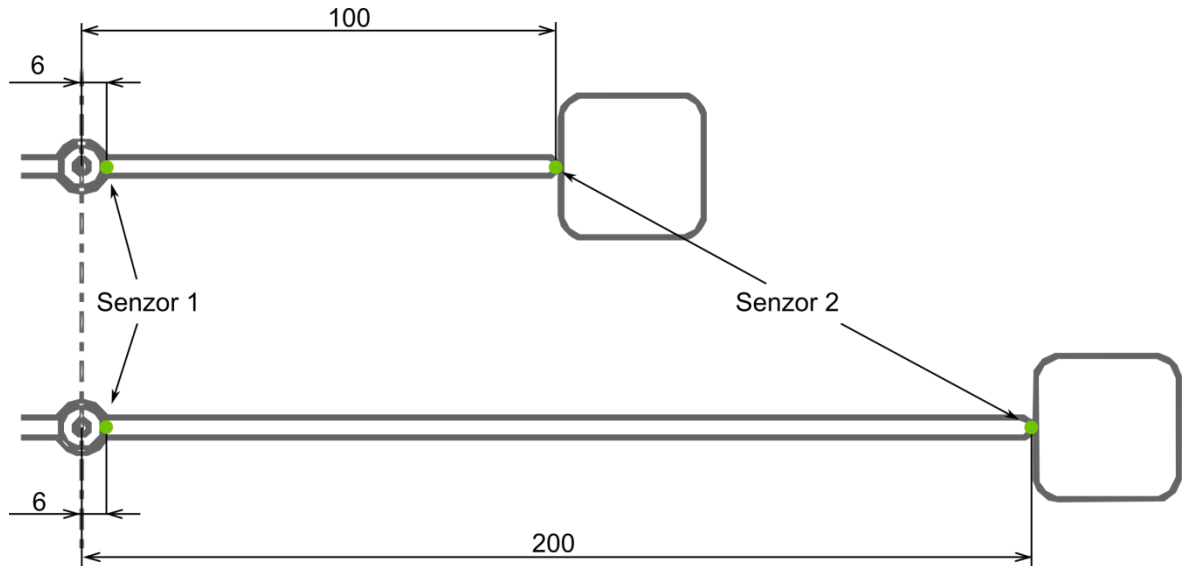
4.4 Vliv délky vtokového kanálu na průběh vulkanizace

Čtvrtá úloha výpočtových analýz simuluje tok materiálu přes lichoběžníkový rovný kanál o délce 100 mm a 200 mm a klade si za cíl zjistit závislost délky vtokového kanálu na čase vulkanizace. Pro praxi je možné využít tato zjištění u vícenásobných forem. Vyhodnocovanými veličinami jsou teplota v rozvodném systému a průběh vulkanizace.

Tab. 55 – Geometrie vtokových kanálů

		Trajektorie kanálu	
Geometrie 100 mm	A		
Geometrie 200 mm	B		
Průřez kanálu [mm]			
Vtokové ústí [mm]			
Rychlost [mm/s]		5; 10; 50; 150; 250	
Teplota stěny dutiny formy [°C]	1	155 °C	
	2	170 °C	
	3	185 °C	

Geometrie vtokových kanálů byly osazeny dvěma senzory. Na začátku rozvodného kanálu u vtokového kužele a na konci vtokového kanálu ve vtokovém ústí, které bylo vzdáleno od osy vtokového kužele v prvním případě 100 mm a v druhém případě 200 mm.



Obr. 62 – Umístění senzorů na vtakovém kanále

Proměnnými parametry byla rychlost vstřikování v rozmezí $(0,7 - 38) \text{ cm}^3/\text{s}$ a teplota formy v rozmezí $(155 - 185) \text{ }^\circ\text{C}$. Bližší nastavení parametrů pro analýzy je popsáno v Tab. 56. Pro simulace byl opět použit stejný materiál jako v přechozích případech.

Tab. 56 – Procesní podmínky

Veličiny	Jednotky	Varianta				
		I.	II.	III.	IV.	V.
Rychlost pístu stroje	[mm/s]	5	10	50	150	250
Průtokové množství	[cm^3/s]	0,7	1,5	7,6	22,8	38,0
Tlakem řízené plnění při	[%]	99				
Teplota taveniny	[$^\circ\text{C}$]	100				
Teplota formy	[$^\circ\text{C}$]	155; 170; 185				
Vulkanizace ve formě	[s]	600				
Vulkanizace mimo formu	[s]	200				

4.4.1 Teplota $155 \text{ }^\circ\text{C}$

Tab. 57 – Čas vstřikování a vulkanizace (při $155 \text{ }^\circ\text{C}$)

T= 155°C	VSTŘIKOVÁNÍ [s]		VULKANIZACE [s]		Rozdíl časů (100, 200 mm) [s]
	úzký		úzký		
	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

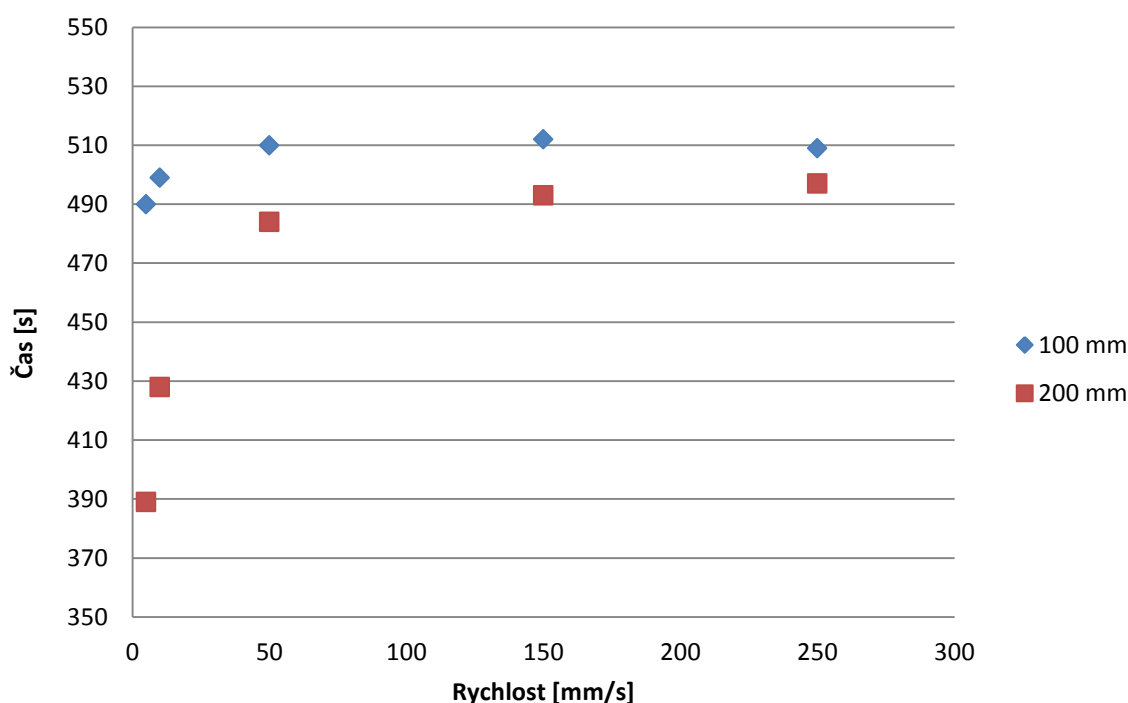
Tab. 57 zobrazuje čas potřebný na zaplnění dutiny formy při dané rychlosti vstřikování (sloupec VSTŘIKOVÁNÍ) a také čas potřebný k dosažení optima vulkanizace (sloupec VULKANIZACE), kdy se jedná o dobu myšlenou od začátku vstřikování až po konec vulkanizace. Ve sloupci „Rozdíl časů (100, 200 mm)“ je uveden rozdíl časů potřebných k dosažení 90% z vulkanizovaných vazeb mezi dlouhým a krátkým kanálem.

V Tab. 58 je uvedena teplota čela taveniny v senzoru 1, tedy na začátku vtokového kanálu a v senzoru 2, tedy na konci vtokového kanálu (ve vtokovém ústí).

Tab. 58 – Teplota v senzorech při 100 mm a 200 mm kanále (při 155°C)

T=155 °C	T – senzor 1 [°C]		T – senzor 2 [°C]		Rozdíl teplot v senzoru 2 (100, 200 mm) [°C]
	úzký		úzký		
	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

Graf na Obr. 63 zobrazuje hodnoty z Tab. 57 – čas potřebný k dosažení optima vulkanizace pro dlouhý i krátký kanál.



Obr. 63 – Graf závislosti času vulkanizace na rychlosti vstřikování ($T = 155\text{ °C}$)

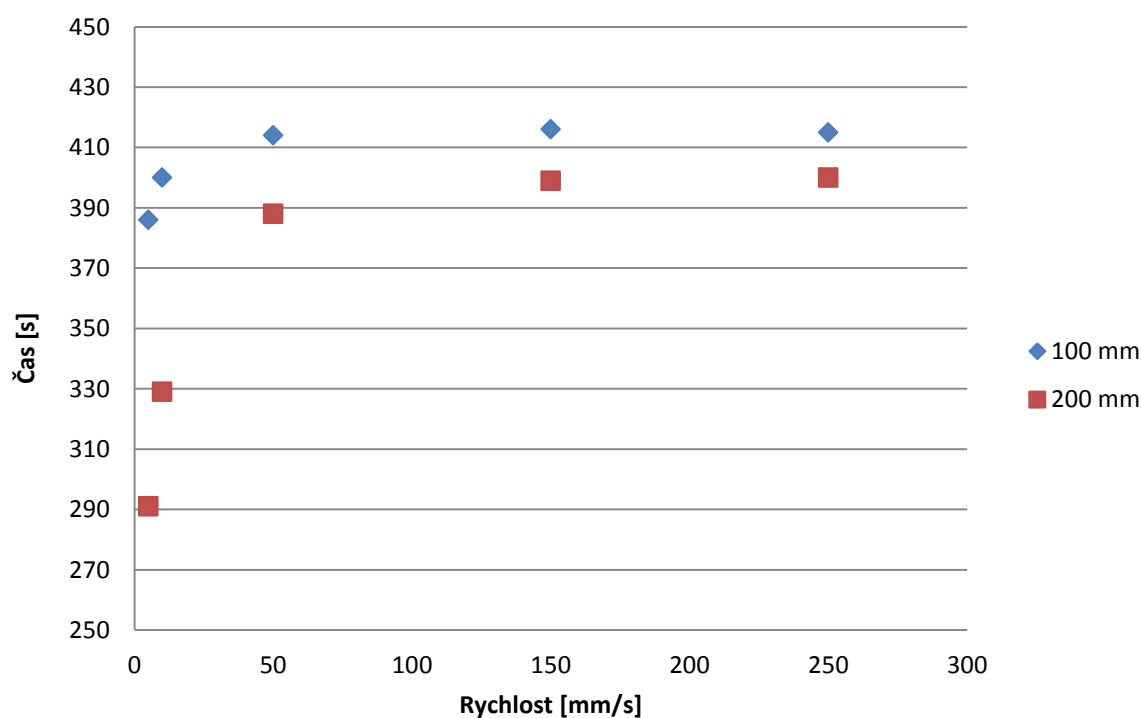
4.4.2 Teplota 170 °C

Analýzy byly provedeny i pro teplotu stěny formy 170 °C. Tab. 59 zobrazuje čas potřebný k zaplnění dutiny formy při dané rychlosti vstřikování (sloupec VSTŘIKOVÁNÍ) a také čas potřebný k dosažení optima vulkanizace (sloupec VULKANIZACE), kdy se jedná o dobu myšlenou od začátku vstřikování až po konec vulkanizace. Ve sloupci „Rozdíl časů (100, 200 mm)“ je uveden rozdíl časů potřebných k dosažení 90% z vulkanizovaných vazeb mezi dlouhým a krátkým kanálem.

V Tab. 60 je uvedena teplota čela taveniny v senzoru 1, tedy na začátku vtokového kanálu a v senzoru 2, tedy na konci vtokového kanálu (ve vtokovém ústí). Graf na Obr. 64 zobrazuje hodnoty z Tab. 59 – čas potřebný k dosažení optima vulkanizace pro dlouhý i krátký kanál.

Tab. 59 - Čas vstřikování a vulkanizace (při 170 °C)

T=170°C	VSTŘIKOVÁNÍ [s]		VULKANIZACE [s]		Rozdíl časů (100, 200 mm) [s]
	úzký		úzký		
	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



Obr. 64 – Graf závislosti času vulkanizace na rychlosti vstřikování ($T = 170$ °C)

Tab. 60 – Teplota v senzorech při 100 mm a 200 mm kanále (při 170°C)

T=170°C	T – senzor 1 [°C]		T – senzor 2 [°C]		Rozdíl teplot v senzoru 2 (100, 200 mm) [°C]
	úzký		úzký		
	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

4.4.3 Teplota 185°C

Poslední navýšení teploty stěny formy bylo 185 °C. Tab. 61 zobrazuje čas potřebný k zaplnění dutiny formy při dané rychlosti vstřikování (sloupec VSTŘIKOVÁNÍ) a také čas potřebný k dosažení optima vulkanizace (sloupec VULKANIZACE), kdy se jedná o dobu myšlenou od začátku vstřikování až po konec vulkanizace. Ve sloupci „Rozdíl časů (100, 200 mm) je uveden rozdíl časů potřebných k dosažení 90% zvlukanizovaných vazeb mezi dlouhým a krátkým kanálem.

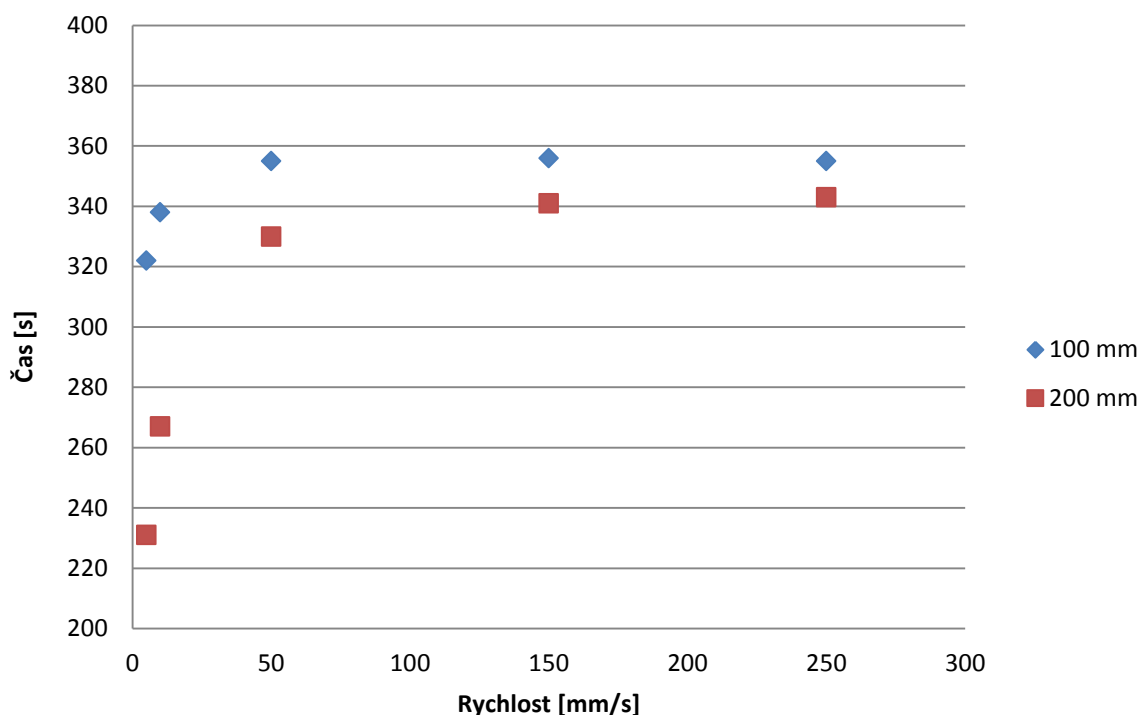
V Tab. 62 je uvedena teplota čela taveniny v senzoru 1, tedy na začátku vtokového kanálu a v senzoru 2, tedy na konci vtokového kanálu (ve vtokovém ústí). Graf na Obr. 65 zobrazuje hodnoty z Tab. 61 – čas potřebný k dosažení optima vulkanizace pro dlouhý i krátký kanál.

Tab. 61 - Čas vstřikování a vulkanizace (při 185 °C)

T=185°C	VSTŘIKOVÁNÍ [s]		VULKANIZACE [s]		Rozdíl časů (100, 200 mm) [s]
	úzký		úzký		
	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. 62 – Teplota v senzorech při 100 mm a 200 mm kanále (při 185°C)

T=185°C	T – senzor 1 [°C]		T – senzor 2 [°C]		Rozdíl teplot v senzoru 2 (100, 200 mm) [°C]
	úzký		úzký		
	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

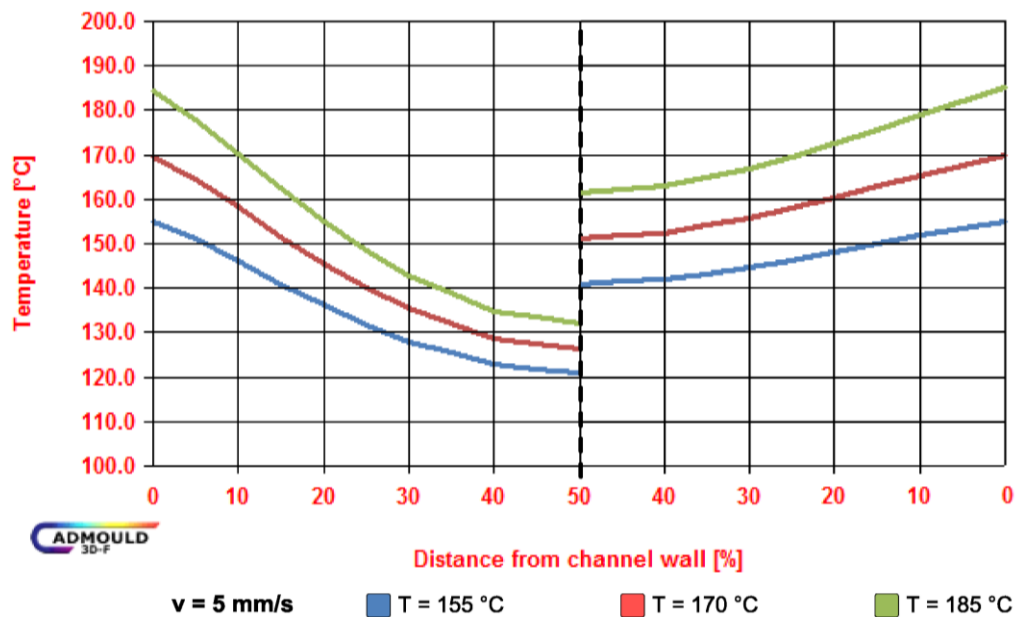


Obr. 65 – Graf závislosti času vulkanizace na rychlosti vstřikování ($T = 185\text{ }^{\circ}\text{C}$)

4.4.4 Diskuze výsledků úlohy

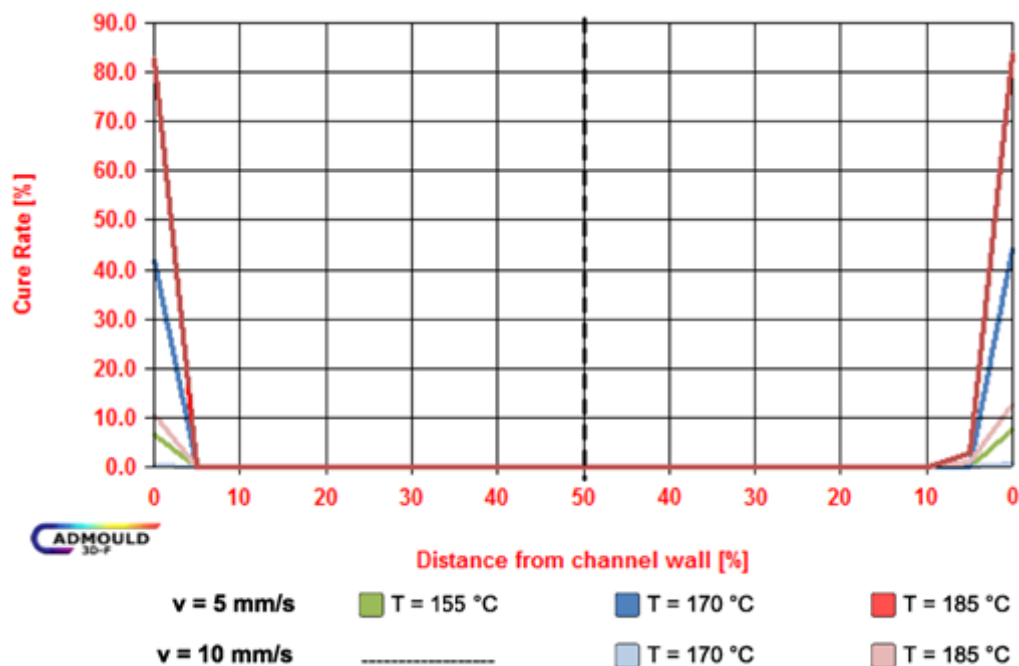
Čas, který je potřebný k získání 90% všech z vulkanizovaných vazeb při pomalých rychlostech vstřikování, je rapidně nízký u 200 mm dlouhého kanálu. U krátkého kanálu 100 mm a u nejnižších rychlostí není čas vstřikování tak enormní jako u dlouhého 200 mm (Např.: při nejnižší rychlosti vstřikování je rozdíl mezi dlouhým a krátkým kanálem 95 s u teploty 170°C). S narůstající rychlostí vstřikování se čas vulkanizace vyrovnává, ztrácí se tak vliv dlouhého kanálu na ohřev materiálu.

Za použití nízkých rychlostí vstřikování je snížení potřebného vulkanizačního času u 200 mm kanálu způsobené zvýšením teploty o cca $(13 - 16)^{\circ}\text{C}$ v porovnání s kanálem o délce 100 mm. Zvýšení teploty je způsobené delším setrváním ve vtokovém systému, což vede k poskytnutí delšího času na přestup tepla mezi materiálem a stěnou formy. Podobná situace, která ale není tak výrazná, nastává i při vyšších rychlostech. Materiálový parametr P_3 je 0,728, z čehož vyplývá, že index newtonského chování je $n = 0,272$. Z tohoto důvodu není u vyšších vstřikovacích rychlostí tak významný vliv disipace. Z Obr. 66 je patrné, že převažoval vliv přestupu tepla.



Obr. 66 – Teplotní pole ve vtokovém ústí u 100 mm (vlevo) a 200 mm (vpravo)

Při použití vysoké teploty a nízkých vstřikovacích rychlostí může dojít k předčasné vulkanizaci materiálu vlivem dlouhého setrvání ve vtokovém systému. Kaučuková směs by proto měla mít širokou bezpečnost směsi tak, aby směs nezačala vulkanizovat před naplněním dutiny formy.



Obr. 67 – Vulkanizace ve vtokovém ústí u 100 mm (vlevo) a 200 mm (vpravo)

Na Obr.67 je vidět, že u dlouhého kanálu, nižších rychlostí a vysoké teplotě začíná u materiálu vulkanizace povrchových vrstev (závislost je pozorována ve vtokovém ústí), což může vést k pevnostním i vzhledovým vadám na výrobku.

4.5 Vliv tvaru tokového kanálu na průběh vulkanizace

Tab. 63 – Geometrie vtokových kanálů

		Trajektorie kanálu	
Geometrie přímá 200 mm	A		
Geometrie křivka 200 mm	B		
Geometrie zig-zag 200 mm	C		
Průřez kanálu [mm]			
Vtokové ústí [mm]			
Rychlost [mm/s]		5; 10; 50; 150; 250	
Teplota stěny formy [°C]	1	155 °C	
	2	170 °C	
	3	185 °C	

Tato část práce si klade za cíl zjistit závislost tvaru vtokového kanálu na čase vulkanizace. Počítačové analýzy simulují tok materiálu přes lichoběžníkový rovný kanál o stejné délce a to 200 mm (varianta B a C), ale jiný tvar vtokového kanálu. V prvním případě se jedná o rovný kanál (přímý) ve druhém případě tangenciálně zakřivený (křivka) a ve třetím případě kanál zalomený (zig-zag). Poslední dva tvary kanálů byly tvořeny tak, aby byly vyrobitelné pro vstřikovací stroj REP, střednice všech kanálů jsou stejně dlouhé.

Tab. 64 – Procesní podmínky

Veličiny	Jednotky	Varianta				
		I.	II.	III.	IV.	V.
Rychlost pístu stroje	[mm/s]	5	10	50	150	250
Průtokové množství	[cm ³ /s]	0,7	1,5	7,6	22,8	38,0
Tlakem řízené plnění při	[%]	99				
Teplota taveniny	[°C]	100				
Teplota formy	[°C]	155; 170; 185				
Vulkanizace ve formě	[s]	600				
Vulkanizace mimo formu	[s]	200				

Tabulky zobrazují čas vstřikování, potřebný tlak k dosažení této rychlosti, čas potřebný k dosažení optima vulkanizace a teploty na konci vtokového kanálu (senzor 4). Čas potřebný k získání optima vulkanizace je nejkratší u kanálu křivka, poté u rovného a nejdelší je u kanálu zig-zag. Čas, kdy byla zaplněna dutina formy, je téměř shodný, jen u nejnižších rychlostí vstřikování se lišil o desetiny sekundy.

