



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Ing. Tomáš Fiala

**Studium vlivu procesních parametrů na tvrdost
vstříkovaných polymerů**

**Study of the influence of process parameters on hardness
of injected polymers**

Disertační práce

Obor: 3909V013 Nástroje a procesy

Školitel: doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.

Konzultant: Ing. Aleš Mizera, Ph.D.; Ing. Martin Ovsík, Ph.D.

Zlín: 2019

Věnování:

Tuto práci bych rád věnoval svému školiteli, příteli, a především skvělému člověku doc. Ing. Davidu Maňasovi, Ph.D., který nás tak náhle opustil, ale v myšlenkách je pořád s námi.

Poděkování:

Srdečně bych chtěl poděkovat svému školiteli doc. Ing. Davidu Maňasovi, Ph.D. a doc. Ing. Miroslavu Maňasovi, CSc. za odborné vedení disertační práce, stejně jako za cenné rady, připomínky a zkušenosti a zároveň za nekonečnou podporu a trpělivost, kterou se mnou měli. Velké poděkování patří i Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. a zejména Ing. Aleši Mizerovi, Ph.D. za konzultace a odbornou, ale i lidskou podporu při měření a vyhodnocování naměřených dat, která vedla ke zkvalitnění disertační práce.

Vám všem velké díky.

ABSTRAKT

Disertační práce se zabývá výzkumem vlastností polymerních materiálů a jejich závislosti na parametrech vstřikovacího procesu. Pro porovnání byly zkoušeny dva komoditní polymery, jako zástupce amorfních materiálů byl vybrán polykarbonát a semikrystalických polyetylen. Pro zkoumání a měření mechanických vlastností a jejich změn byla použita metoda instrumentované vnikací zkoušky tvrdosti (DSI – Depth Sensing Indentation) a morfologie byla zkoumána mikroskopickými metodami. Byly sledovány změny vlastností v závislosti na teplotě taveniny a teplotě formy.

Klíčová slova: Polymery, Instrumentovaná zkouška tvrdosti, Vstřikování, Parametry vstřikování, Mikrotvrdość, Nanotvrdość.

ABSTRACT

The dissertation thesis deals with research of the polymer material properties and their dependence on the parameters of injection process. There were two commodity materials compared in this study. As the amorphous one the polycarbonate and polyethylene as the semicrystalline were selected. For measuring and investigating of mechanical properties and their changes the depth sensing indentation (DSI) method was used. The structure of injected polymers was checked by microscopy methods. There were the property changes based on the melt temperature studied in this thesis.

Keywords: Polymers, Depth Sensing Indentation, Injection molding, Injection parameters, Microhardness, Nanohardness.

OBSAH PRÁCE

SEZNAM ILUSTRACÍ	6
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	13
1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	17
1.1 Vliv procesních parametrů na mechanické vlastnosti vstřikovaných dílů	17
1.2 OPTIMALIZACE VSTŘIKOVACÍHO PROCESU	18
1.3 MIKRO-MECHANICKÉ VLASTNOSTI POVRCHOVÉ VRSTVY	18
2 POLYMERY	20
2.1 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	20
2.2 VNITŘNÍ STAVBA POLYMERŮ (MORFOLOGIE)	21
2.2.1 Amorfni struktura	22
2.2.2 Krystalická struktura.....	22
2.3 ELASTOMERY.....	24
2.4 PLASTY	24
2.4.1 Reaktoplasty.....	25
2.4.2 Termoplasty	25
2.5 POLYETYLEN (PE)	27
2.6 POLYKARBONÁT (PC).....	