Tab. 65 – Čas vstřikování a potřebný tlak pro jednotlivé trajektorie ($T=155^{\circ}\text{C}$)

v [mm/s]	Úzký kanál					
	Vstřikování [s]			Potřebný tlak [bar]		
	rovný	křivka	zig-zag	rovný	křivka	zig-zag
5	82,1	81,9	81,6	406	416	366
10	38,3	38,2	38,0	501	513	452
50	7,6	7,5	7,5	782	800	705
150	2,5	2,5	2,5	1051	1077	949
250	1,5	1,5	1,5	1206	1234	1088

Tab. 66 – Délka ohřevu k získání optima vulkanizace a teplota taveniny před vstupem do dutiny formy pro jednotlivé trajektorie ($T=155^{\circ}\text{C}$)

v [mm/s]	Úzký kanál					
	Vulkanizace [s]			Teplota senzor 4 [°C]		
	rovný	křivka	zig-zag	rovný	křivka	zig-zag
5	399	387	420	146,5	146,8	145,1
10	439	428	441	135,7	137,3	135,4
50	488	481	489	125,0	125,6	124,1
150	491	483	493	128,0	128,5	126,5
250	485	481	492	132,1	132,9	130,3

Tab. 67 – Čas vstřikování a potřebný tlak pro jednotlivé trajektorie ($T=170^{\circ}\text{C}$)

v [mm/s]	Úzký kanál					
	Vstřikování [s]			Potřebný tlak [bar]		
	rovný	křivka	zig-zag	rovný	křivka	zig-zag
5	82,2	82,0	81,6	5	403	416
10	38,3	38,0	38	10	498	510
50	7,6	7,5	7,5	50	777	796
150	2,5	2,5	2,5	150	1048	1072
250	1,5	1,5	1,5	250	1201	1229

Tab. 68 – Délka ohřevu k získání optima vulkanizace a teplota taveniny před vstupem do dutiny formy pro jednotlivé trajektorie ($T=170^{\circ}\text{C}$)

v [mm/s]	Úzký kanál					
	Vulkanizace [s]			Teplota senzor 4 [$^{\circ}\text{C}$]		
	rovný	křivka	zig-zag	rovný	křivka	zig-zag
5	298	288	305	158,7	159	156,9
10	337	324	340	144,4	146,5	144,3
50	391	387	394	129,4	129,8	127,8
150	395	392	399	130,5	131	128,2
250	394	391	398	134,0	134,8	131,3

Tab. 69 – Čas vstřikování a potřebný tlak pro jednotlivé trajektorie ($T=185^{\circ}\text{C}$)

v [mm/s]	Úzký kanál					
	Vstřikování [s]			Potřebný tlak [bar]		
	rovný	křivka	zig-zag	rovný	křivka	zig-zag
5	82,1	80,0	81,8	400	410	360
10	38,4	38,3	38,0	494	506	446
50	7,6	7,6	7,5	773	792	698
150	2,5	2,5	2,5	1043	1068	942
250	1,5	1,5	1,5	1197	1225	1080

Tab. 70 – Délka ohřevu k získání optima vulkanizace a teplota taveniny před vstupem do dutiny formy pro jednotlivé trajektorie ($T=185^{\circ}\text{C}$)

T=185°C	Úzký kanál					
	Vulkanizace [s]			Teplota senzor 4 [°C]		
	v [mm/s]	rovný	křivka	zig-zag	rovný	křivka
5	235	229	238	170,8	171,1	168,7
10	274	262	277	154,9	155,6	152,9
50	331	328	335	133,7	134,1	132,2
150	337	335	341	133,0	133,6	131,4
250	336	334	340	136,1	136,8	134,2

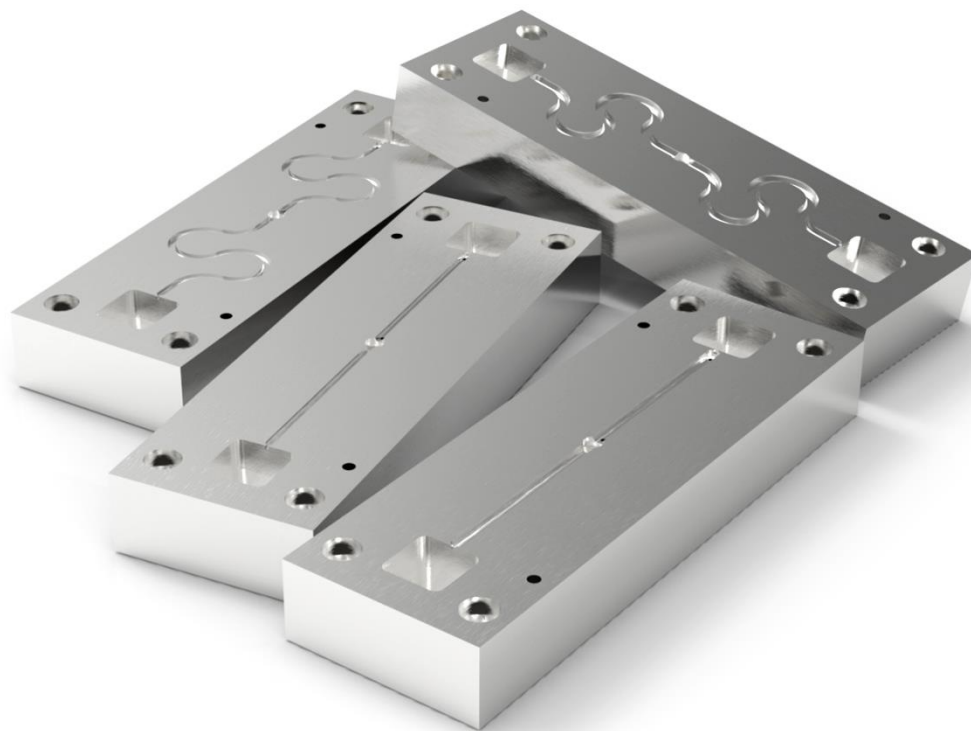
U kanálu zig-zag, který by měl klást materiálu největší odpor je tlak potřebný pro naplnění dutiny nejmenší. Je to naopak, než je předpokládaná tendence. Tím, že u kanálu zig-zag byly zaobleny rohy, z důvodu zaručení výroby tvarových desek podle modelu, není průřez po celé délce konstantní, i když délky krajních i středních vláken jsou stejné. To mohlo ovlivnit výpočet, protože jak bude vidět z praktického měření, kanál zig-zag má opravdu největší odpor proti toku a vykazuje největší tvrdost IRHD.

4.6 Měření drsnosti vtokových kanálů

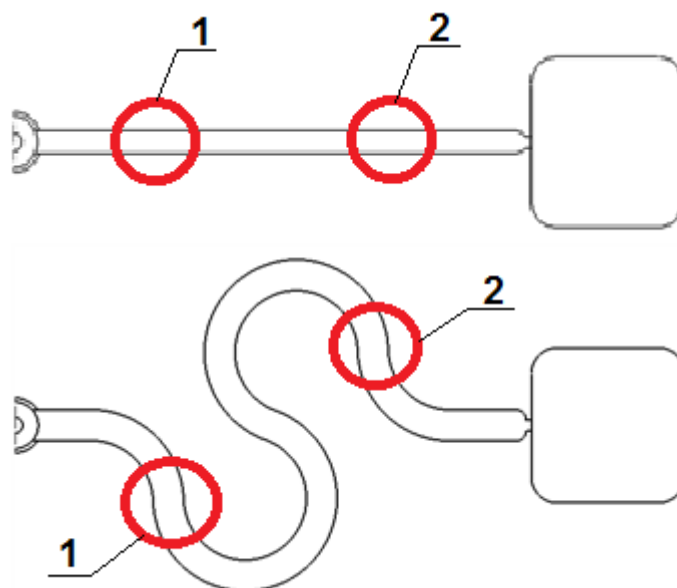
Z nedávných výzkumů je známo, že drsnost povrchu kanálu ve vstřikovací formě má vliv na zatékavost polymerní taveniny [55]. Proto byla před samostatným vstřikováním prvních čtyř trajektorií u tlustostěnných výrobků změřena drsnost povrchu vtokových kanálů. Toto měření probíhalo na přístroji Talysurf CLI 500.



Obr. 68 – Talysurf CLI 500



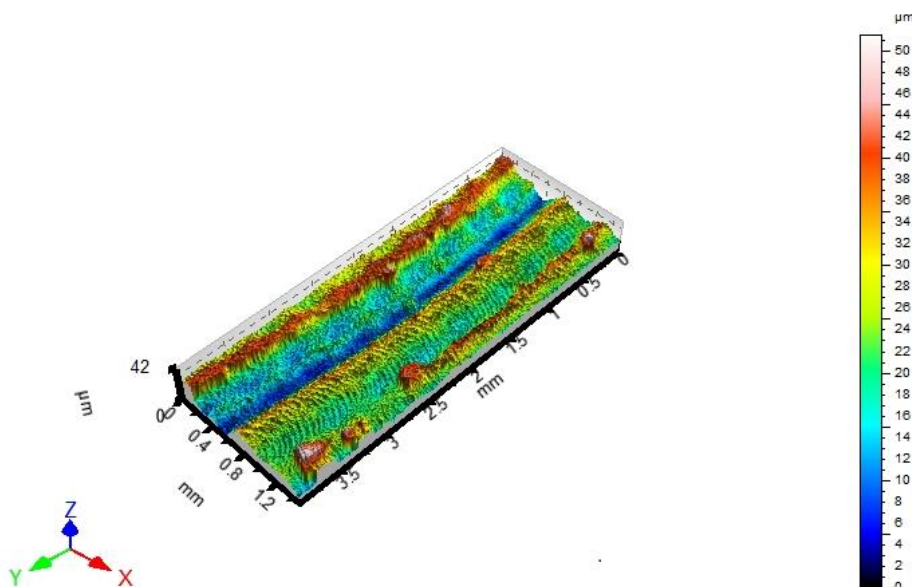
Obr. 69 – Měření prvních čtyř trajektorií



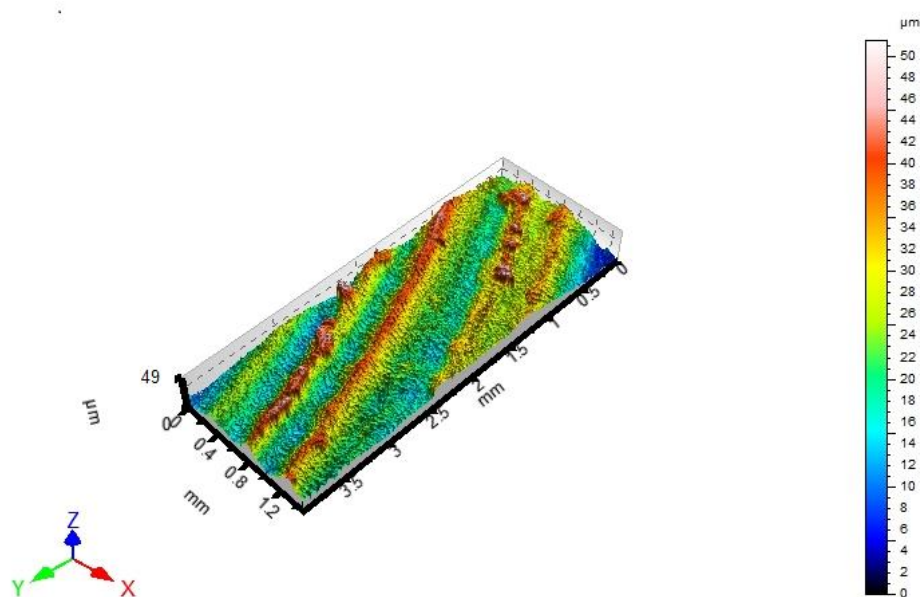
Obr. 70 – Zobrazení míst měření drsnosti povrchu

Na Obr.70 lze vidět (červeně označenou barvou) místa, kde byly snímány povrchy. U každé trajektorie byly snímány ve dvou místech (1 a 2). Byla vyhodnocována průměrná aritmetická úchylna posuzovaného profilu (R_a) a největší výška profilu (R_z) dle normy ČSN EN ISO 4287.

4.6.1 Trajektorie křivka, široký kanál



Obr. 71 – Profil drsnosti u trajektorie křivka, široký kanál – měření 1

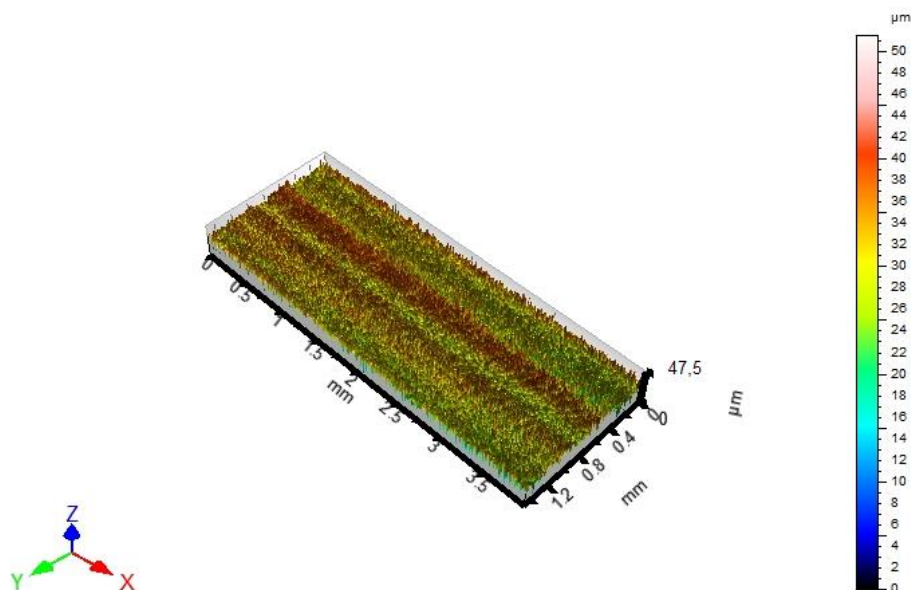


Obr. 72 – Profil drsnosti u trajektorie křivka, široký kanál – měření 2

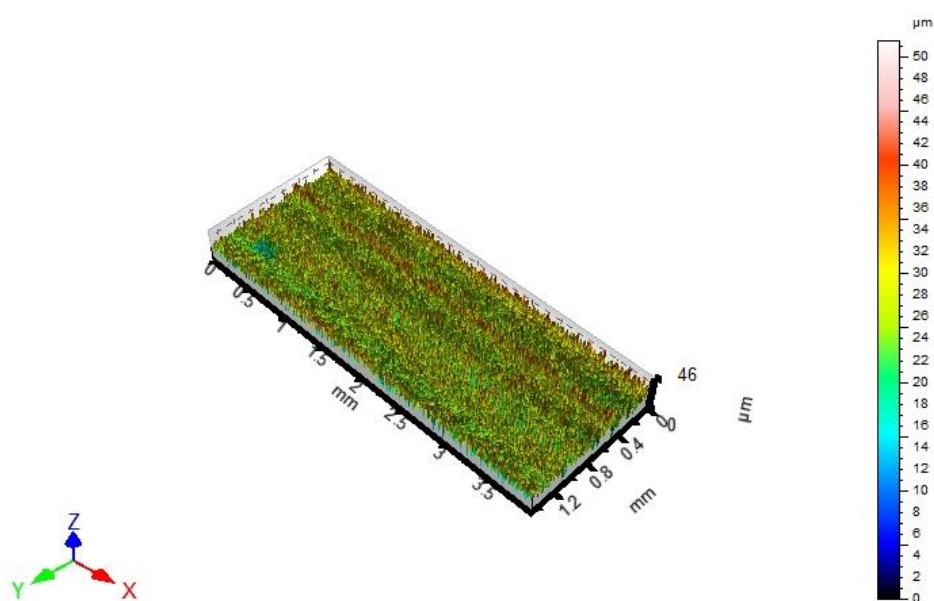
 Tab. 71 – Vyhodnocené parametry, trajektorie křivka, široký kanál [μm]

ISO 4287	x	s	Min	Max
Rz₁ [μm]	12,6	1,59	8,87	17,4
Ra₁ [μm]	2,65	0,309	1,88	4,16
Rz₂ [μm]	12,9	2,17	8,5	19,2
Ra₂ [μm]	2,65	0,448	1,87	4,05

4.6.2 Přímá trajektorie, široký kanál



Obr. 73 – Profil drsnosti u přímé trajektorie, široký kanál – měření 1

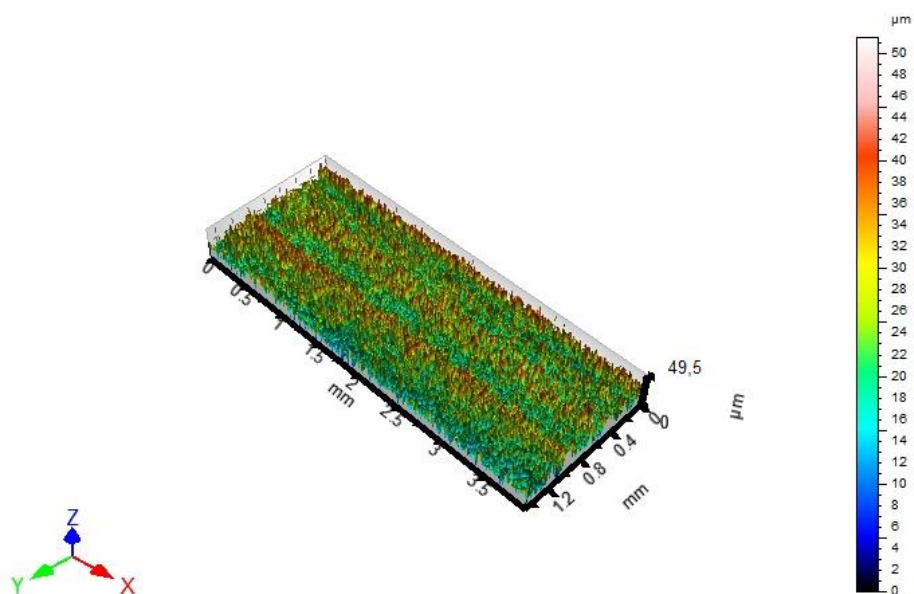


Obr. 74 – Profil drsnosti u přímé trajektorie, široký kanál – měření 2

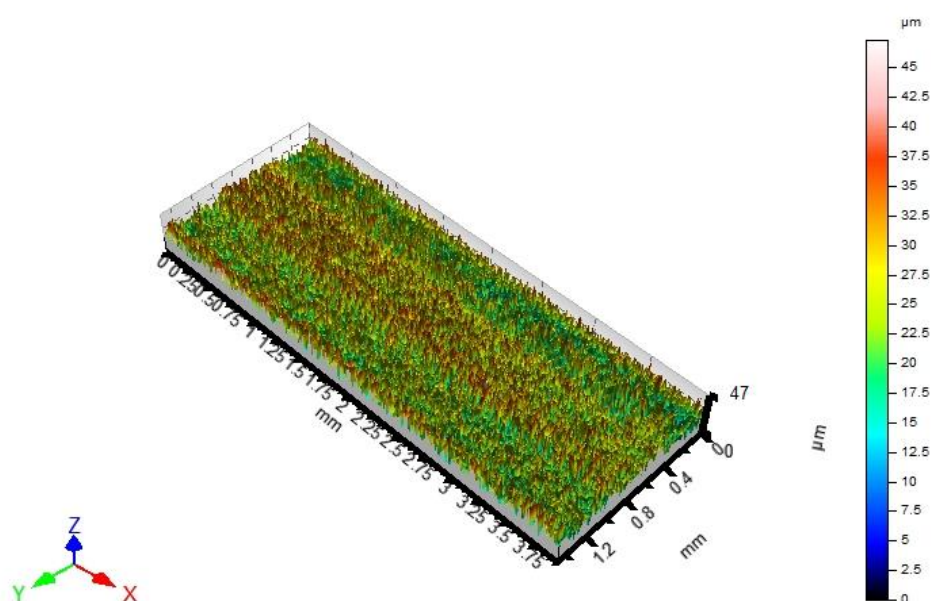
Tab. 72 – Vyhodnocené parametry, trajektorie přímá, široký kanál [μm]

ISO 4287	x	s	Min	Max
Rz ₁ [μm]	12	1,72	8,09	17,9
Ra ₁ [μm]	2,25	0,303	1,43	3,05
Rz ₂ [μm]	11,9	1,19	8,93	15,9
Ra ₂ [μm]	2,44	0,245	1,72	3,21

4.6.3 Přímá trajektorie, úzký kanál



Obr. 75 – Profil drsnosti u přímé trajektorie, úzký kanál – měření 1

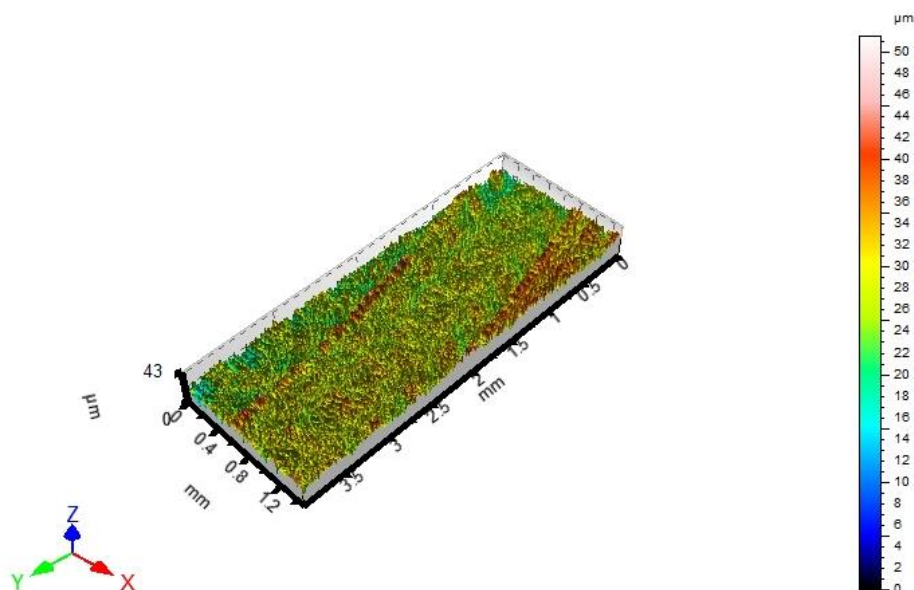


Obr. 76 – Profil drsnosti u přímé trajektorie, úzký kanál – měření 2

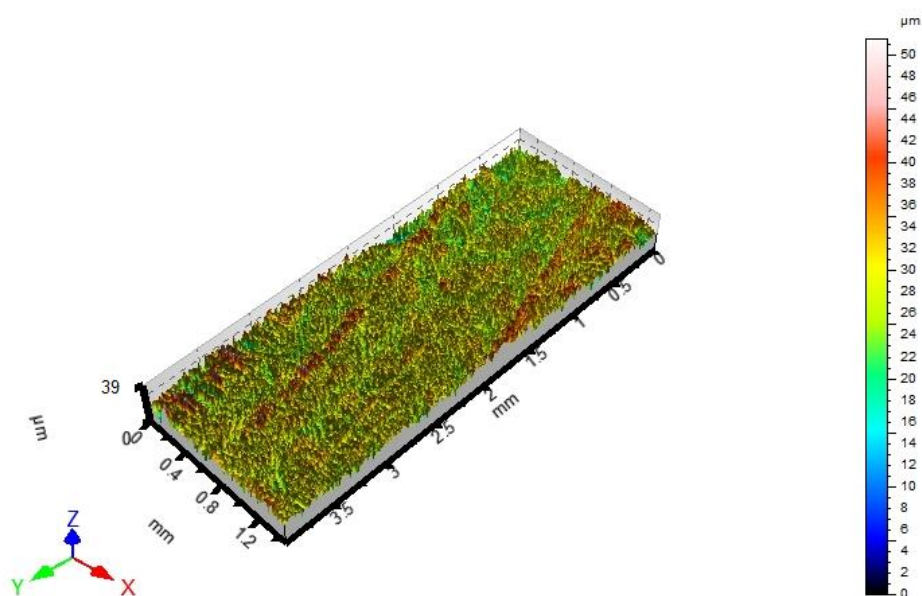
 Tab. 73 – Vyhodnocené parametry, trajektorie přímá, úzký kanál [μm]

ISO 4287	x	s	Min	Max
Rz ₁ [μm]	12,3	1,55	8,63	17,4
Ra ₁ [μm]	2,85	0,35	2,09	3,77
Rz ₂ [μm]	12,6	1,5	8,72	17,5
Ra ₂ [μm]	2,73	0,318	1,86	3,62

4.6.4 Trajektorie křivka, úzký kanál



Obr. 77 – Profil drsnosti u trajektorie křivka, úzký kanál – měření 1



Obr. 78 – Profil drsnosti u trajektorie křivka, úzký kanál – měření 2

 Tab. 74 – Vyhodnocené parametry, trajektorie křivka, úzký kanál [μm]

ISO 4287	x	s	Min	Max
Rz₁ [μm]	13	2,47	7,89	19,5
Ra₁ [μm]	2	0,294	1,44	2,81
Rz₂ [μm]	11,9	1,88	7,77	18,1
Ra₂ [μm]	2,17	0,333	1,41	3,24

Jak lze vidět z tabulek 71 – 74, byly vyhodnocovány parametry Ra a Rz. Hodnoty Rz se pohybují v rozsahu od 11,9 μm do 13 μm a hodnoty Ra se pohybují v rozsahu od 2 μm do 2,73 μm . Rozdíly drsností v jednotlivých trajektoriích jsou nepodstatné. Lze předpokládat, že tok polymerní taveniny jednotlivými kanály nebude nepatrnými rozdíly drsností ovlivněn. Bylo tak ověřeno, jsou-li při obrábění zachovány stejné procesní parametry jako jsou otáčky vřetene, posuv nástroje a tvar jeho ostří, je povrch vtokového kanálu velice podobný a hodnoty drsností obrobeného povrchu se téměř neliší. S tímto předpokladem bylo kalkulováno i při další výrobě ostatních tvarových desek (zig-zag).

4.7 Zkouška tvrdosti tlustostěnných výrobků

Získané výsledky z výpočtových analýz byly ověřovány měřením tvrdosti podle vybrané metody IRHD N dle ČSN EN ISO 48 (621433). Výběr metody byl popsán v kapitole 3.5.1.

4.7.1 Příprava zkušebních vzorků

Zkušební vzorky byly vyhotovené na stroji REP V27 Y125 dle nastavení v Tab. 75. Jelikož vstřikovací tlak, který daný vstřikovací stroj dokáže vyvinout, je pouze 200 bar, nebylo možné vstřikovat při vyšších rychlostech, než je rychlost pohybu pístu $v = 5\text{mm/s}$ (přibližně $0,7\text{ cm}^3/\text{s}$) u daných trajektorií. Proto vstřikování nebylo řízené rychlostí pístu, ale dobou, po kterou má působit statický vstřikovací tlak (200 bar).

Teplota formy byla sledovaná pomocí teplotního čidla, které bylo umístěno v blízkosti její dutiny. Dávkování materiálu bylo nastaveno vždy stejně a to 30 sekund před ukončením předchozího cyklu. Dalších 30 sekund materiál setrval v plastikační komoře, zatímco byl odformováván výrobek a čištěna dutina formy. Ke spuštění cyklu tedy došlo po 60 sekundách, kdy materiál zůstal v plastikační komoře vytemperované na $100\text{ }^\circ\text{C}$. V tomto čase je započítáno i zavírání stroje a formy. Pro každý cyklus byly tyto podmínky stejné. K ochlazení hotového výrobku po vyhození z formy docházelo ve volném prostoru při teplotě okolního vzduchu $23\text{ }^\circ\text{C}$. Aby mohla být pozorována změna mechanických vlastností na tloušťce, byly nastaveny nižší časy vulkanizace tak, aby nedošlo k dosažení optima vulkanizace v celém průřezu výrobku.

4.7.2 Procesní podmínky a geometrie širokých rozvodných kanálů

Tab. 75 – Použité trajektorie, teplota formy, doba vstřikování a doba vulkanizace

Trajektorie kanálu					
Geometrie 100 mm	A				
Geometrie 200 mm	B				
Geometrie 200 mm	C				
	Č.	teplota [°C]		doba vstřikování [min]	doba vulkanizace [min]
		taveniny	formy		
Varianty	1	100	155	1	2
	2	100	155	1	3
	3	100	170	1	2

Tab. 76 – Průřez použitého rozvodného kanálu a vtokového ústí

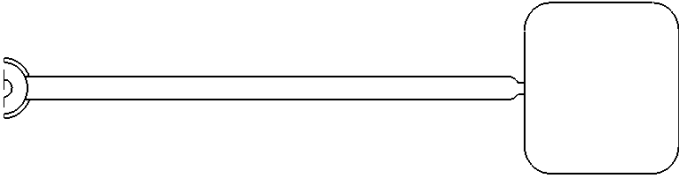
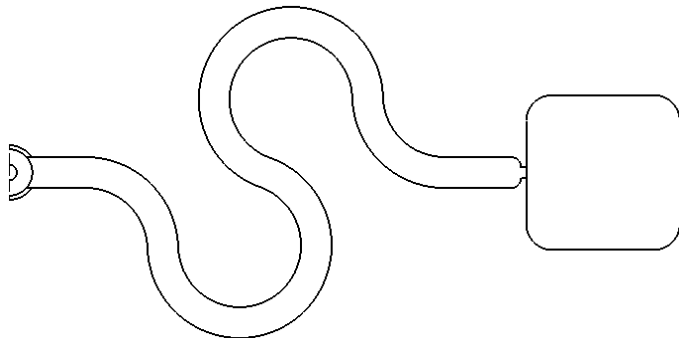
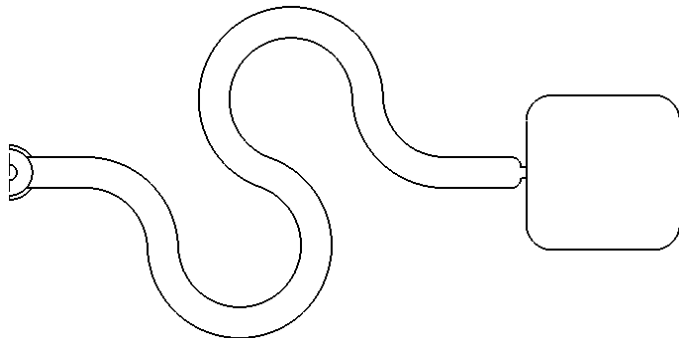
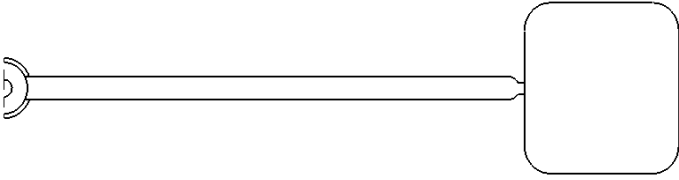
	Průřez [mm]	Plocha průřezu
Rozvodný kanál		15 mm ²
Vtokové ústí		3 mm ²

Tab. 77 – Nastavení parametrů vstřikovacího stroje

Parametr	Popis činnosti	[-]	hodnota
30	Celková dávka směsi (délka dráhy pístu)	[mm]	490
41	Vstřikovací tlak (max. 200 bar)	[bar]	200
46	Délka působení vstřikovacího tlaku	[min]	1
56	Doba vulkanizace od skončení vstřikování	[min]	2, 3
61	Teplota plastikační komory	[°C]	100
62	Teplota vstřikovací komory	[°C]	100
65	Teplota horní vyhřívací desky	[°C]	155, 170
67	Teploty spodní vyhřívací desky	[°C]	155, 170

4.7.3 Procesní podmínky a geometrie úzkých rozvodných kanálů

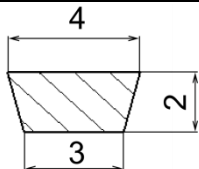
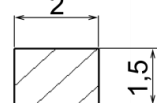
Tab. 78 – Použité trajektorie, teplota formy, doba vstřikování a doba vulkanizace

Trajektorie kanálu					
Geometrie 100 mm	A				
					
Geometrie 200 mm	B				
					
Varianty	Č.	teplota [°C]		doba vstřikování [min]	doba vulkanizace [min]
		taveniny	formy		
	4	100	155	2	1
	5	100	155	2	2
6	100	170	2	1	

Tab. 79 – Nastavení parametrů vstřikovacího stroje

Parametr	Popis činnosti	[-]	hodnota
30	Celková dávka směsi (délka dráhy pístu)	[mm]	490
41	Vstřikovací tlak (max. 200 bar)	[bar]	200
46	Délka působení vstřikovacího tlaku	[min]	2
56	Doba vulkanizace od skončení vstřikování	[min]	1, 2
61	Teplota plastikační komory	[°C]	100
62	Teplota vstřikovací komory	[°C]	100
65	Teplota horní vyhřívací desky	[°C]	155, 170
67	Teploty spodní vyhřívací desky	[°C]	155, 170

Tab. 80 – Průřez použitého rozvodného kanálu a vtokového ústí

	Průřez [mm]	Plocha průřez
Rozvodný kanál		7 mm ²
Vtokové ústí		3 mm ²

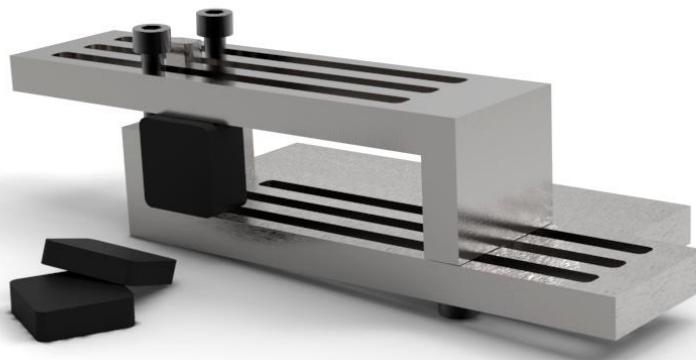
Aby byl zachován vstřikovací čas stejný jako při širokém průřezu (1 min), musel by stroj mít výkonnější vstřikovací jednotku. Zmenšením plochy průřezu rozvodných kanálů došlo ke zvýšení potřebného vstřikovacího tlaku, který byl nad limit stroje REP V27 Y125, a proto muselo dojít ke zvýšení času vstřikování na 2 minuty. Aby mohly být výsledky srovnávány, byla snížena doba vulkanizace vždy o jednu minutu než u širokých průřezů. Trajektorie zig-zag byla vytvořena i pro úzký průřez, jelikož kladla velký odpor proti tečení, nebylo možné na tomto stroji vystříknout kvalitní (homogenní) výrobek. Proto v práci tyto výsledky nejsou zahrnuty.

4.7.4 Dělení výstřiku na jednotlivé vrstvy

Dělení materiálů s nízkým modulem pružnosti je obtížné z důvodu jejich vysoké deformace. Pro dělení těchto výrobků (kostek) byl vytvořen speciální nůž a upínač tak, aby jednoduše mohly být upnuty do soustruhu, který je opatřen chladicí emulzí a mohl být tak výrobek vhodně dělen pro zkoušku tvrdosti. Toto dělicí zařízení bylo vyrobené s přihlédnutím na normu ČSN EN ISO 23529, v které jedna část pojednává o doporučených zařízeních pro přípravu zkušebních těles.



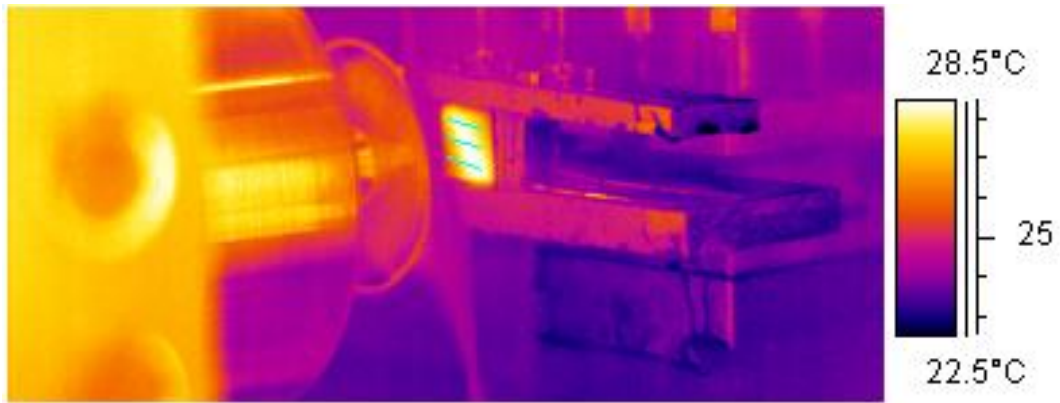
Obr. 79 – Bezzubý rotační nůž



Obr. 80 – Vizualizace funkce upínacího zařízení

4.7.5 Kontrola teplotního ovlivnění při dělení vrstev

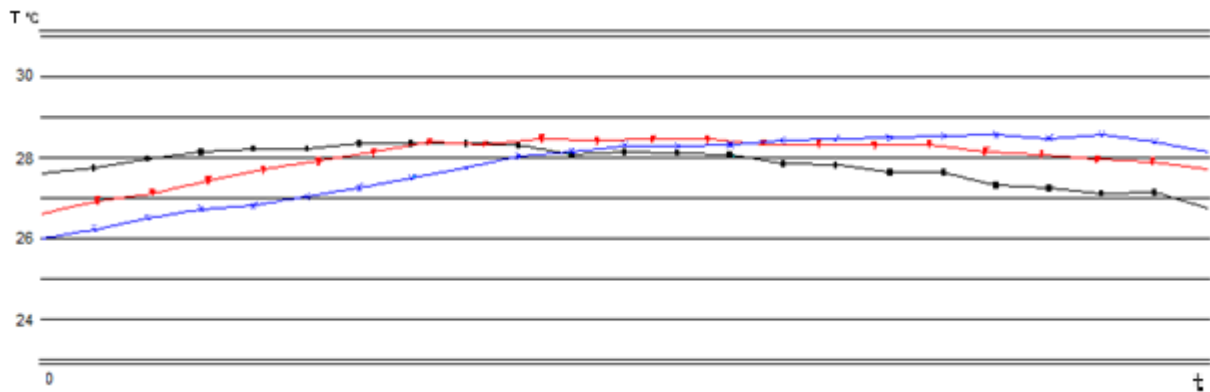
Teplotní ovlivnění bylo kontrolováno thermokamerou TC Flir 600. Po nasnímání celého procesu řezání, který trval cca 1,5 minuty, byly výsledky vyhodnocovány v softwaru Thermocam Reseacher Pro 2.10. Na Obr. 81 lze vidět vřeteno soustruhu, součásti dělicího zařízení a dělený vzorek. Právě na tomto vzorku byly vytvořeny tři pomyslné měřící čáry (Line 1, Line 2, Line 3) na kterých bylo ovlivnění vyhodnocováno. Průměrné, maximální a minimální teploty jsou zmíněny v Tab. 81 a průběh teploty v čase je zobrazen na Obr. 82.



Obr. 81 – Vizualizace funkce upínacího zařízení

Tab. 81 – Naměřené hodnoty [°C]

	x	s	Min	Max
Line 1	27,8	0,5	26,7	28,4
Line 2	28,0	0,5	26,6	28,5
Line 3	27,8	0,8	26,0	28,6

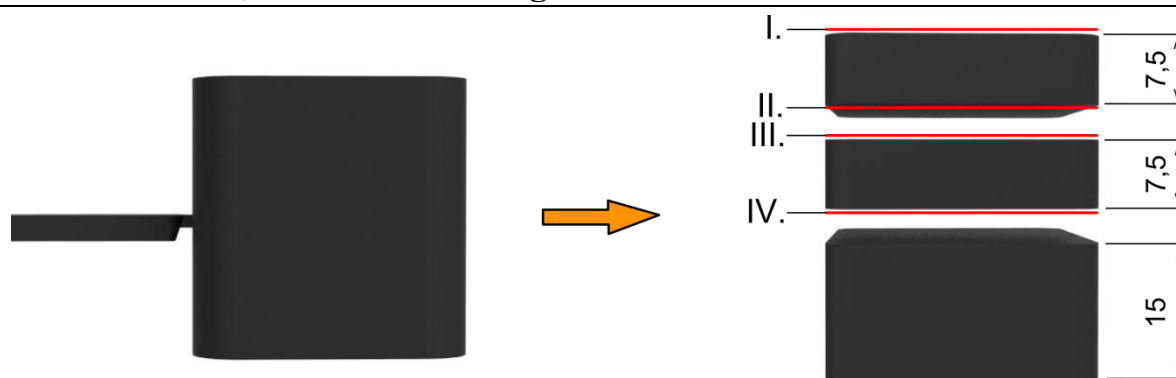


Obr. 82 – Průběh teploty v jednotlivých řezech

Během měření teplotního ovlivnění děleného vzorku teplota nevzrostla nad 29°C a to z důvodu, že během tohoto procesu bylo těleso intenzivně chlazeno vodní emulzí. Lze tedy říci, že při dělení nejsou vzorky tepelně ovlivněny.

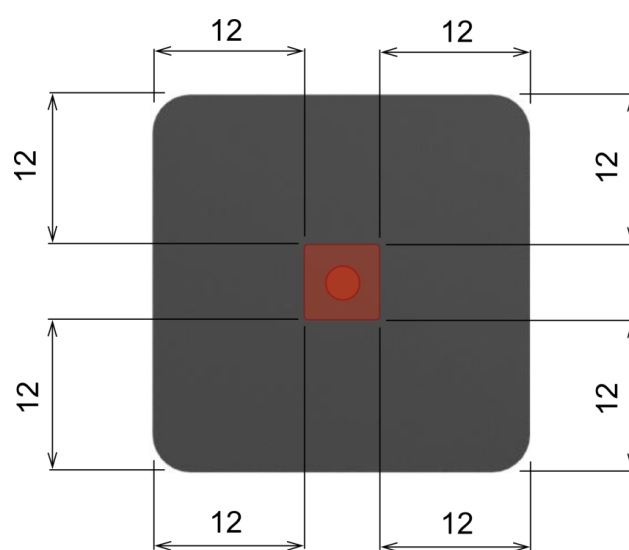
4.7.6 Zkouška tvrdosti na jednotlivých vrstvách

Zkouška tvrdosti byla uskutečněna na vrstvách o tloušťce $7,5 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$. Postup byl předepsaný normou ČSN EN ISO 48, která pojednává o stanovení tvrdosti metodou IRHD.



Obr. 83 – Jednotlivé rozřezané vrstvy a znázorněné měřené plochy I. – IV.

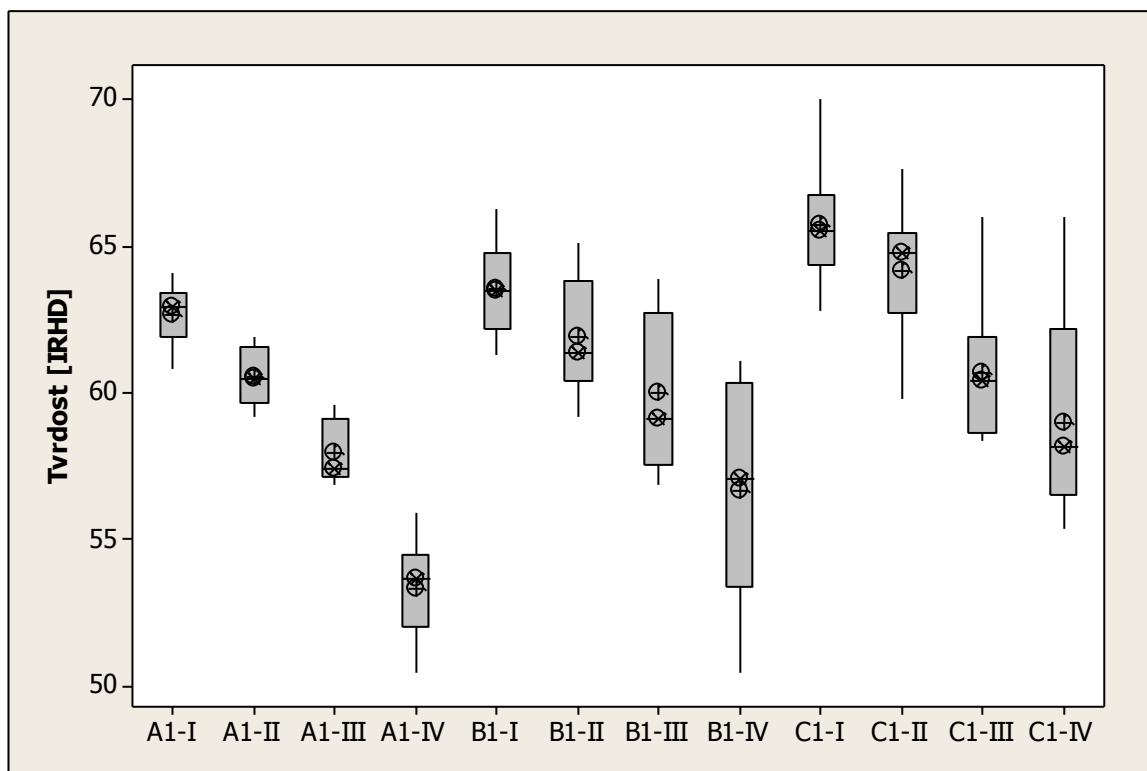
Norma ČSN EN ISO 48 udává, že jednotlivá měření musí být vzdálena od sebe minimálně 6 mm a musí být vzdálena od okraje tělesa minimálně 12 mm, proto je zřejmé, že každá vrstva může být měřena od okraje pouze jednou. Samostatné měření bylo realizované ve středu vrstvy. Měření pro všechny trajektorie i nastavení procesních podmínek probíhalo na deseti vzorcích. Doba mezi vulkanizací a průběhem zkoušky musí být dle normy ČSN EN ISO 23529 minimálně 16 hodin, což bylo dodrženo. Zkouška byla realizovaná při teplotě 23°C a vlhkosti vzduchu v rozsahu (48 – 56) %. Bylo měřeno vždy deset vzorků, pro každou vrstvu i nastavení.



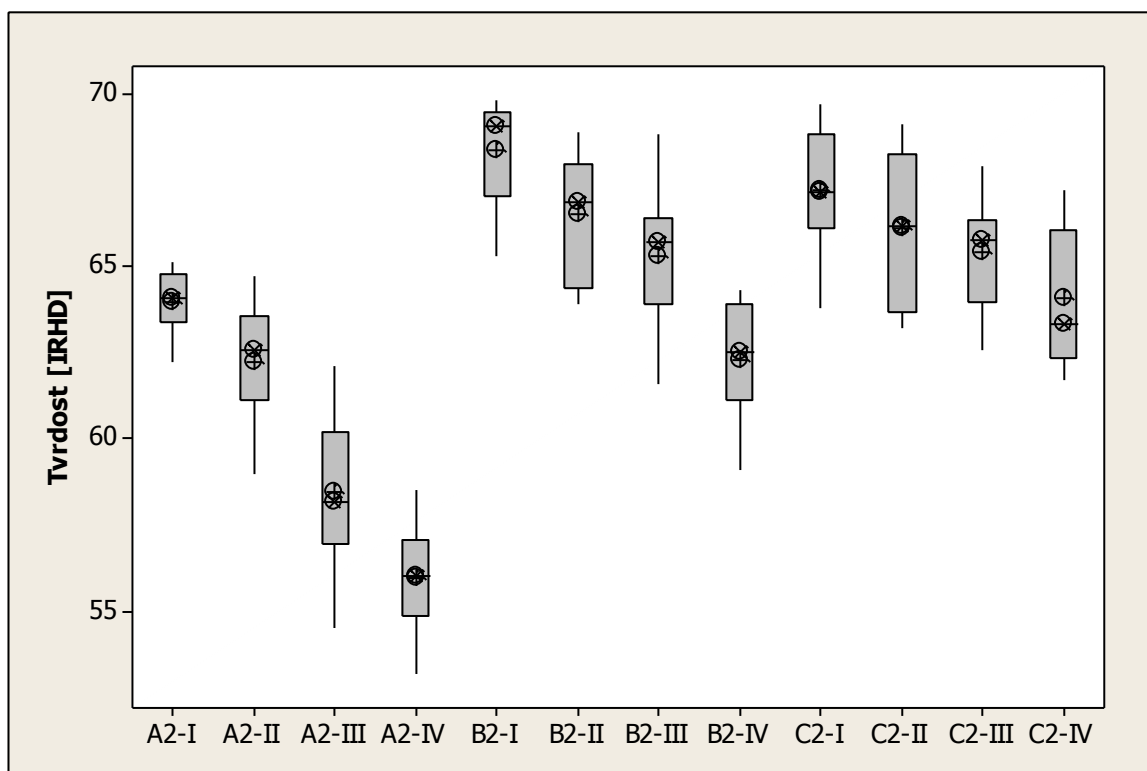
Obr. 84 – Podmínka měření min. 12 mm od okraje

Následující Box – plotové diagramy (Obr. 85 – 90) zobrazují naměřená data (tvrdost IRHD) v jednotlivých vrstvách I – IV u jednotlivých trajektorií. Označení sloupců je použito dle nastavení procesních parametrů (viz. Tab. 75; 78), kde písmeno označuje typ trajektorie a číslo nastavení podmínek (např. A2; A – rovný, široký kanál; 2 – doba vstřikování 1 minuta a čas vstřikování 3 minuty).

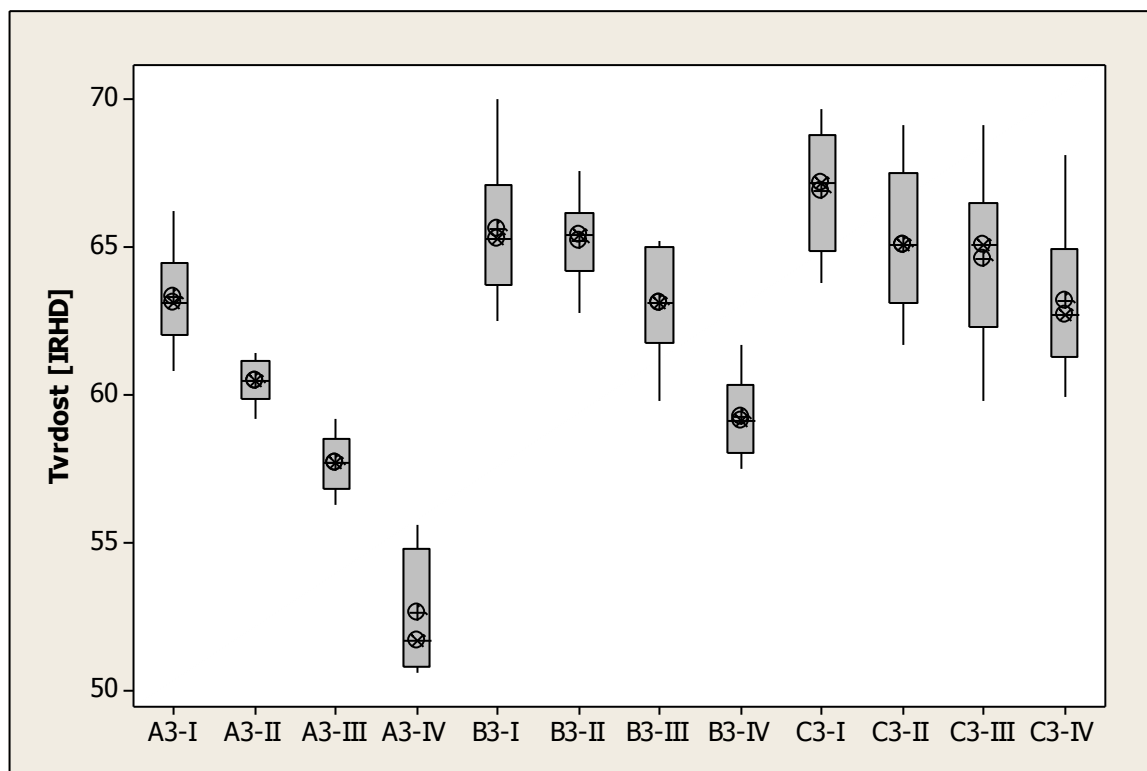
Protože byl materiál na okraji kostky nejvíce z vulkanizován (vrstva I), byl tedy i nejtvrdší. Zpravidla zde byl nejmenší rozptyl naměřených hodnot. Naopak tomu bylo ve střední vrstvě (vrstva IV), zde byl materiál nejméně z vulkanizován a naměřená tvrdost byla nejmenší.

4.7.7 Porovnání široké trajektorie A, B, C při procesních podmínkách 1

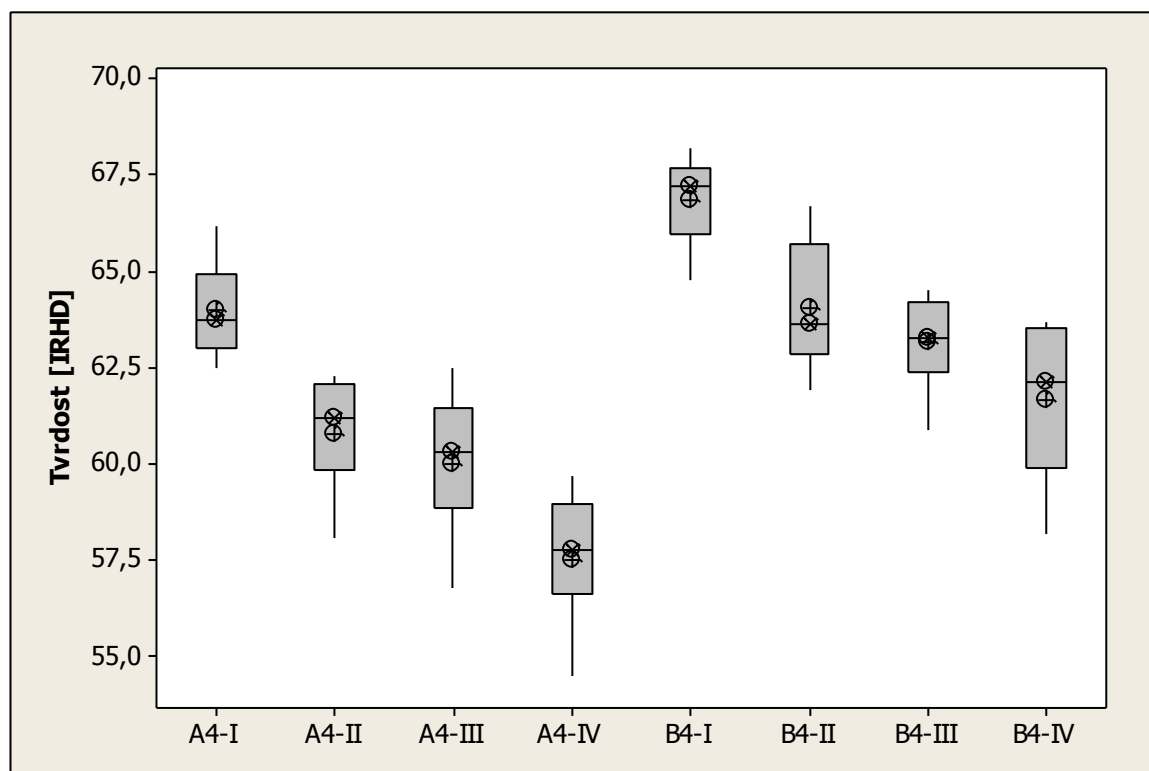
Obr. 85 – Naměřené hodnoty zobrazené pomocí Box-plotového diagramu (A1, B1, C1)

4.7.8 Porovnání široké trajektorie A, B, C při procesních podmínkách 2

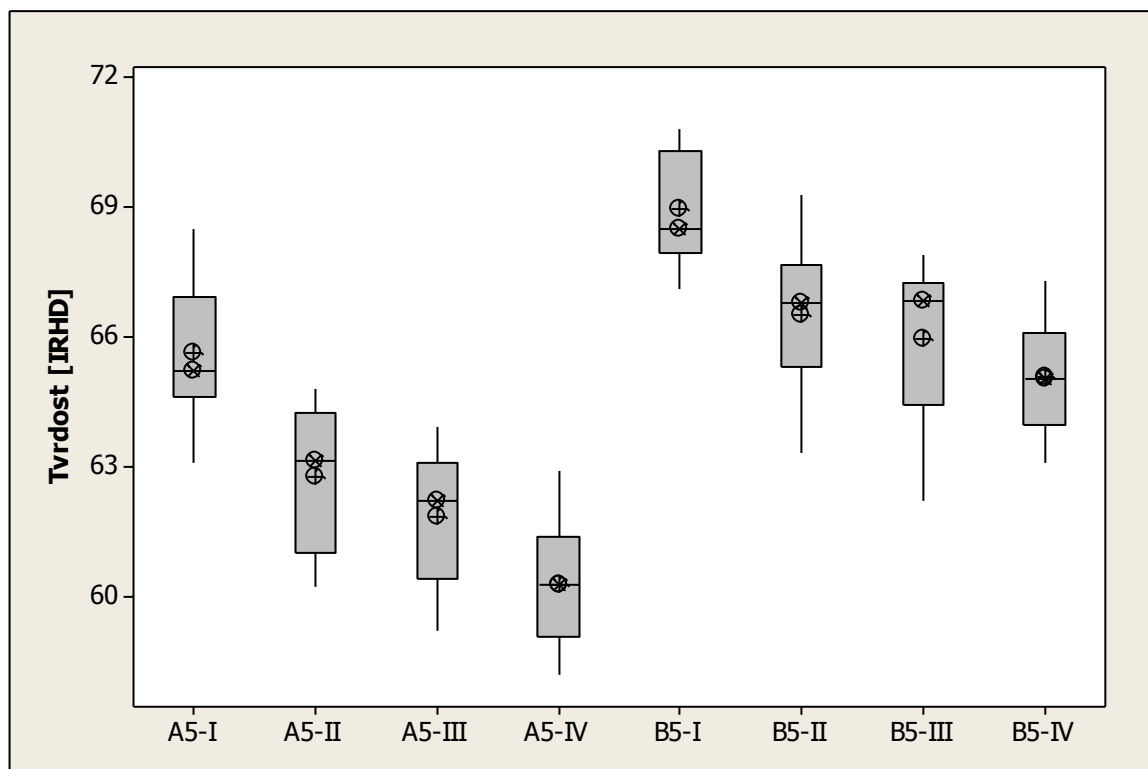
Obr. 86 – Naměřené hodnoty zobrazené pomocí Box-plotového diagramu (A2, B2, C2)

4.7.9 Porovnání široké trajektorie A, B, C při procesních podmínkách 3

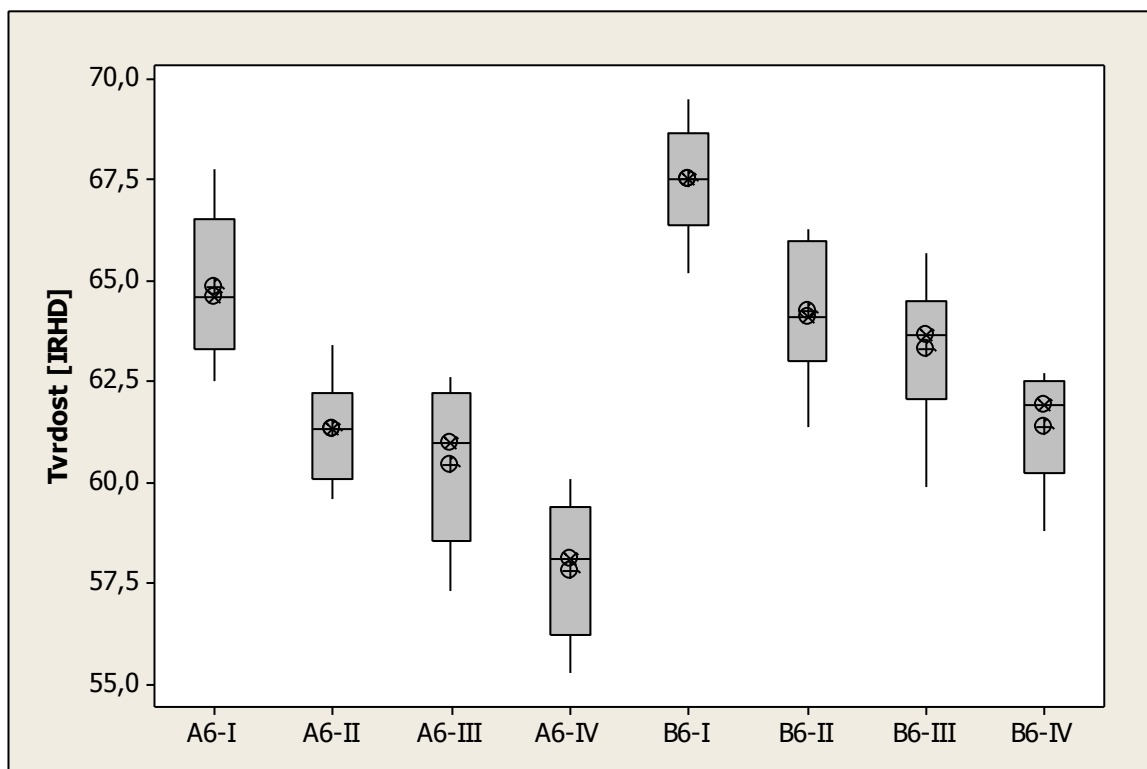
Obr. 87 – Naměřené hodnoty zobrazené pomocí Box-plotového diagramu (A3,B3,C3)

4.7.10 Porovnání úzké trajektorie A, B při procesních podmínkách 4

Obr. 88 – Naměřené hodnoty zobrazené pomocí Box-plotového diagramu (A4,B4)

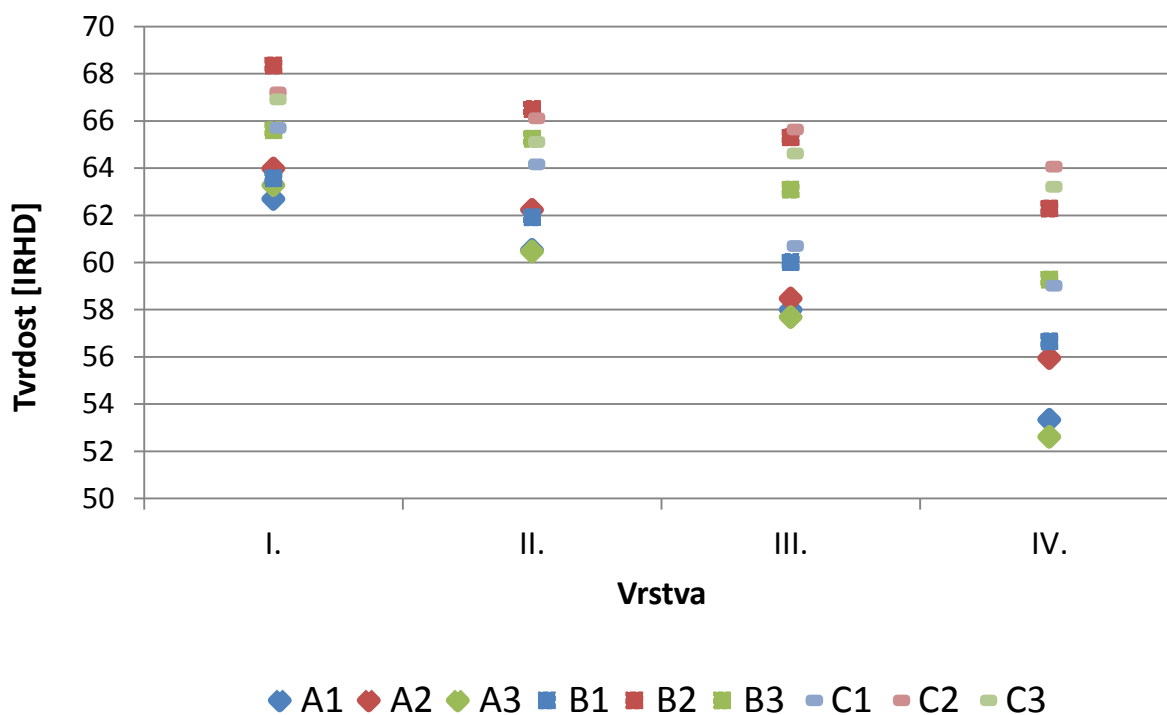
4.7.11 Porovnání úzké trajektorie A, B při procesních podmínkách 5

Obr. 89 – Naměřené hodnoty zobrazené pomocí Box-plotového diagramu (A5,B5)

4.7.12 Porovnání úzké trajektorie A, B při procesních podmínkách 6

Obr. 90 – Naměřené hodnoty zobrazené pomocí Box-plotového diagramu (A6,B6)

4.7.13 Diskuze výsledků tvrdosti IRHD

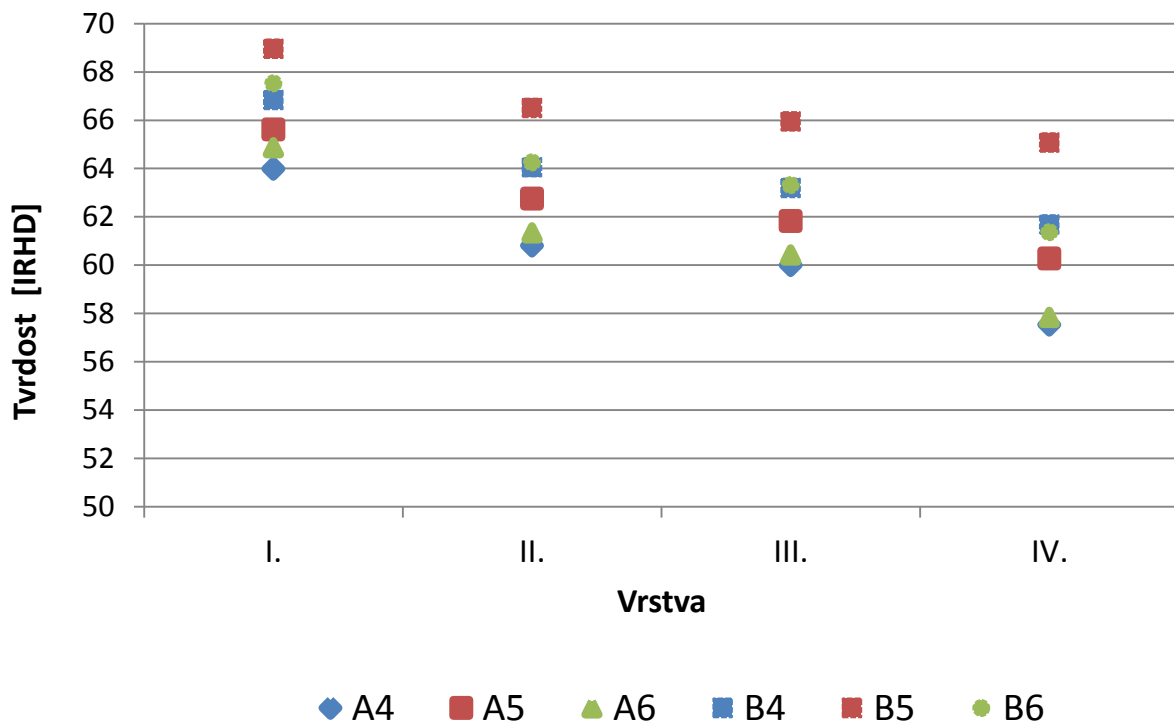


Obr. 91 – Průměrná tvrdost v širokých kanálech, shrnutí A1 – C3

Tvrđost vulkanizátu roste s časem vulkanizace, kterému je výrobek podroben. Z grafu na Obr. 91 lze i vidět, že setrvání materiálu ve vtokovém systému má rozhodující vliv na jeho výslednou tvrdost. Materiál je u 200 mm kanálů vstřikován relativně dlouhou dobu, proto se zde projevuje vliv přestupu tepla od stěny formy více než u kanálu 100 mm. U delší trajektorie (200 mm) dosahuje tvrdost výsledného vulkanizátu vždy větších průměrných hodnot, než u trajektorie 100 mm.

Pokud je srovnávána tvrdost mezi stejně dlouhými trajektoriemi a to křivka (B1 – B3) a zig – zag (C1 – C3), tvrdost uvnitř kostky je vždy vyšší u trajektorie zig – zag. To je způsobeno tím, že odpor tečení materiálu u této geometrie byl vyšší a materiál ve vtokovém kanále zůstal o něco déle (cca 10 s) a přijal více energie ze stěny formy. Na druhou stranu tvrdost v krajní vrstvě vždy vyšší není, a to z toho důvodu, že krajní vrstva byla ovlivněna vyhřátou stěnou dutiny formy. Čas vulkanizace nebyl záměrně zvolen tak, aby prohřál výrobek v celém průřezu. Rozdíly tvrdosti v krajních vrstvách mezi těmito trajektoriemi jsou způsobeny chybami měření a chybami použité metody k získání výsledků.

I v případě použití úzkého průřezu rozvodných kanálů je vidět (Obr. 92), že délka trajektorie má značný vliv na výslednou tvrdost pryže. Lze vidět, že střední vrstva (vrstva IV) má vyšší tvrdost než střední vrstva u širokých kanálů. To dokazuje, že materiál, který zaplní dutinu formy, má vyšší teplotu, než u širokého kanálu.



Obr. 92 – Průměrná tvrdost v úzkých kanálech, shrnutí A4 – B6

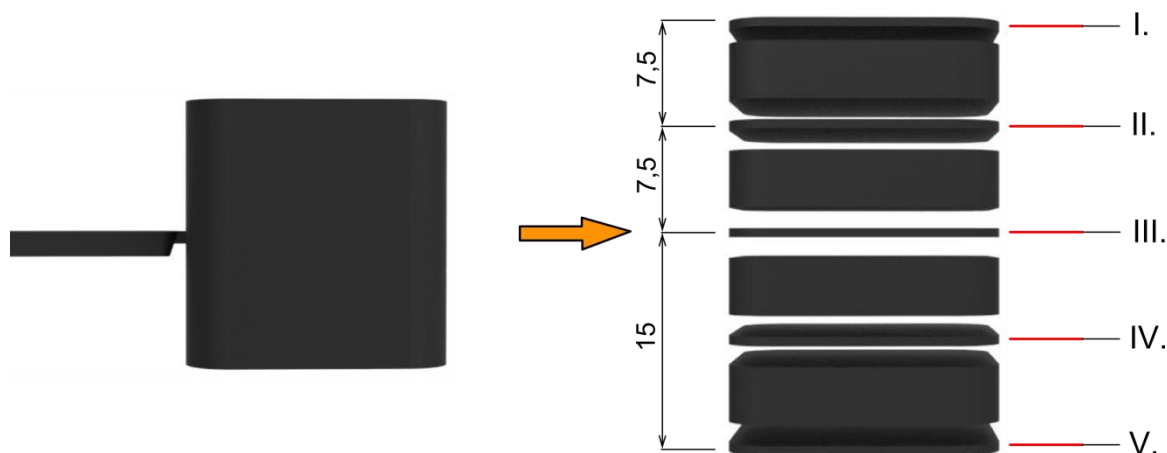
4.8 Tahová zkouška tlustostěnných výrobků

Tahová zkouška byla prováděna na stroji Zwick/Roell Z005 (Obr. 35). Tento stroj disponuje laserovým extenzometrem, který je využíván na snímání aktuálního protažení. Měření byly pouze krátká trajektorie (přímá = 100 mm) a dlouhá trajektorie (křivka = 200 mm).

Tab. 82 – Rozměry a tvar tahového tělesa

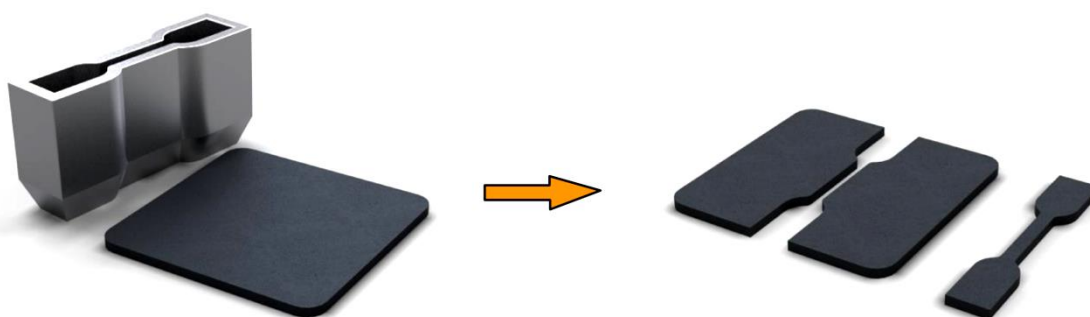
	Rozměr [mm]
A Celková délka:	30
B Šířka konců:	$6 \pm 0,5$
C Délka úzké části:	$12 \pm 0,5$
D Šířka úzké části:	$2 \pm 0,1$
E Přejímový poloměr:	$3 \pm 0,1$
F Přejímový poloměr:	$3 \pm 0,1$
Vyhodnocovaná délka:	$10 \pm 0,5$

K měření došlo na pěti vrstvách, přičemž dvě vrstvy jsou na kraji (v kontaktu s formou), jedna vrstva přímo uprostřed pryžové kostky a dvě vrstvy jsou v poloviční vzdálenosti mezi středem a krajem kostky (Obr. 93).



Obr. 93 – Odběr zkušebních těles

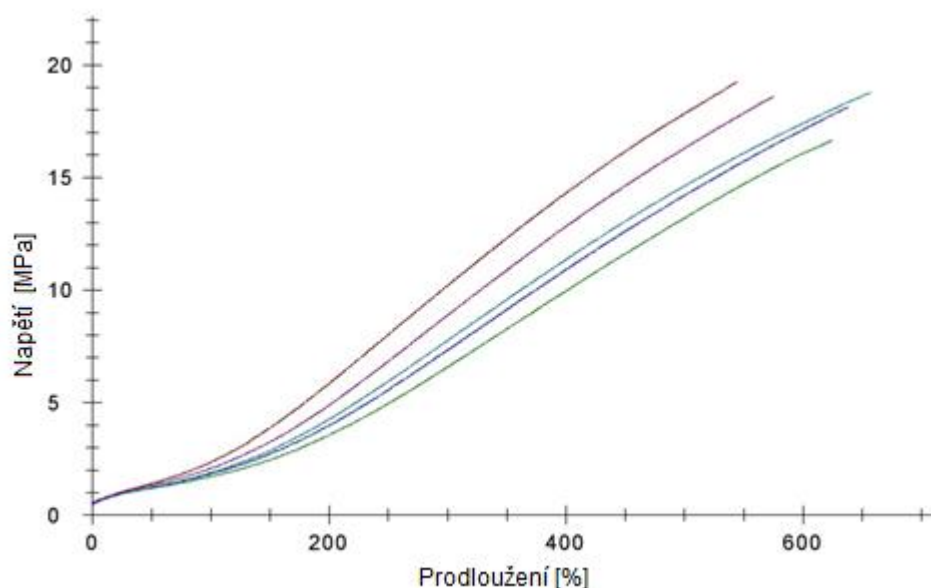
Z takto dělených vrstev bylo po 24 hodinách relaxace vyseknuto těles pro tahovou zkoušku a následně byla tato zkouška provedena.



Obr. 94 – Volba zkušebních těles

Tab. 83 – Nastavení procesních parametrů

Parametr stroje	Popis činnosti	[-]	Hodnota	
			Široký průřez	Úzký průřez
30	Celková dávka směsi (délka dráhy pístu)	[mm]	490	490
41	Vstřikovací tlak udávaný v barech	[bar]	160	200
46	Délka působení vstřikovacího tlaku	[min]	2	2
56	Doba vulkanizace od skončení vstřikování	[min]	2	2
61	Teplota plastikační komory	[°C]	100	100
62	Teplota vstřikovací komory	[°C]	100	100
65	Teplota formy	[°C]	155	155



Obr. 95 – Tahové zkoušky pro krátký kanál a úzký průřez v jednotlivých vrstvách

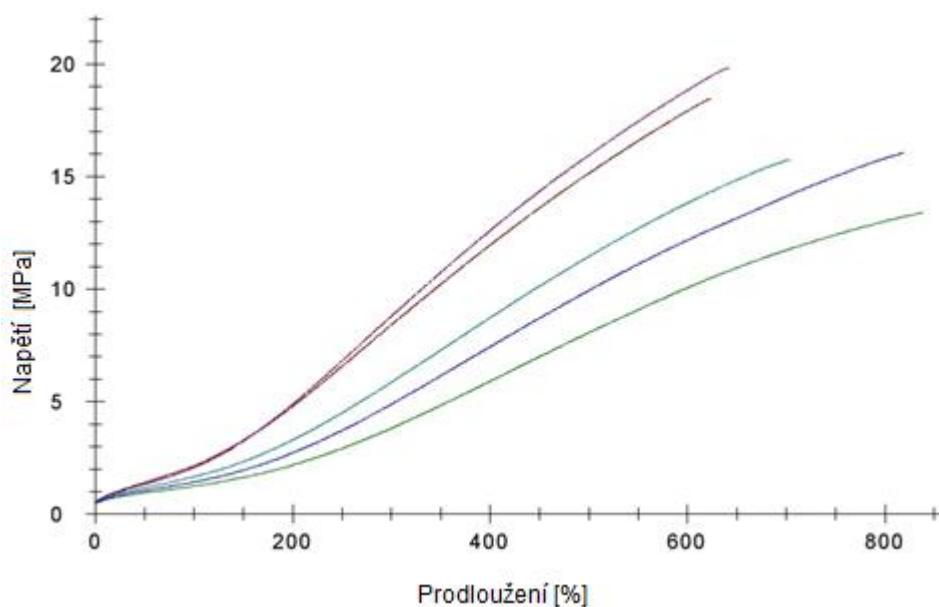
Tab. 84 – Výsledné hodnoty pro krátký kanál a úzký průřez v jednotlivých vrstvách

vrstva	R_B [MPa]	ε [%]	E 100% [MPa]	E 200% [MPa]	E 300% [MPa]	E 400% [MPa]	energie [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

V protokolu z tahových zkoušek byly uvedeny hodnoty (viz. Tab. 84 – 87): R_B - Mez pevnosti, ε - poměrné prodloužení, $E_{100\%-400\%}$ - modul pružnosti v tahu při jednotlivých prodlouženích, energie spotřebovaná pro přetržení tělesa a šířka tělesa (a0).

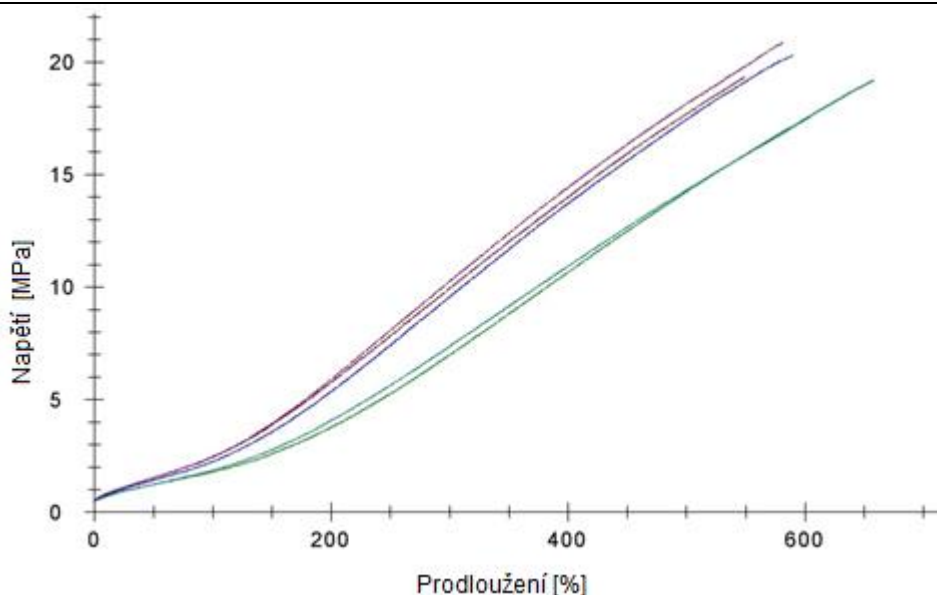
U všech měření byla na stěnách kostky dosažena největší pevnost v tahu. Je to způsobené tím, že kostka je na povrchu v kontaktu se stěnou formy a je nejvíce zvlukanizovaná, směrem ke středu kostky pevnost v tahu klesá. Rozdíl mezi krajní vrstvou a prostřední vrstvou je téměř tři jednotky u krátkého kanálu a úzkého průřezu (Obr. 95, Tab. 84).

U krátkého kanálu a širokého průřezu (Obr. 96, Tab. 85) byl rozdíl mezi krajní a prostřední vrstvou téměř šest jednotek u pevnosti v tahu. Je to důsledek toho, že materiál v širokém kanálu nebyl tak prohřán, jako u úzkého. Z čehož vyplývá, že při použití stejných procesních podmínek, ale jiných průřezů vtokových kanálů je možné dosáhnout u finálního výrobku rozdílných mechanických vlastností, tedy i stupně vulkanizace.



Obr. 96 – Tahové zkoušky pro krátký kanál a široký průřez v jednotlivých vrstvách
 Tab. 85 – Výsledné hodnoty pro krátký kanál a široký průřez v jednotlivých vrstvách

vrstva	R_B [MPa]	ϵ [%]	E 100% [MPa]	E 200% [MPa]	E 300% [MPa]	E 400% [MPa]	energie [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

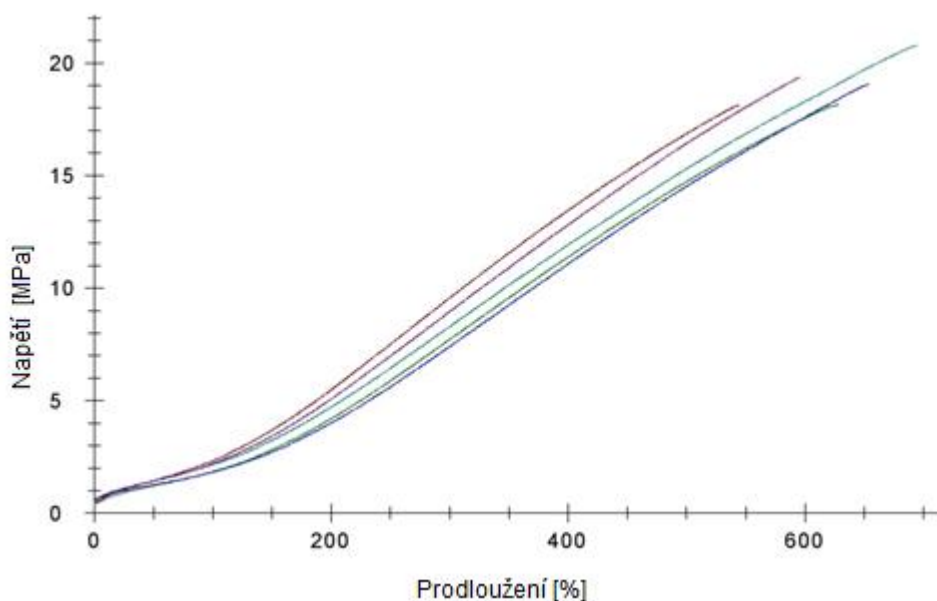


Obr. 97 – Tahové zkoušky pro dlouhý kanál a úzký průřez v jednotlivých vrstvách

U dlouhého kanálu materiál setrvává déle ve vtokovém kanálu, než u kratších. Tavenina se tak dostane do dutiny formy více prohřátý. Rozdíl pevností mezi krajními vrstvami a střední vrstvou není tak enormní jako u krátkých kanálů.

Tab. 86 – Výsledné hodnoty pro dlouhý kanál a úzký průřez v jednotlivých vrstvách

vrstva	R_B [MPa]	ε [%]	E 100% [MPa]	E 200% [MPa]	E 300% [MPa]	E 400% [MPa]	energie [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



Obr. 98 – Tahové zkoušky pro dlouhý kanál a široký průřez v jednotlivých vrstvách

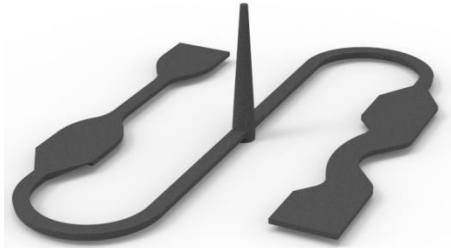
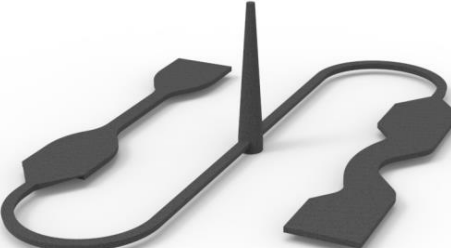
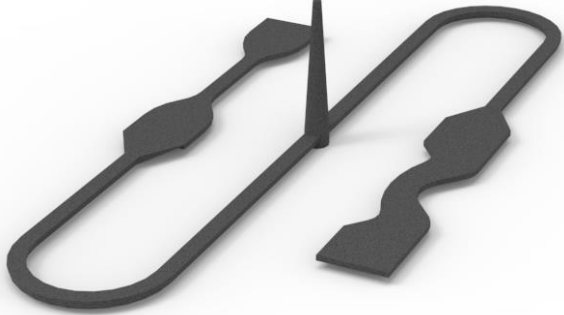
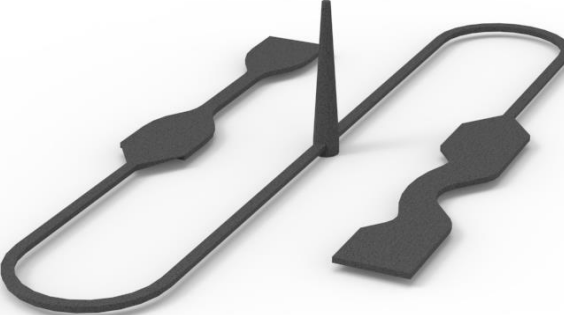
Tab. 87 – Výsledné hodnoty pro dlouhý kanál a široký průřez v jednotlivých vrstvách

vrstva	R_B [MPa]	ε [%]	E 100% [MPa]	E 200% [MPa]	E 300% [MPa]	E 400% [MPa]	energie [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	11,38	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

I když uvedené měření vykazovalo podobné tendenci jako metoda IRHD, bylo velice neefektivní a zdlouhavé. Nebylo snadné dělit výrobek (kostku) na tak tenké díly a strojem pro tahovou zkoušku s laserovým extenzometrem disponovala jen externí firma. Prvotní výsledky ukázali podobnou tendenci jako měření tvrdosti, ale kvůli složitosti přípravy vzorku se od měření opustilo a hledala se další efektivnější metoda, kterou by metodu IRHD podpořila a tou byla tahová zkouška tenkostěnných výrobků (viz. Kapitola 4. 12).

4.9 Tahová zkouška tenkostěnných výrobků

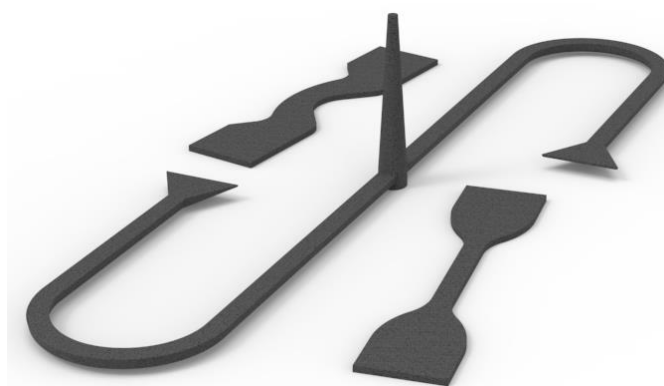
Tab. 88 – Nastavení procesních parametrů

Trajektorie kanálu					
Krátký, široký	1				
					
					
					
Varianty	Č.	teplota [°C]		doba vstřikování [s]	doba vulkanizace [min]
		taveniny	formy		
	A	100	155	35	2,5
B	100	170	35	1	
C	100	170	35	1,5	

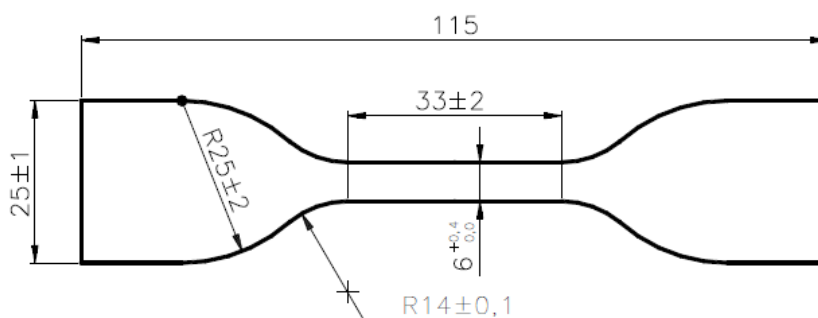
Protože tahová zkouška těles připravených z tlustostěnných výrobků (pryžových kostek) nemohla být z důvodu složitosti opakována a statisticky podpořena, bylo nasnadě závislost ze zkoušky IRHD více podpořit. Proto byly vytvořeny další čtyři tvarové desky s dutinami tenkostěnných těles. Výrobky ve formě byla tělesa na tahovou zkoušku dle normy ČSN ISO 37 a těleso Crescent na strukturní zkoušku dle normy ČSN 62 1459. Pro vstřikování byla použita stejná směs jako v minulých měřeních. Byly upraveny parametry stroje, především dávka směsi a čas vstřikování tak, aby dutina formy byla bezpečně zaplněna.

Tab. 89 – Parametry a nastavení vstřikovacího stroje

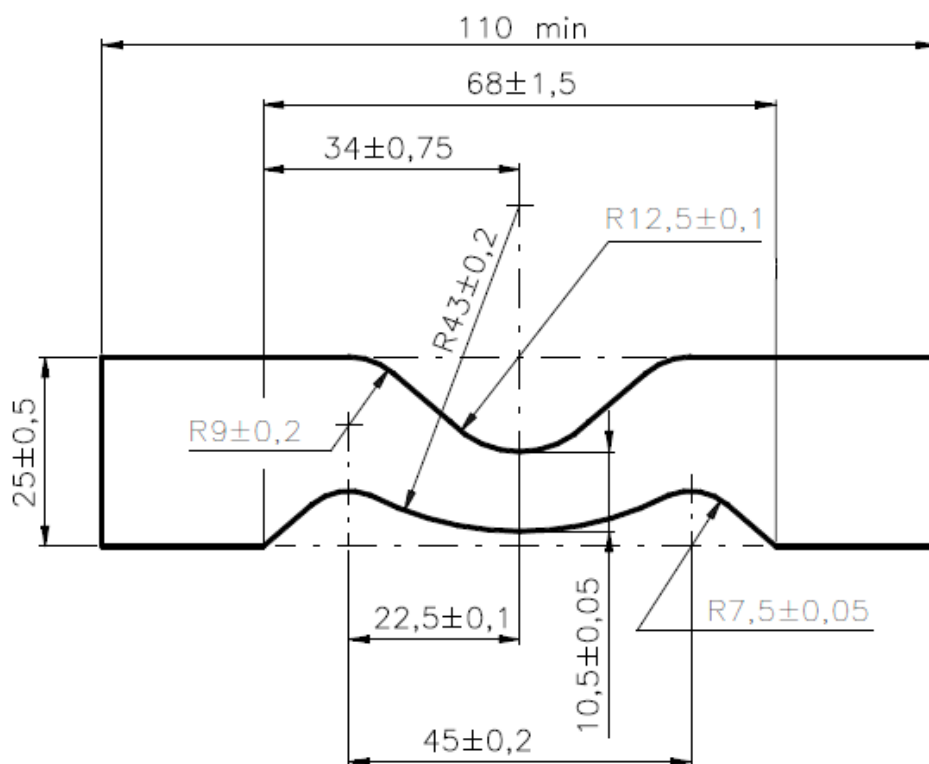
Parametr	Popis činnosti	[-]	hodnota
30	Celková dávka směsi (délka dráhy pístu)	[mm]	120,140,170
41	Vstřikovací tlak (max. 200 bar)	[bar]	200
51	Délka působení vstřikovacího tlaku	[min]	35
56	Doba vulkanizace od skončení vstřikování	[min]	2,5;1;1,5
61	Teplota plastikační komory	[°C]	100
62	Teplota vstřikovací komory	[°C]	100
65	Teplota horní vyhřívací desky	[°C]	155, 170
67	Teploty spodní vyhřívací desky	[°C]	155, 170



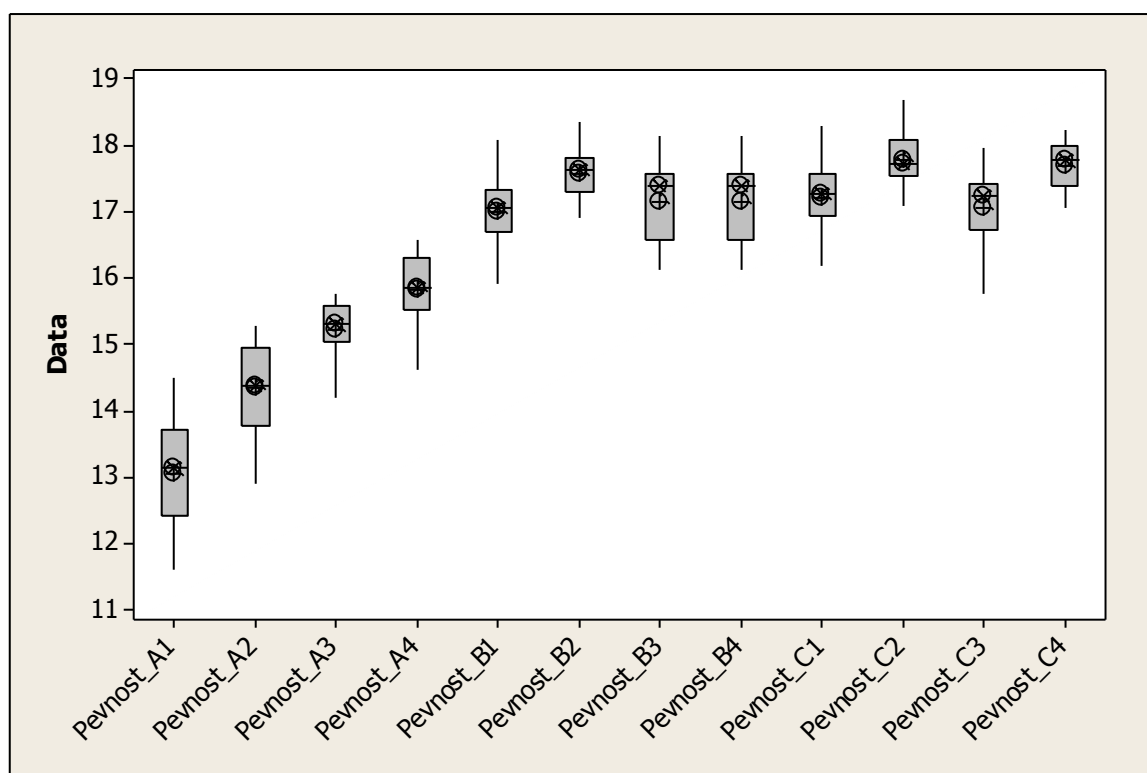
Obr. 99 – Příprava vzorků na tahovou zkoušku



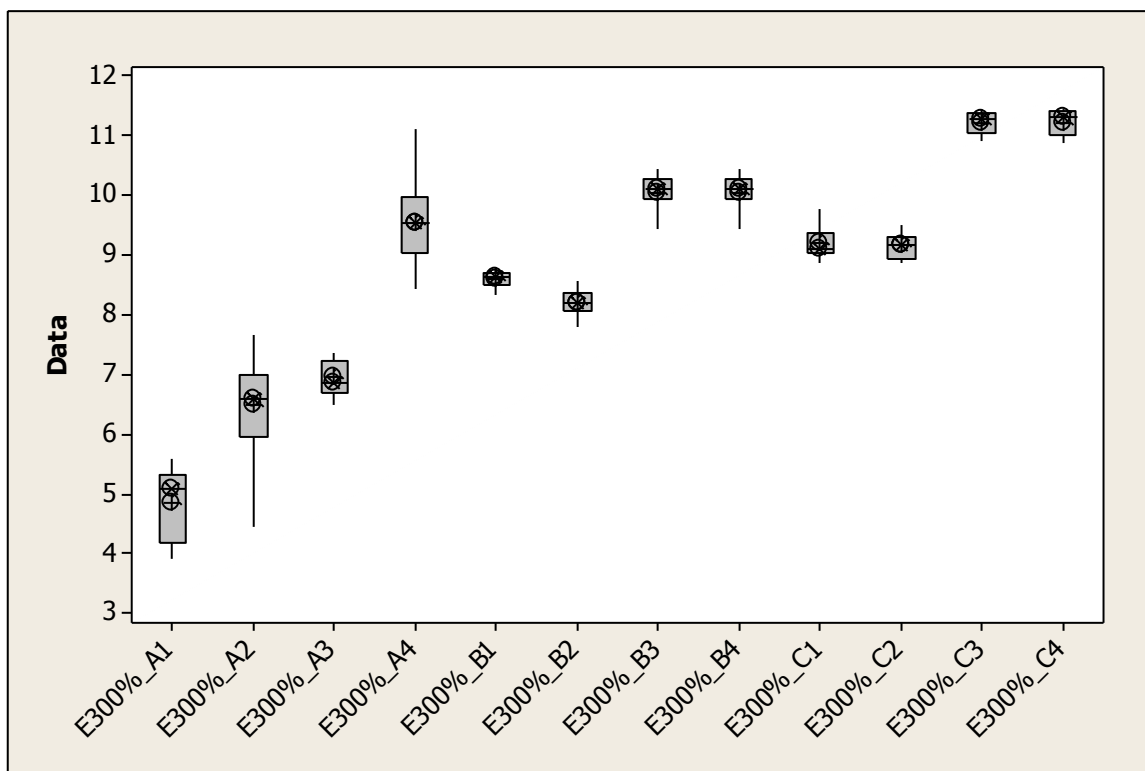
Obr. 100 – Rozměry tělesa pro tahovou zkoušku dle ČSN ISO 37



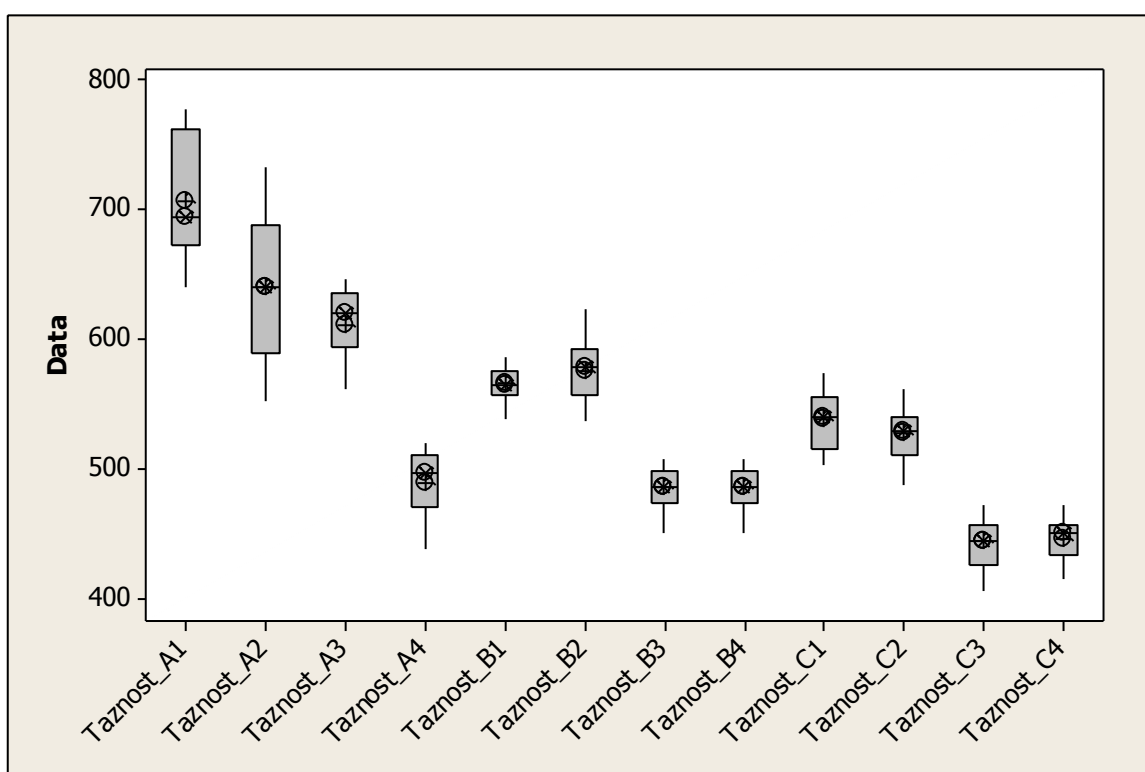
Obr. 101 – Rozměry tělesa pro tahovou zkoušku dle ČSN 621459



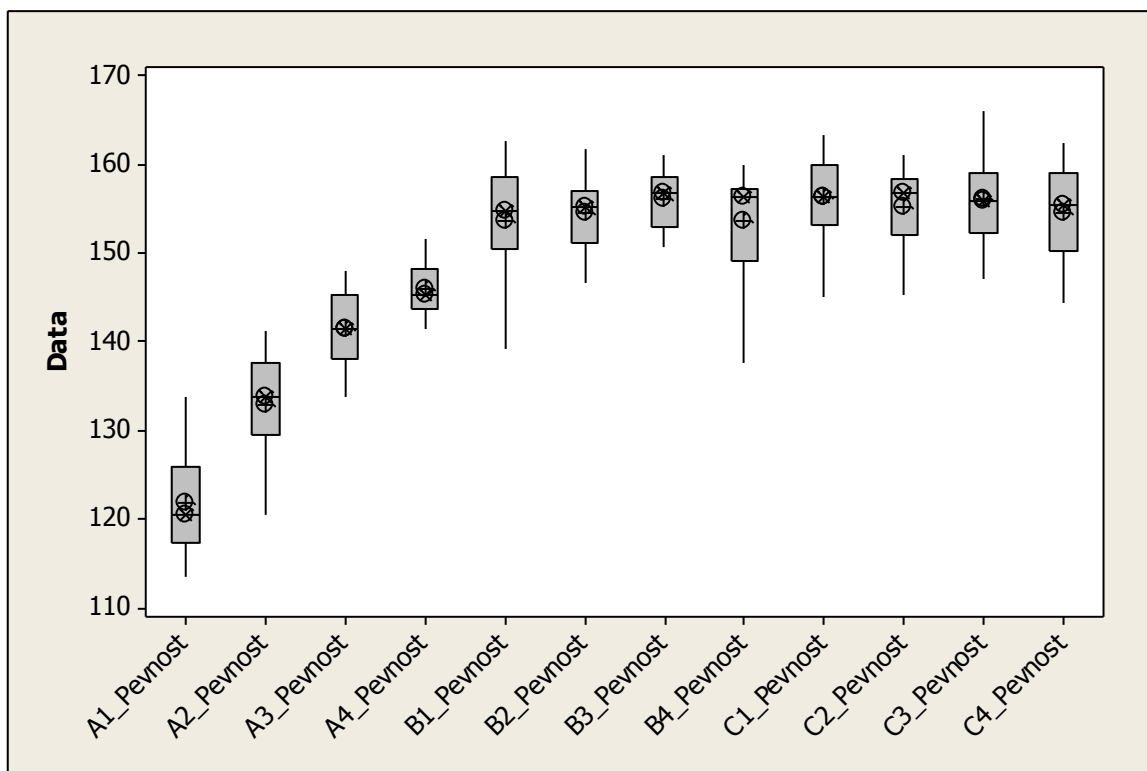
Obr. 102 – Mez pevnosti v tahu [MPa]



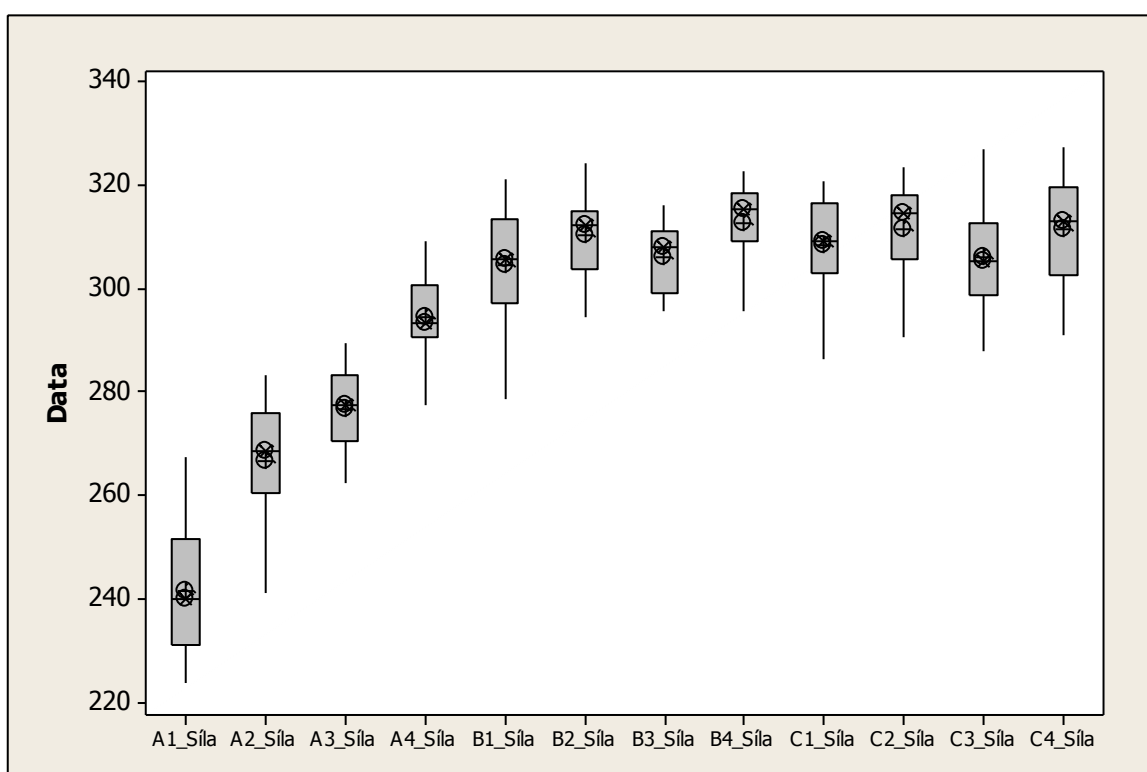
Obr. 103 – Modul pružnosti v tahu při 300% protažení [MPa]



Obr. 104 – Poměrné prodloužení [%]



Obr. 105 – Strukturní pevnost [N/mm]



Obr. 106 – Síla při přetržení [N]

Z výsledků vyplývá opět předpokládaná tendence. Pokud je materiál déle ohříván (probíhá u něj déle vulkanizace), dosáhne větší meze pevnosti i jednotlivých modulů pružnosti, naopak klesá poměrné prodloužení na mezi pevnosti. Je nutné zde podotknout, že nastavení doby vulkanizace nikdy nebylo tak velké, aby došlo k reverzi. Hodnoty ukazují stejnou závislost i při strukturní zkoušce.

Při nastavení A1 – A4 je vidět, že pevnost, tedy i stupeň vulkanizace, roste s delším vtokovým kanálem i užším průřezem. Největší pevnost i modul pružnosti při 300% protažení je u čtvrtého kanálu, což je dlouhý kanál s úzkým průřezem. Naopak poměrné prodloužení je zde nejnižší.

Při zvýšení teploty stěny formy, či při zvýšení doby ohřevu (nastavení B i C) je vidět, že modul $E_{300\%}$ má vždy vyšší hodnotu u delších trajektorií a také nižší hodnotu poměrného prodloužení na mezi pevnosti. Hodnoty meze pevnosti v tahu u nastavení B i C se pohybovaly v rámci chyby měření.

Potvrdila se tak závislost výsledků ze zkoušky IRHD u tlustostěnných těles. Metoda měření pevnosti je vhodná pro měření závislosti délky a tvaru vtokových kanálů nástroje na vlastnosti gumárenské směsi.

5 PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI

Hlavní přínosy práce shledávám v následujících bodech:

- Hlubší pochopení vlivu tvaru a délky vtokových kanálů na vlastnosti gumárenské směsi, tedy i na finální vlastnosti výrobku. Zkrácení času vulkanizace pro různé trajektorie, jak pro tenkostěnná, tak tlustostěnná tělesa pomocí změny kanálu. A tím zvýšení produktivity výroby.
- Popis postupu při práci s tokovými analýzami pro elastomerní směsi a to zjištění materiálových vlastností, nastavení výpočetních analýz a práce se získanými výsledky.
- Možnost zkrácení času vstřikovacího cyklu pomocí jednoduché úpravy vstřikovací formy a tou je vhodný výběr vtokového kanálu, který vede zejména k úspoře energie potřebné k ohřevu materiálu na vulkanizační teplotu. Tato energetická úspora se efektivněji projeví zejména u vícenásobných forem.
- Výsledky studia vlivu geometrie tokových cest vstřikovacího nástroje na vlastnosti gumárenské směsi mohou pomoci jak konstruktérům nástrojů, tak pracovníkům ve vývoji.
- Práce také uvádí, že při tokových analýzách by měl být kladen větší důraz na výpočty ve vtokovém kanálu. Ty jsou ve výpočetních softwarech zjednodušeny a řeší především tok materiálu v tvarových částech dutiny formy.
- Dalším přínosem je vyrobená vstřikovací forma, pomocí které mohou být testovány další typy kaučukových směsí v kombinaci s různými trajektoriemi vtokových systémů.

6 ZÁVĚR

Disertační práce se zabývala v celém svém obsahu vstřikováním elastomerní směsi a její přeměny na vulkanizát během tohoto procesu. Než byla vytvořena vstřikovací forma pro stroj REP V27 Y125, byly provedeny prvotní analýzy, které ukázaly, že změna tvaru průřezu a délky vtokového kanálu mají vliv na materiálové vlastnosti, zejména na změnu teploty materiálu a s tím spojenou vulkanizaci.

První část práce byla směřována k výsledkům z počítačových analýz, které ukázaly, že znalost reologických charakteristik je při procesu vstřikování nesmírně důležitá. S rostoucím indexem nenewtonského chování se zvyšuje intenzita smykové deformace při toku, zvyšuje se tak míra generování disipační energie, která se mění na teplo a směs ohřívá. V případě, že materiál má malý odklon od newtonského chování, je výhodné ho zpracovávat při vyšších rychlostech, kdy je primárním zdrojem tepla disipace. Naopak, pokud má materiál velký odklon od newtonského chování, vysokou rychlostí vstřikování dojde jen k malé intenzitě smykové deformace při toku a proto primárním zdrojem tepla je přestup tepla od stěny formy. V tomto případě je výhodnější vstřikovat při nižších rychlostech, čím se poskytne dostatek času na přestup tepla mezi materiálem a stěnou formy.

Dále byly provedeny tokové analýzy pro relaxační čas, další reologickou konstantu. S vyšší hodnotou relaxačního času roste odpor proti tečení materiálu a právě při větších rychlostech se projeví vliv disipace, tak jak tomu bylo u minulé úlohy. Aby mohl být proces správně analyzován, je potřeba znát celou tokovou křivku a ne pouze její konstanty, nebo body na křivce, jako je ITT (Index Toku Taveniny).

Další část počítačových analýz byla zaměřena na studium závislosti průřezu vtokového kanálu na čase vulkanizace. K simulaci byl použit kruhový a lichoběžníkový kanál o stejné délce a to 100 mm o průřezích 7 mm² a 15 mm². Z výsledků bylo zjištěno, že čelo taveniny na konci kanálu je více ohřáté u lichoběžníkového než u kruhového ($T = 170 \text{ }^\circ\text{C}$, $v = 5 \text{ mm/s}$ - $T_{\text{lichoběžník}} = 143 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{kruh}} = 133 \text{ }^\circ\text{C}$). Ke zvýšení teploty materiálu, a tím spojené snížení potřebného vulkanizačního času, došlo přestupem tepla. Kontaktní obvod při úzkém lichoběžníkovém kanálu je 11 mm, zatímco při úzkém kruhovém kanálu je přibližně 9,39 mm. Druhým důvodem zvýšení teploty je geometrie kanálu. Zatímco při kruhovém tvaru je nejvzdálenější bod, vzdálený od stěny formy cca 1,49 mm, při lichoběžníkové geometrii nejvzdálenější bod leží pouze 1 mm od stěny formy. Stejnou tendenci ukazují i výsledky z analýz širokých kanálů.

Současně byl studován vliv délky rozvodného kanálu na dobu vulkanizace. Při analýzách byly použity úzké a rovné lichoběžníkové průřezy s délkami rozvodných kanálů 100 mm a 200 mm. Bylo zjištěno, že za použití nízkých rychlostí vstřikování je snížení času potřebného k vulkanizaci u kanálu o délce

200 mm způsobené zvýšením teploty o cca (13 – 16) °C oproti 100 mm kanálu. Zvýšená teplota byla dosažena delší dobou setrvání materiálu v úzkém kanálu. Bylo zde materiálu poskytnuto více času na přestup tepla od stěny kanálu. U těchto výpočtů je důležité říci, že je nutné, aby materiál disponoval dostatečně dlouhou bezpečností směsi, nesmí zde nastat předčasná vulkanizace ve vtokových kanálech, což by mělo za následek zhoršení tokových vlastností a vznik vad na finálním výrobku. Proto musí být dutina formy zaplněna dříve, než začnou vulkanizovat povrchové vrstvy.

U analýz, které se zabývaly vlivem tvaru kanálu na koncové vlastnosti, byly vybrány trajektorie typu rovný kanál, křivka a zig – zag. Předpokládaná tendence byla opět stejná a to, že čím je vyšší odpor proti toku, rychleji klesá tlak v kanále, materiál pomaleji teče, má vyšší čas k získání tepla od stěny formy, dutina je zaplněna materiálem o vyšší teplotě a tím se zkrátí čas působení vulkanizace k získání 90% příčných vazeb (optima vulkanizace). V tomto případě tomu tak nebylo. Čas potřebný na dosažení optima vulkanizace byl nejdelší pro kanál zig-zag, poté pro rovný kanál a nakonec pro kanál křivku. Předpoklad byl rovný kanál, křivka a zig-zag. U této úlohy byla délka dráhy, kterou musí materiál protéct, byla u všech drah stejná. Z této úlohy lze usoudit, že počítačové analýzy nedokáží kalkulovat se změnou tvaru vtokového kanálu. Uvedená předpokládaná tendence se potvrdila v praktickém měření.

Z výsledků tokových analýz je patrné, že délka i tloušťka vtokových trajektorií ovlivňují teplotu i tlak v dutině formy i ve vtokových kanálech. Tyto změny mají vliv i na koncové vlastnosti výrobku, jako je pevnost a tvrdost. Z naměřených hodnot vyplývá, že díky úzkému kanálu může být zkrácena doba dosažení optima vulkanizace oproti širokému kanálu. Větší vliv na snížení času cyklu má délka kanálu. Čím déle je materiál ohříván ve vtokových kanálech, tím méně potřebuje na ohřátí v dutině formy.

Pomocí výstupů z tokových analýz byla navrhnutá, zkonstruována a vyrobena testovací forma pro vstřikování pro stroj REP V27 Y125 s deseti tvarovými deskami (6 pro tlustostěnné výrobky a 4 pro tenkostěnné výrobky), které jsou navrhnuty tak, aby mohly být lehce vyměněny. Mimo tvaru trajektorie byly také měněny parametry nastavení vstřikovacího procesu, jako je teplota formy a rychlost vstřikování, které mají významný vliv na zkrácení vstřikovacího cyklu výrobku z pryže.

Bylo zjištěno, že délka setrvání ve vtokových kanálech má rozhodující vliv na výslednou tvrdost vulkanizátu, tedy i na stupeň vulkanizace. Porovnáním širokého a úzkého průřezu při rovném 100 mm kanále je vidět, že dosažená tvrdost je při použití úzkého průřezu více homogenní, vznikly menší rozdíly mezi povrchem a středem vyrobené kostky (100 mm, procesní podmínky A3, $\Delta_{vrstva\ 1/4} = 10,7\ ^\circ IRHD$; 100 mm, procesní podmínky A6, $\Delta_{vrstva\ 1/4} = 7\ ^\circ IRHD$). Při použití 200 mm dlouhého rozvodného kanálu (kanál křivka) plocha průřezu nehraje tak významnou roli jako v předcházejícím případě, protože materiál

ve vtokovém systému setrval dostatečně dlouho, aby teplotní pole u obou průřezů byla velmi podobná (*200 mm křivka*, procesní podmínky *B3*, $\Delta_{vrstva\ 1/4} = 6,2$ °IRHD; *200 mm křivka*, procesní podmínky *B6*, $\Delta_{vrstva\ 1/4} = 5,8$ °IRHD). Při měření tvrdosti širokých průřezů u kanálu zig – zag 200 mm byl viděn ještě menší rozdíl než u 200 mm kanálu křivka (*zig - zag*, procesní podmínky *C3*, $\Delta_{vrstva\ 1/4} = 1,8$ °IRHD).

Výsledky z měření tvrdosti IRHD pro tlustostěnná tělesa byla podpořena měřením i pro tenkostěnná tělesa. Zde byla využita tahová zkouška a strukturní tahová zkouška. Z výsledků vyplývá opět předpokládaná tendence. Pokud je materiál déle ohříván (probíhá u něj déle vulkanizace), dosáhne větší meze pevnosti i jednotlivých modulů pružnosti, naopak klesá poměrné prodloužení na mezi pevnosti. Je nutné zde podotknout, že nastavení doby vulkanizace nikdy nebylo tak velké, aby došlo k reverzi. Hodnoty ukazují stejnou závislost i při strukturní zkoušce. Při nastavení A1 – A4 je vidět, že pevnost, tedy i stupeň vulkanizace, roste s delším vtokovým kanálem i užším průřezem. Největší pevnost i modul pružnosti při 300% protažení je u čtvrtého kanálu, což je dlouhý kanál s úzkým průřezem. Naopak poměrné prodloužení je zde nejnižší. Při zvýšení teploty stěny formy, či při zvýšení doby ohřevu (nastavení B i C) je vidět, že modul $E_{300\%}$ má vždy vyšší hodnotu u delších trajektorií a také nižší hodnotu poměrného prodloužení na mezi pevnosti. Hodnoty meze pevnosti v tahu u nastavení B i C se pohybovaly v rámci chyby měření.

Z praktických zkušeností zjištěných během studia problematiky doporučuji pokračovat ve výzkumu a zjistit ovlivnění koncových vlastností změnou délky a velikosti dotlaku. U této práce dotlak nebyl do výpočtů ani do praktického experimentu zahrnut. Tlak má velký vliv na průběh vulkanizace. U použití různých vtokových kanálů během výzkumu byl také různý tlakový poměr ve formě. Myslím si, že správně použitý dotlak může velkým významem ovlivnit koncové vlastnosti výrobku. Při zvolení správné kombinace vtokového kanálu a správného dotlaku by mohlo být dosaženo výraznějších výsledků. Pro další pokračování výzkumu doporučuji použít vstřikovací stroj vyšší řady, zejména stroj se silnější vstřikovací jednotkou, který je schopný vygenerovat větší tlak.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Abdulrahman El Labban, Pierre Mousseau, Rémi Deterre, Jean-Luc Bailloul, Alain Sarda, *Temperature measurement and control within moulded rubber during vulcanization process*, Measurement, Volume 42, Issue 6, July 2009, Pages 916-926, ISSN 0263-2241, 10.1016/j.measurement.2009.01.016.
- [2] A.I. Isayev, 11 - *Injection Molding of Rubbers*, In: Editor-in-Chief: Sir Geoffrey Allen, Editor(s)-in-Chief, Comprehensive Polymer Science and Supplements, Pergamon, Amsterdam, 1989, Pages 355-378, ISBN 9780080967011, 10.1016/B978-0-08-096701-1.00214-7.
- [3] António M. Cunha, António J. Pontes, *Non-Conventional Injection Molds*, In: Musa R. Kamal, Avram L. Isayev and Shih-Jung Liu, Editor(s), Injection Molding, Hanser, 2009, Pages 171-194, ISBN 9783446416857, 10.3139/9783446433731.004.
- [4] ALGER, Mark S. *Polymer science dictionary*. London: Elsevier Applied Science, 1989, xii, 532 s. ISBN 1-85166-220-0.
- [5] Arrillaga, A., A.M. Zaldua, R.M. Atxurra, A.S. Farid, *Techniques used for determining cure kinetics of rubber compounds*, European Polymer Journal, Volume 43, Issue 11, November 2007, Pages 4783-4799, ISSN 0014-3057, 10.1016/j.eurpolymj.2007.08.024.
- [6] Arrillaga, A., Zaldua, A. M. and Farid, A. S. (2012), *Evaluation of injection-molding simulation tools to model the cure kinetics of rubbers*. J. Appl. Polym. Sci., 123: 1437–1454. doi: 10.1002/app.33880
- [7] BEAUMONT, John P. *Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding*. 1st ed. Cincinnati: Hanser Gardner Publications [distributor], c2004, xvi, 286 p. ISBN 34-462-2672-9.
- [8] BEAUMONT, John P, R NAGEL a R SHERMAN. *Successful injection molding: process, design, and simulation*. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, c2002, xiii, 362 p., 1CD. ISBN 3-446-19433-9, ISBN 15-699-0291-7.
- [9] BROWN, Roger. *Physical testing of rubber*. 4th ed. New York, NY: Springer, 2006, viii, 387 s. ISBN 0387282866.
- [10] BOBČÍK, L. a kol. *Formy pro zpracování plastů I.díl – Vstřikování termoplastů*, 2. vyd. Brno : UNIPLAST, 1999. 134 s.
- [11] BOBČÍK, L. a kol. *Formy pro zpracování plastů II.díl – Vstřikování termoplastů*, 2. vyd. Brno : UNIPLAST, 1999. 212 s.
- [12] 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.
- [13] 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.

- [14] 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.
- [15] DICK, John S. *Basic rubber testing: selecting methods for a rubber test program*. West Conshohocken, PA: ASTM, c2003, xviii, 236 s. ISBN 0803133588.
- [16] D. Manas, M. Manas, M. Stanek, M. Zaludek, S. Sanda, J. Javorik, V. Pata, "Wear of Multipurpose Tire Treads" *Chemické listy*, Volume 103, 2009, p.72-74.
- [17] DUCHÁČEK V.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. VŠCHT v Praze, 2006. 280 s, ISBN 80-7080-617-6
- [18] DUCHÁČEK, Vratislav a Zdeněk HRDLIČKA. *Gumárenské suroviny a jejich zpracování*. Vyd. 4., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2009, 199 s. ISBN 978-80-7080-713-2.
- [19] DUCHÁČEK, Vratislav. *GUMÁRENSKÉ ZPRACOVATELSKÉ PŘÍŠADY*. Zlín: GUMÁRENSKÁ SKUPINA ZLÍN, 2008.
- [20] DVOŘÁK, Zdeněk a Jakub JAVOŘÍK. *Konstrukce výrobků, Konstrukční materiály elastomerní a formy pro jejich výrobu*. Elektronická skripta FT, Zlín, UTB, 20011.
- [21] DVOŘÁK, Zdeněk a Jakub JAVOŘÍK. *ELASTOMERNÍ KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY*. Zlín: GUMÁRENSKÁ SKUPINA ZLÍN, 2009.
- [22] 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.
- [23] GEGECKAITE, Asta. *Handling and assembly of microproducts*: Ph.D. thesis. [1. oplag]. Lyngby: Technical University of Denmark, Department of Manufacturing Engineering and Management, 2007. ISBN 978-878-9502-731.
- [24] 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.
- [25] Hirano, K., Tamura, S. and Kanai, T. (2007), *Striped-pattern deterioration and morphological analysis of injection moldings comprising polypropylene/ethylene α -olefin rubber blends*. I. Influence of ultraviolet irradiation. *J. Appl. Polym. Sci.*, 105: 2416–2426. doi: 10.1002/app.26332
- [26] Hornsby, P. R., Singh, I., Daley, J. R. and Firth, J. (2006), *Characterization of mold fouling during elastomer injection molding*. *J. Appl. Polym. Sci.*, 102: 3186–3194. doi: 10.1002/app.24450
- [27] HUBA, Jakub. *Mechanické vlastnosti výrobků vstříkovaných z pryže*. Zlín, 2013. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Kamil Kyas.

- [28] JOHNSON, Peter S. *Rubber processing: an introduction*. Cincinnati, OH: Hanser, 2001. ISBN 34-462-1578-6.
- [29] KAMAL, Musa R, Avraam I ISAYEV a Shih-Jung LIU. *Injection molding: technology and fundamentals*. Munich: Hanser, c 2009, xxviii, 926s. ISBN 978-1-56990-434-3.
- [30] Kobayashi, Y., Ando, M. and Kanai, T. (2010), *Microscopic mechanical properties and injection molding-induced morphology on polypropylene rubber blend*. J. Appl. Polym. Sci., 116: 2590–2600. doi: 10.1002/app.31878
- [31] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [32] KOČMAN, Karel. *Speciální technologie: obrábění*. 3. přepr. a dopl. vyd. Brno: CERM, 2004, 227 s. ISBN 80-214-2562-8.
- [33] KOLEKTIV AUTORŮ. *Gumárenska technológia III. prvé*. Púchov: GC TECH Ing. Peter Gerši, apríl 2005. ISBN 80-969189-1-5.
- [34] 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.
- [35] Kyas, Kamil, Michal STANEK, David MANAS a Adam SKROBAK. Effect of Rheological Parameters on Curing Rate during NBR Injection Molding. In: EDITOR, Martin Zatloukal a Anton Paar SPONSORING ORGANIZATIONS. *Novel trends in rheology V Zlín, Czech Republic, 30-31 July 2013*. Melville, N.Y: American Institute of Physics, s. 142-147. ISBN 9780735411517.
- [36] LIMPER, Andreas. *Mixing of rubber compounds*. Munich: Hanser Publishers, c2012, xi, 239 s. ISBN 978-3-446-41743-4.
- [37] MAŇAS, Miroslav, František TOMIS a Josef HELŠTÝN. *Výrobní stroje a zařízení: gumárenské a plastikářské stroje*. Brno: VUT, 1990, 199 s. ISBN 802140213x.
- [38] MARK, James E a Burak ERMAN. *Science and technology of rubber*: 3rd ed. Boston: Elsevier Academic Press, 2005, xviii, 743 p. ISBN 01-246-4786-3.
- [39] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. *Fyzika polymerů: struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 306 s.
- [40] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. Přeprac. Vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 8085920727.
- [41] Nakason C, A Kaesaman, Z Samoh, S Homsin, S Kiatkamjornwong, *Rheological properties of maleated natural rubber and natural rubber blends*, Polymer Testing, Volume 21, Issue 4, 2002, Pages 449-455

- [42] OSSWALD, Tim A, Lih-Sheng TURNG a Paul J GRAMANN. Injection molding handbook. 2nd ed. Munich: Carl Hanser Publishers, c2008,xvii, 764 s. ISBN 978-1-56990-420-6.
- [43] PYE, R. *Injection mould design: for thermoplastics*. 1st ed. London: Iliffe Books, 1968, 417 s.
- [44] RAGAN, Emil, Juraj RUZBARSKY a Miroslav MANAS. *Vstrekovanie a spracovanie plastických hmôt*. Prešov: Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, 2008. ISBN 978-80-553-0102-0.
- [45] RAPHAEL, B a Ian F SMITH. *Fundamentals of computer-aided engineering*. Hoboken, NJ: Wiley, 2003, xvii, 306 p. ISBN 04-714-8715-5.
- [46] RŮŽIČKA, Karel a Ladislav POSPÍŠIL. *Směrnice pro konstrukci vstřikovacích forem I*. Gottwaldov: VÚGPT, 1979, 202 s.
- [47] SADÍLEK, Marek. *CAM systémy v obrábění I. 2.*, dopl. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 80-248-2278-4.
- [48] SCHÄTZ, Miroslav a Petr VONDRÁČEK. *Zkoušení polymerů. 2.*, přepr. a dopl. vyd. Praha: VŠCHT, 1988, 276 s.
- [49] SMID, Peter. *CNC programming handbook: a comprehensive guide to practical CNC programming*. 2nd ed. New York: Industrial Press, 2003, xx, 508 s. ISBN 08-311-3158-6.
- [50] SOMMER, John G. *Elastomer molding technology: a comprehensive and unified approach to materials, methods, and mold design for elastomers*. Hudson, OH: Elastech, 2003, vi, 471 p. ISBN 09-723-0910-1.
- [51] SOMMER, John G. *Engineered Rubber Products*. Hudson: OH, 2009. ISBN 1-56990-433-6.
- [52] STANĚK, M., GABRIEL, J. Vstřikování plastů - simulace procesu a vstupní data pro simulaci s využitím softwaru Cadmould Rubber. *Mezinárodní Gumárenské Symposium*. 2007. č. 11. 9 s.
- [53] Stanek, M., D. Manas, M. Manas, J. Javorik, "Simulation of Injection Molding Process by Cadmould Rubber", International Journal of Mathematics and Computers in Simulation, Volume 5, Issue 5, 2011, p. 422-429
- [54] Stanek, M., D. Manas, M. Manas, O. Suba, "Optimization of Injection Molding Process", International Journal of Mathematics and Computers in Simulation, Volume 5, Issue 5, 2011, p. 413-421
- [55] STANĚK, Michal. *Modelování procesu tváření polymerů, včetně technologického řešení nástrojů: Modeling of polymers forming process inc. tools design* : zkrácená verze Ph.D. Thesis. Brno: VUT FSI, 2005, 27 s. ISBN 80-214-3025-7.
- [56] SANDA, Stepan, Miroslav MANAS, David MANAS, Michal STANEK a Vojtech Senkerik. *Gate effect on quality of inected part*. Chemické listy. Česká společnost chemická, 2011, roč. 105 (S), č. Symposia, s. 301-202. ISSN 0009-2770.
- [57] ŠPAČEK, Josef. *Technologie gumárenská a plastikářská II. 2. nezměň.vyd.* Brno: VUT, 1987, 200 s.

- [58] ŠANDA, Štěpán. *Vliv vlastností polymerů a kvality tokových kanálů na zatékavost taveniny*. Zlín, 2012. Disertační. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Miroslav Maňas.
- [59] ŠŮLA, Miroslav. SPOJENÍ PRYŽE S KOVEM. Zlín: GUMÁRENSKÁ SKUPINA ZLÍN, 2007.
- [60] TOMIS, F.,. Gumárenská a plastikářská technologie, *Zpracovatelské procesy*. 2. vyd. Brno : VUT, 1987. 289 s.
- [61] TOMIS, František a František RULÍK. *Gumárenské a plastikářské stroje*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981, 216 s.
- [62] VLČEK, Jiří a Miroslav MAŇAS. *Aplikovaná reologie*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2001, 144 s. ISBN 8073180391.
- [63] WEIN, Ondřej. *Úvod do reologie*. 1. vyd. Brno: VUT, 1996, 84 s.
- [64] 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
- [65] ZHENG, Rong, Roger I. TANNER a Xi-Jun FAN. *Injection molding: integration of theory and modeling methods*. Heidelberg: Springer, c2011, xii, 188 s. ISBN 978-3-642-21262-8.

SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

- Časopisy zahraniční – 13 záznamů v databázi SCOPUS k 22. 1. 2014**
1. **Kyas, K.**, Stanek, M., Manas, M., Manas, D., Cerny, J., Krumal, M., Holik, Z., Simulation of Rubber Injection Molding Process. *Chem. Listy 105, s233-s416 (2011)*, ISSN 0009-2770.
 2. **Kyas, K.**, Pata, V., Stanek, M., Bednarik, M., Mizera, A., Navratil, J., Temperature Influence of Rubber Testing Samples During its Preparation. *Chem. Listy 107, s59-s61 (2013)*, ISSN 0009-2770.
 3. Bednarik, M., Manas, D., Manas, M., Navratil, J., Ovsík M., **Kyas, K.**, Mizera, A., Strength of Bonded Joints of LDPE Aftersurface Treatment Beta Radiation. *Chem. Listy 107, s103-s105 (2013)*, ISSN 0009-2770.
 4. Mizera, A., Manas, M., Manas, D., **Kyas, K.**, Navratil, J., Bednarik, M., Temperature Stability of Modifier TPE-E by Radiation Cross-linking. *Chem. Listy 107, s152-s155 (2013)*, ISSN 0009-2770.
 5. Navratil, J., Manas, M., Stanek, M., Bednarik, M., Mizera, A., **Kyas, K.**, Recycling of Irradiated HDPE – Influence on Material Hardness. *Chem. Listy 107, s155-s157 (2013)*, ISSN 0009-2770.
 6. Skrobak, A., Stanek, M., Manas, D., Manas, M., Senkerik, V., **Kyas, K.**, Influence of Production Process on Mechanical Properties of Rubber Samples. *Chem. Listy 107, s178-s180 (2013)*, ISSN 0009-2770.
 7. Holik, Z., Danek, M., Manas, M., Lamborova, R., Cerny, J., **Kyas, K.**, Krumal, M., Malachova, M. Effect of radiation cross-linking on mechanical properties of selected types of polymer. *Chem. Listy 105, s233-s416 (2011)*, ISSN 0009-2770.
 8. **Kyas, K.**, Stanek, M., Navratil, J., Manas, M., Manas, D., Senkerik, V., & Skrobak, A. (2013). Rubber product properties influenced by runners trajectory. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, Volume 7, Issue 1, 2012, p. 1-8, ISSN 1998-0159.
 9. Stanek, M., Manas, D., Manas, M., Navratil, J., **Kyas, K.**, Senkerik, V., & Skrobak, A. (2012). Comparison of different rapid prototyping methods. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, Volume 6, Issue 6, 2012, p. 550-557, ISSN 1998-0159.
 10. **Kyas, K.**, Cerny, J., Stanek, M., Manas, M., Manas, D., Senkerik, V., & Skrobak, A. (2012). Measuring of temperature and pressure in injection mold. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, Volume 6, Issue 6, 2012, p. 600-607, ISSN 1998-0159.
 11. Stanek, M., Manas, D., Manas, M., **Kyas, K.**, Senkerik, V., Skrobak, A., & Navratil, J. (2012). Polymer fluidity influenced by the percentage of filler. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, Volume 6, Issue 6, 2012, p. 542-549, ISSN 1998-0159.
 12. Ovsík, M., Manas, D., Manas, M., Stanek, M., **Kyas, K.**, Bednarik, M., Mizera, A. "Microhardness of HDPE influenced by Beta Irradiation", In-

- ternational Journal of Mathematics and Computers in Simulation, Volume 6, Issue 6, 2012, p. 566-574, ISSN 1998-0159.
13. Ovsik, M., Manas, D., Manas, M., Stanek, M., Sanda, S., **Kyas, K.**, Reznicek, M. "Microhardness of PA6 Influenced by Beta Low Irradiation Doses", *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, Volume 6, Issue 6, 2012, p. 575-583, ISSN 1998-0159.
 14. SKROBAK, A. – STANEK, M. – **KYAS, K.** – MANAS, D. – MANAS, M. – REZNICEK, M. – SENKERIK, V.: Comparison of Mechanical Properties of Injection Molded and Compression Molded Rubber Samples, *International Journal of Mechanics*, Volume 7, Issue 4, 2013, pp. 409-416, ISSN 1998-4448
 15. NAVRATIL, J. – STANEK, M. – MANAS, M. – MANAS, D. – **KYAS, K.** – SKROBAK, A. SENKERIK, V.: Tensile Toughness of Irradiated HDPE, *International Journal of Mechanics*, Volume 7, Issue 3, 2013, pp. 337-334, ISSN 1998-4448
 16. STANEK, M. – MANAS, D. – MANAS, M. – **KYAS, K.** – SENKERIK, V. – SKROBAK, A. – NAVRATIL, J.: How amount of talc influence the polymer flow, *International Journal of Mechanics*, Volume 7, Issue 3, 2013, pp. 277-284, ISSN 1998-4448
 17. **KYAS, K.** – STANEK, M. – SKROBAK, A. – MANAS, M. – MANAS, D. – REZNICEK, M. – SENKERIK, V.: Influence of Runner Section on Curing Rate During Injection Molding of NBR Compound, *International Journal of Mechanics*, Volume 7, Issue 3, 2013, pp. 242-250, ISSN 1998-4448
 18. KRATKY, P. – MANAS, D. – MANAS, M. – STANEK, M. – OVSIK, M. – **KYAS, K.** – REZNICEK, M.: Mechanical Properties of Irradiated PA11, *International Journal of Mechanics*, 2014, ISSN 1998-4448
 19. KRATKY, P. – MANAS, D. – MANAS, M. – STANEK, M. – OVSIK, M. – **KYAS, K.** – NAVRATIL, J.: Mechanical Properties of Irradiated PMMA, *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 2014, ISSN 1998-0140
 20. NAVRATIL, J. – STANEK, M. – MANAS, M. – MANAS, D. – **KYAS, K.** – SKROBAK, A. – SENKERIK, V.: Recyclation of Modified HDPE, *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, 2014, ISSN 2074-1308
 21. NAVRATIL, J. – STANEK, M. – MANAS, M. – MANAS, D. – **KYAS, K.** – SKROBAK, A. – SENKERIK, V.: Mechanical Properties of Recycled Irradiated HDPE, *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, 2014, ISSN 2074-1308
 22. STANEK, M. – MANAS, D. – MANAS, M. – **KYAS, K.** – SENKERIK, V. – SKROBAK, A. – NAVRATIL, J.: Injection Molding of Rubber Compound Influenced by Surface Roughness, *International Journal of Materials*, 2014

23. **KYAS, K.** – STANEK, M. – MANAS, M. – MANAS, D. – SKROBAK, A. – NAVRATIL, J. – SENKERIK, V.: Effect of Index of non-Newtonian Behavior on Curing Rate during Injection Molding of Rubber Compound, *International Journal of Materials*, 2014
24. REZNICEK, M. – MANAS, D. – PATA, V. – STANEK, M. – **KYAS, K.** – SKROBAK, A. – SENKERIK, V.: Construction of Equipment for Creep Behavior Study, *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, 2014, ISSN 2074-1308

Časopisy tuzemské

25. **KYAS, K.** – MANAS, M. – STANEK, M. – CERNY, J. – SENKERIK, V.: Rubber Injection Moulding in Progress, *Plasty a Kaučuk – Speciál* 49, ISSN 0322-7340, pp. 18-20, 2012
26. CERNY, J. – HOLIK, Z. – **KYAS, K.** – NAVRATIL, J.: Modern Methods of Design of Ergonomics Parts, *Plasty a Kaučuk – Speciál* 49, ISSN 0322-7340, pp. 6-8, 2012

Konference evidované v databázi Web of Science

27. **KYAS, K.**, Kamil, Michal STANEK, David MANAS a Adam SKROBAK. Effect of Rheological Parameters on Curing Rate during NBR Injection Molding. In: EDITOR, Martin Zatloukal a Anton Paar SPONSORING ORGANIZATIONS. *Novel trends in rheology V Zlín, Czech Republic, 30-31 July 2013*. Melville, N.Y: American Institute of Physics, s. 142-147. ISBN 9780735411517.

Konference mezinárodní

28. **Kyas, K.** – Stanek, M. – Manas, M. – Manas, D. – Cerny, J. – Skrobak, A.: Non-contact Method of Part Surface Scanning, *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium, 23-26th November 2011*, Vienna, Austria, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-83-4, p. 0735-0736, Published by DAAAM International Vienna, Vienna
29. **Kyas, K.** – Stanek, M. – Manas, D. – Manas, M. – Ovsik, M. – Skrobak, A. – Krumal, M.: Thermal Effects on Steels at Plasma Cutting, *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium, 23-26th November 2011*, Vienna, Austria, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-83-4, p. 0737-0738, Published by DAAAM International Vienna, Vienna
30. **Kyas, K.** – Stanek, M. – Manas, M. – Manas, D. – Navratil, J. – Senkerik, V.: Influence of Runner System Design on Molding Process, *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International*

- DAAAM Symposium, 23-26th November 2011, Vienna, Austria, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-83-4, p. 0733-0734, Published by DAAAM International Vienna, Vienna*
31. **Kyas, K.**; Stanek, M.; Manas, M.; Manas, D.; Krumal, M. & Cerny, J. (2010). Polymer Injection Molding Process Simulation, *Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium, 20-23rd October 2010, Zadar, Croatia, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-73-5, Katalinic, B. (Ed.), pp. 1081-1082, Published by DAAAM International Vienna, Vienna*
 32. Stanek, M. – Manas, M. – Manas, D. – **Kyas, K.** – Pata, V. – Senkerik, V.: Rapid Prototyping the Fast Tool for Model Production, *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium, 23-26th November 2011, Vienna, Austria, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-83-4, p. 0157-0158, Published by DAAAM International Vienna, Vienna*
 33. Krumal, M.; Stanek, M.; Manas, M.; Manas, D.; **Kyas, K.** & Cerny, J. (2010). Fluidity of Thermoplastic Elastomers, *Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium, 20-23rd October 2010, Zadar, Croatia, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-73-5, Katalinic, B. (Ed.), pp. 1185-1186, Published by DAAAM International Vienna, Vienna*
 34. Cerny, J.; **Kyas, K.**; Krumal, M.; Manas, D.; Manas, M. & Stanek, M. (2010). Wear Process of Tires, *Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium, 20-23rd October 2010, Zadar, Croatia, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-73-5, Katalinic, B. (Ed.), pp. 1189-1190, Published by DAAAM International Vienna, Vienna*
 35. Holik, Z.; **Kyas, K.**; Krumal, M.; Cerny, J. & Danek, M. (2010). Improvement of Polypropylene Properties, *Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium, 20-23rd October 2010, Zadar, Croatia, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-73-5, Katalinic, B. (Ed.), pp. 1191-1192, Published by DAAAM International Vienna, Vienna*
 36. Stanek, M. – Manas, M. – Manas, D. – **Kyas, K.** – Navratil, J. – Senkerik, V.: Injection Molding Process and Its Optimization, *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium, 23-26th November 2011, Vienna, Austria, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-83-4, p. 0155-0156, Published by DAAAM International Vienna, Vienna*
 37. **Kyas, K.**, Cerny, J., Stanek, M., Manas, M., Manas, D., Senkerik, V., Skrobak, A., “Utilization of Temperature and Pressure Sensor in Injection mold” in *Proc. 16th WSEAS International Conference on Circuits & Systems, Kos Island, Greece, 2012, pp. 307-310. ISBN 978-1-61804-108-1.*

38. **Kyas, K.**, Stanek, M., Navratil, J., Manas, M., Manas, D., Senkerik, V., Skrobak, A., "Influence of Runners Trajectory on Rubber Product Properties" in *Proc. 16th WSEAS International Conference on Circuits & Systems, Kos Island, Greece, 2012, pp. 317-320*. ISBN 978-1-61804-108-1.
39. Ovsik, M., Manas, D., Manas, M., Stanek, M., Sanda, S., **Kyas, K.**, Reznicek, M., "Effect of Beta Irradiation on the Microhardness of PA6," in *Proc. 16th WSEAS International Conference on Circuits & Systems, Kos Island, Greece, 2012, pp. 289-293*. ISBN 978-1-61804-108-1.
40. Ovsik, M., Manas, D., Manas, M., Stanek, M., **Kyas, K.**, Bednarik, M., Mizera A., "Effect of Beta Irradiation on the Microhardness of HDPE," in *Proc. 16th WSEAS International Conference on Circuits & Systems, Kos Island, Greece, 2012, pp. 285-288*. ISBN 978-1-61804-108-1.
41. Stanek, M., Manas, D., Manas, M., **Kyas, K.**, Senkerik, V., Skrobak, A., Bednarik, M., "Fluidity of Polymer Influenced by the Amount of Filler," in *Proc. 16th WSEAS International Conference on Circuits & Systems, Kos Island, Greece, 2012, pp. 264-268*. ISBN 978-1-61804-108-1.
42. Stanek, M., Manas, D., Manas, M., Navratil, J., **Kyas, K.**, Senkerik, V., Skrobak, A., "Rapid Prototyping Methods Comparison," in *Proc. 16th WSEAS International Conference on Circuits & Systems, Kos Island, Greece, 2012, pp. 269-272*. ISBN 978-1-61804-108-1.
43. **KYAS, K.** – STANEK, M. – SKROBAK, A. – MANAS, M. – MANAS, D. – REZNICEK, M.: Effect of Type of Runner on Curing Rate during Injection Molding of Rubber Compound, *Recent Advances in Systems Science – Proceedings of the 17th International Conference on Systems, 16 – 19th July 2013, Rhodes Island, Greece, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-314-8, Zak, A., Mladenov, V., Yordanova, S., Tashev, T. (Ed.), pp. 221-224, Published by WSEAS Press, Rhodes Island, Greece, EU, 2013*
44. STANEK, M. – MANAS, D. – MANAS, M. – **KYAS, K.** – SENKERIK, V. – SKROBAK, A. – NAVRATIL, J.: Polymer Fluidity Influenced by Amount of Talc, *Recent Advances in Systems Science – Proceedings of the 17th International Conference on Systems, 16 – 19th July 2013, Rhodes Island, Greece, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-314-8, Zak, A., Mladenov, V., Yordanova, S., Tashev, T. (Ed.), pp. 186-200, Published by WSEAS Press, Rhodes Island, Greece, EU, 2013*
45. NAVRATIL, J. – STANEK, M. – MANAS, M. – MANAS, D. – **KYAS, K.** – SKROBAK, A. – SENKERIK, V.: Recyclation of Irradiated HDPE – Influence on Tensile Toughness, *Recent Advances in Systems Science – Proceedings of the 17th International Conference on Systems, 16 – 19th July 2013, Rhodes Island, Greece, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-314-8, Zak, A., Mladenov, V., Yordanova, S., Tashev, T. (Ed.), pp. 186-189, Published by WSEAS Press, Rhodes Island, Greece, EU, 2013*

46. SKROBAK, A. – STANEK, M. – **KYAS, K.** – MANAS, D. – MANAS, M. – REZNICEK, M.: Mechanical Properties of Injection Molded and Compression Molded Rubber Samples, *Recent Advances in Systems Science – Proceedings of the 17th International Conference on Systems*, 16 – 19th July 2013, Rhodes Island, Greece, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-314-8, Zak, A., Mladenov, V., Yordanova, S., Tashev, T. (Ed.), pp. 217-221, Published by WSEAS Press, Rhodes Island, Greece, EU, 2013
47. STANEK, M. – MANAS, D. – MANAS, M. – **KYAS, K.** – SENKERIK, V. – SKROBAK, A. – NAVRATIL, J.: Rubber Injection Molding Influenced by Mold Surface Roughness, *Recent Advances in Automatic Control, Information and Communications – Proceedings of the 14th International Conference on Automation and Information (ICAI '13) and Proceedings of the 13th International Conference on Applied Informatics nad Communications (AIC '13)*, 6 – 8th August 2013, Valencia, Spain, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-316-2, Zak, A. and Slaby, A. (Ed.), pp. 103-106, Published by WSEAS Press, Valencia, Spain, EU, 2013
48. **KYAS, K.** – STANEK, M. – MANAS, M. – MANAS, D. – SKROBAK, A. – NAVRATIL, J. – SENKERIK, V.: Effect of Index of non-Newtonian Behavior of Rubber Compound on Curing Rate, *Recent Advances in Automatic Control, Information and Communications – Proceedings of the 14th International Conference on Automation and Information (ICAI '13) and Proceedings of the 13th International Conference on Applied Informatics nad Communications (AIC '13)*, 6 – 8th August 2013, Valencia, Spain, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-316-2, Zak, A. and Slaby, A. (Ed.), pp. 107-110, Published by WSEAS Press, Valencia, Spain, EU, 2013
49. NAVRATIL, J. – STANEK, M. – MANAS, M. – MANAS, D. – **KYAS, K.** – SKROBAK, A. – SENKERIK, V.: Recyclation of Irradiated HDPE – Influence on Impact Toughness, *Recent Advances in Automatic Control, Information and Communications – Proceedings of the 14th International Conference on Automation and Information (ICAI '13) and Proceedings of the 13th International Conference on Applied Informatics nad Communications (AIC '13)*, 6 – 8th August 2013, Valencia, Spain, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-316-2, Zak, A. and Slaby, A. (Ed.), pp. 111-114, Published by WSEAS Press, Valencia, Spain, EU, 2013
50. NAVRATIL, J. – STANEK, M. – MANAS, M. – MANAS, D. – **KYAS, K.** – SKROBAK, A. – SENKERIK, V.: Tensile Behavior of Recycled Irradiated HDPE, *Recent Advances in Automatic Control, Information and Communications – Proceedings of the 14th International Conference on Automation and Information (ICAI '13) and Proceedings of the*

- 13th International Conference on Applied Informatics nad Communications (AIC '13)*, 6 – 8th August 2013, Valencia, Spain, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-316-2, Zak, A. and Slaby, A. (Ed.), pp. 115-118, Published by WSEAS Press, Valencia, Spain, EU, 2013
51. KRATKY, P. – MANAS, D. – MANAS, M. – STANEK, M. – OVSIK, M. – **KYAS, K.** – REZNICEK, M.: Nanohardness of polymers (Polyamide 11) , *Recent Advances in Automatic Control, Information and Communications – Proceedings of the 14th International Conference on Automation and Information (ICAI '13) and Proceedings of the 13th International Conference on Applied Informatics nad Communications (AIC '13)*, 6 – 8th August 2013, Valencia, Spain, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-316-2, Zak, A. and Slaby, A. (Ed.), pp. 135-139, Published by WSEAS Press, Valencia, Spain, EU, 2013
 52. KRATKY, P. – MANAS, D. – MANAS, M. – STANEK, M. – OVSIK, M. – **KYAS, K.** – NAVRATIL, J.: Nanohardness of polymers (Polymethyl methacrylate) , *Recent Advances in Automatic Control, Information and Communications – Proceedings of the 14th International Conference on Automation and Information (ICAI '13) and Proceedings of the 13th International Conference on Applied Informatics nad Communications (AIC '13)*, 6 – 8th August 2013, Valencia, Spain, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-316-2, Zak, A. and Slaby, A. (Ed.), pp. 140-144, Published by WSEAS Press, Valencia, Spain, EU, 2013
 53. SENKERIK, V. – STANEK, M. – MANAS, M. – MANAS, D. – SKROBAK, A. – NAVRATIL, J. – **KYAS, K.**: Effect of Preparation of Recycled Material to Mechanical Properties of PC, *Recent Advances in Automatic Control, Information and Communications – Proceedings of the 14th International Conference on Automation and Information (ICAI '13) and Proceedings of the 13th International Conference on Applied Informatics nad Communications (AIC '13)*, 6 – 8th August 2013, Valencia, Spain, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-316-2, Zak, A. and Slaby, A. (Ed.), pp. 154-158, Published by WSEAS Press, Valencia, Spain, EU, 2013
 54. REZNICEK, M. – SENKERIK, V. – SKROBAK, A. – **KYAS, K.** – PATA, V. – MANAS, D. – STANEK, M.: Device for measuring creep at higher temperatures, *Recent Advances in Automatic Control, Information and Communications – Proceedings of the 14th International Conference on Automation and Information (ICAI '13) and Proceedings of the 13th International Conference on Applied Informatics nad Communications (AIC '13)*, 6 – 8th August 2013, Valencia, Spain, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-316-2, Zak, A. and Slaby, A. (Ed.), pp. 159-162, Published by WSEAS Press, Valencia, Spain, EU, 2013
 55. **KYAS, K.**, KRUMAL, M., CERNY, J., LAMBOROVA, R. In Rubber Injection Molding Simulation: *1th International Students Conference*

- Young Technologists Day 2010. 17th – 19th June 2010 Prešov, Slovakia: Technical University of Košice, 2010, p. 53–60. ISBN 978-80-553-0439-7.*
56. LAMBOROVA, R., KYAS, K., KRUMAL, M., CERNY, J. In Possible Method of Recyclation of Crosslinked Polyethylene Irradiated by Beta Radiation: *1th International Students Conference Young Technologists Day 2010. 17th – 19th June 2010 Prešov, Slovakia, Technical University of Košice, 2010, p. 183–190. ISBN 978-80-553-0439-7.*
57. CERNY, J., KRUMAL, M., KYAS, K., LAMBOROVA, R. In Wear of Multipurpose Tires: *1th International Students Conference Young Technologists Day 2010. 17th – 19th June 2010 Prešov, Slovakia: Technical University of Košice, 2010, p. 133–144. ISBN 978-80-553-0439-7.*
58. KRUMAL, M., CERNY, J., MALACHOVA, M., KYAS, K. In Construction Solution of Laboratory Equipment for Dielectric Heating of Rubber: *1th International Students Conference Young Technologists Day 2010. 17th – 19th June 2010 Prešov, Slovakia: Technical University of Košice, 2010, p. 175–182. ISBN 978-80-553-0439-7.*
59. CERNY, J., KYAS, K., KRUMAL, M., LAMBOROVA, R., HOLIK, Z. In Realizace vstřikovacích forem pro studijní účely: *PLASTKO 2010, 13-14. April 2010. Zlín, Czech Republic, 2010, ISBN 978-80-7318-909-9.*
60. KYAS, K., MANAS, M., KRUMAL, M., CERNY, J. In Analýza procesu vstřikování výrobku z elastomerní směsi: *PLASTKO 2010, 13-14. April 2010. Zlín, Czech Republic, 2010, ISBN 978-80-7318-909-9.*
61. KRUMAL, M., CERNY, J., LAMBOROVA, R., KYAS, K. In Konstrukční řešení laboratorního zařízení pro dielektrický ohřev gumárenských směsí: *PLASTKO 2010, 13-14. April 2010. Zlín, Czech Republic, 2010, ISBN 978-80-7318-909-9.*

Užitné vzory

62. **Kyas, K.**, Holík, Z., Černý, J.: Prizmatický svěrák 2012. Užitný vzor ČR 24968. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. 26.02.2013.
63. **Kyas, K.**, Holík, Z., Černý, J.: Zařízení k dělení měkčených a elastických materiálů. 2012. Užitný vzor ČR 24691. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. 10.12.2012.

CURRICULUM VITAE

Osobní údaje

Jméno a příjmení, tituly: Kamil Kyas, Ing.
Datum a místo narození: 28. prosince 1984, Kroměříž
Bydliště: Pačlavice 156, 768 34
Telefon: +420 605 840 121
E-mail: kyas@ft.utb.cz
Státní příslušnost: ČR

Školní vzdělání

9/2009 – dosud UTB ve Zlíně, Fakulta technologická
doktorský studijní program: Procesní inženýrství
studijní obor: Nástroje a Procesy

9/2007 – 6/2009 UTB ve Zlíně, Fakulta technologická
magisterský studijní program: Procesní inženýrství
studijní obor: Konstrukce technologických zařízení

9/2004 – 6/2007 UTB ve Zlíně, Fakulta technologická
bakalářský studijní program: Procesní inženýrství
studijní obor: Technologická zařízení

9/2000 – 6/2004 Střední průmyslová škola Jedovnice
obor: Strojírenství
zaměření: Výpočetní systémy CAD/CAM

Pedagogická činnost

Navrhování prvků a uzlů, Technické kreslení I,
Počítačová podpora konstrukce, CAD I, Jakost a
metrologie, Technická měření,

Zahraníční stáže

5/2008 – 8/2008

Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering, Lyngby, DENMARK, Trainee program.

Tuzemské stáže

1/2013 – 2/2013

Robert Bosch, spol. s r.o. České Budějovice, Trainee program.

Členství

1/2010 – 1/2013

Gumárenská skupina Zlín

Akademický senát Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně (předseda studentské komory AS UTB ve Zlíně a člen legislativní komise)

Znalosti a dovednosti

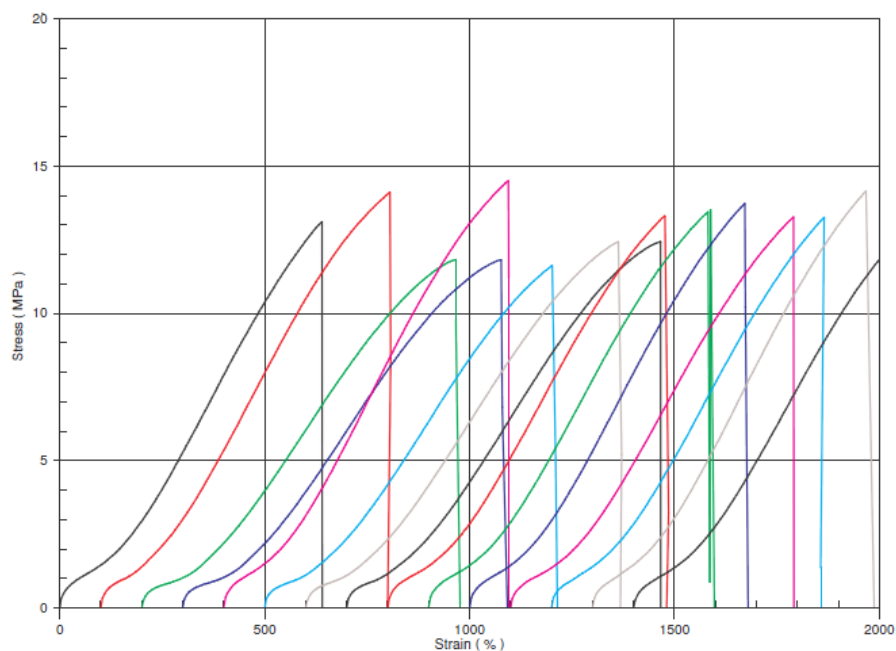
Anglický jazyk – aktivně slovem i písmem, Software (CATIA, NX, Vericut, Solid Edge, Autocad, Moldflow, Cadmould),

SEZNAM PŘÍLOH

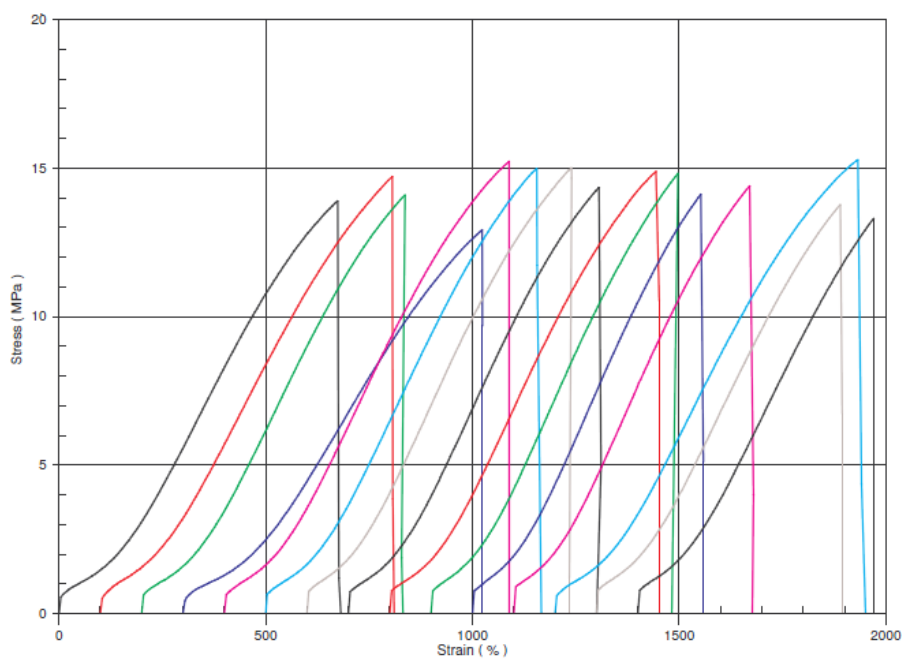
PI: Výsledky z tahových zkoušek pro tenkostěnná tělesa

PŘÍLOHA P I: VÝSLEDKY Z TAHOVÝCH ZKOUŠEK PRO TENKOSTĚNNÁ TĚLESA

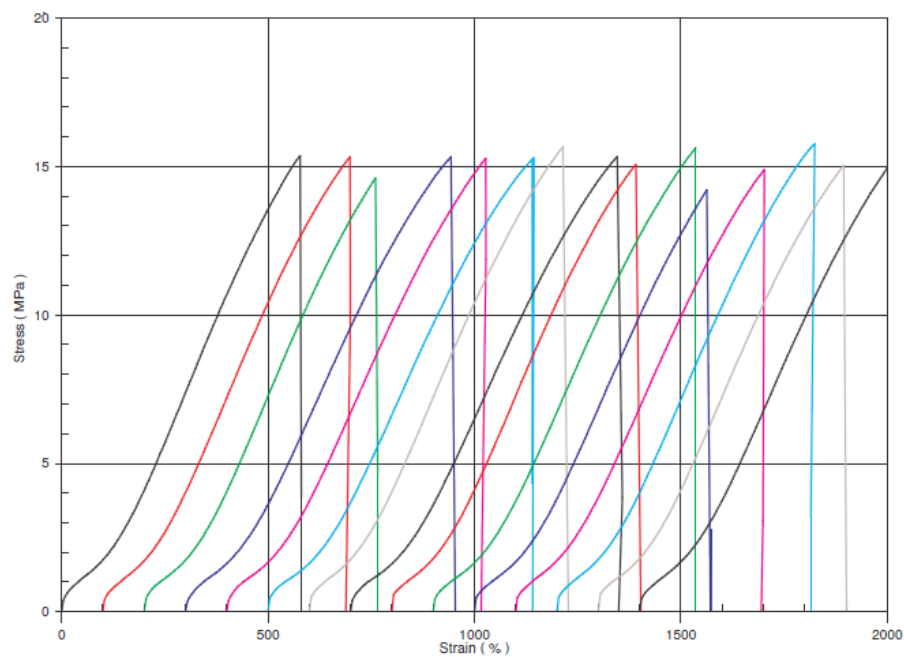
Tahová zkouška pro vzorky A1



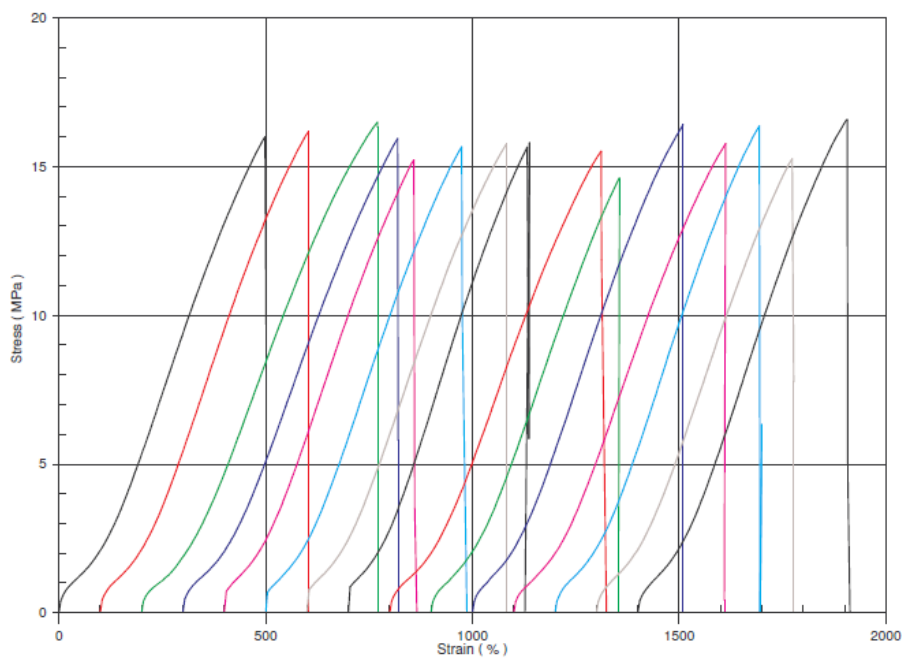
Tahová zkouška pro vzorky A2



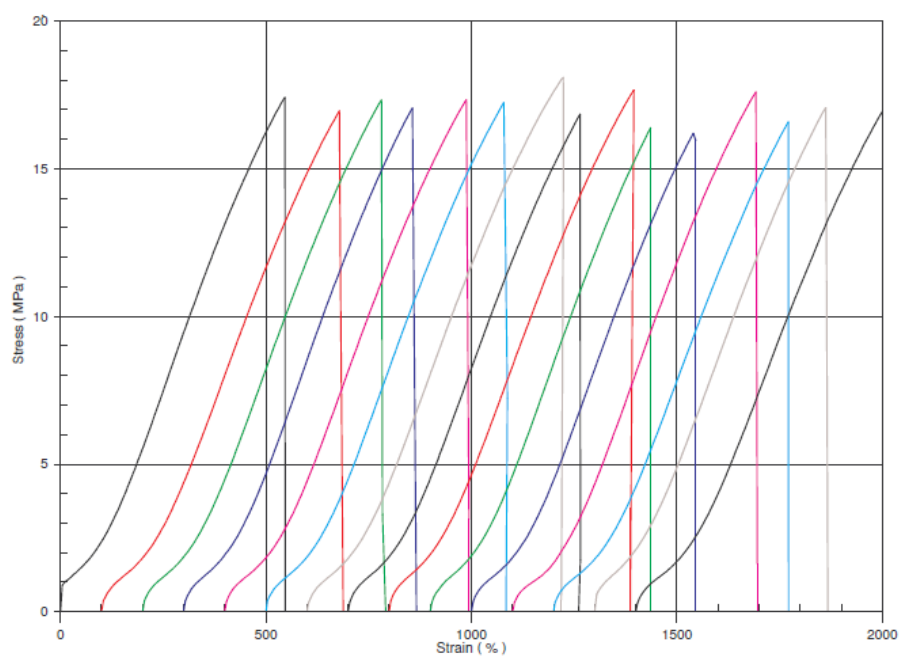
Tahová zkouška pro vzorky A3



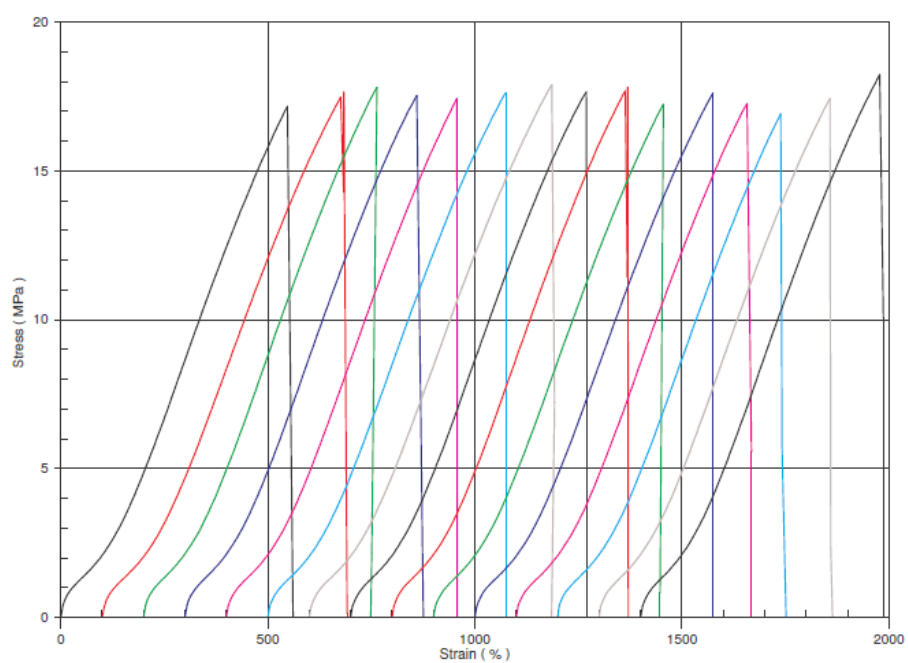
Tahová zkouška pro vzorky A4



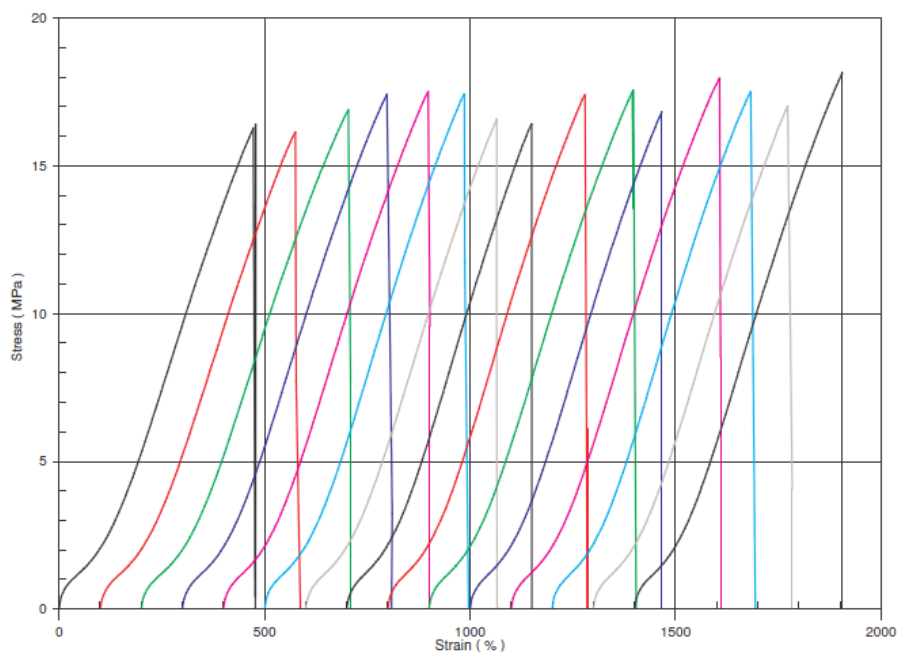
Tahová zkouška pro vzorky B1



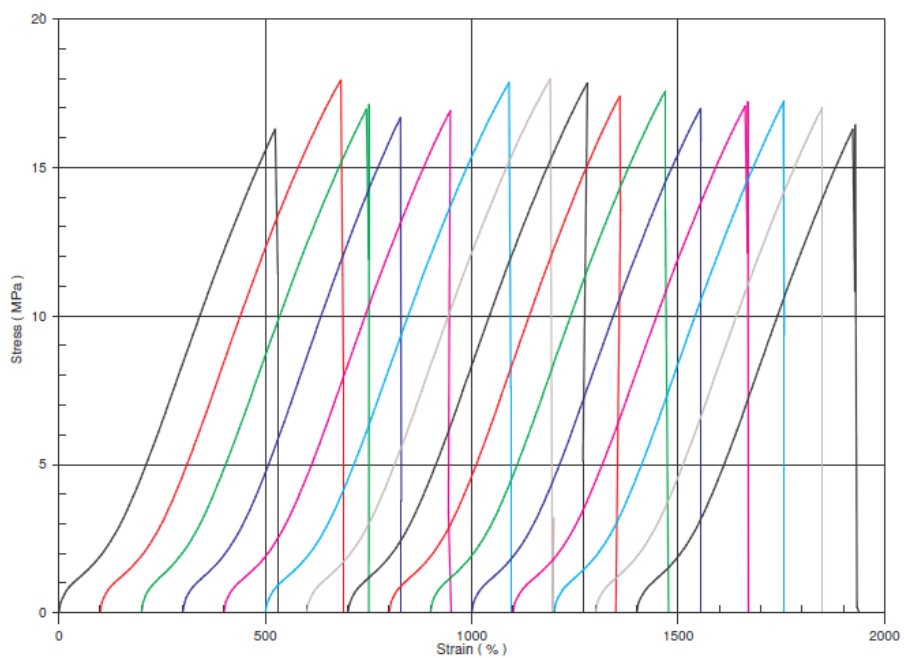
Tahová zkouška pro vzorky B2



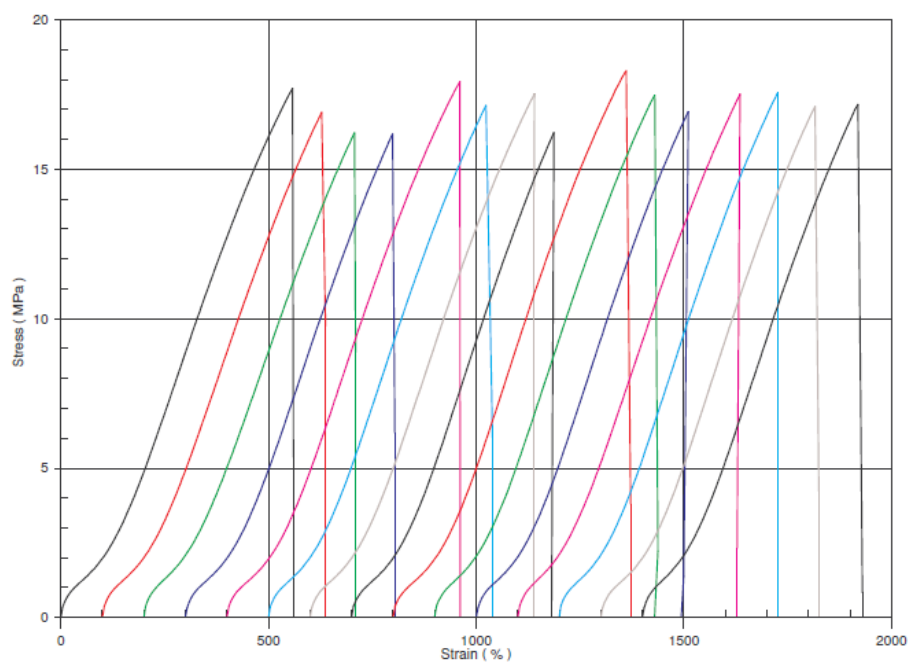
Tahová zkouška pro vzorky B3



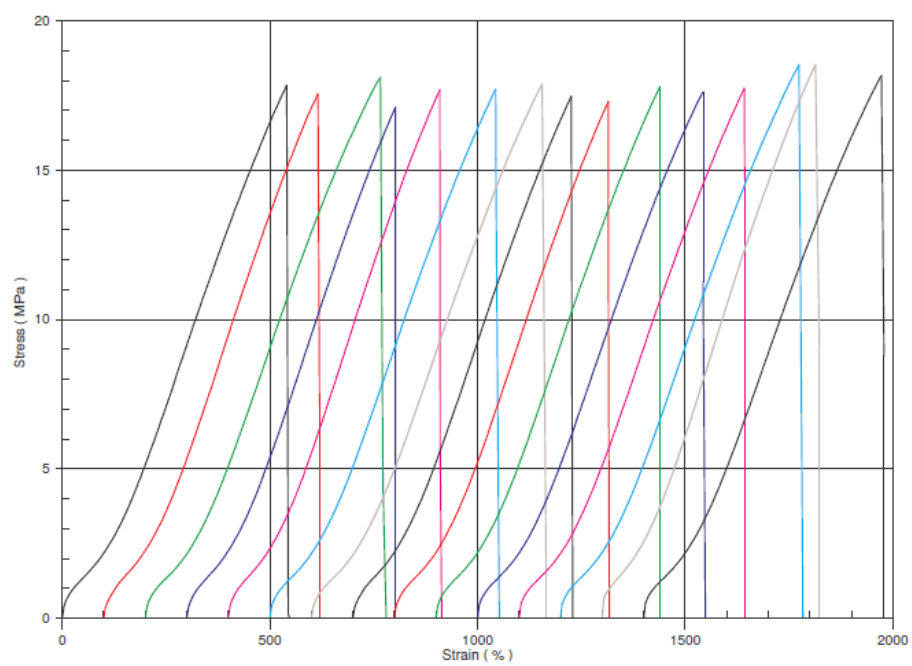
Tahová zkouška pro vzorky B4



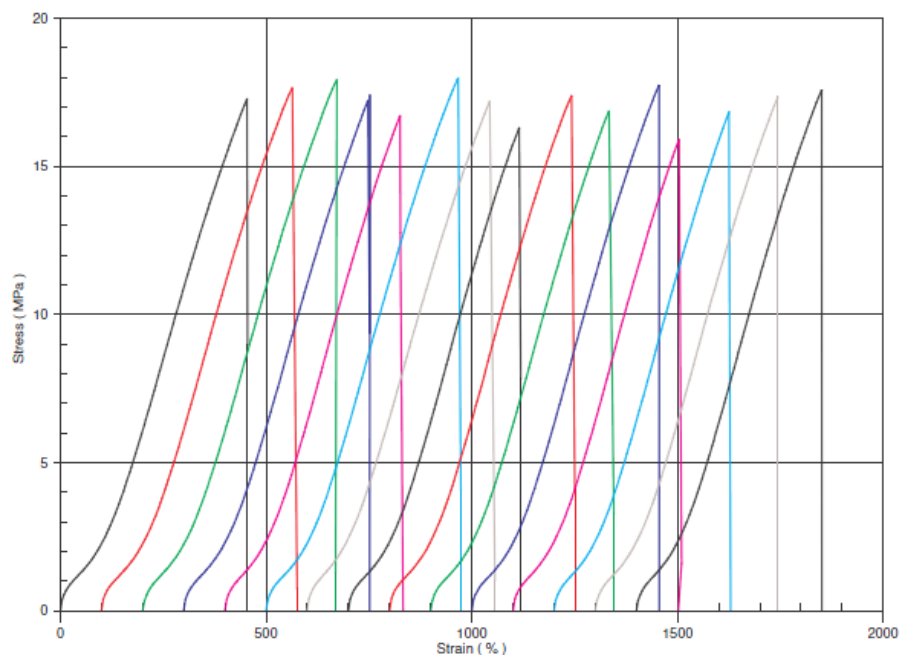
Tahová zkouška pro vzorky C1



Tahová zkouška pro vzorky C2



Tahová zkouška pro vzorky C3



Tahová zkouška pro vzorky C4

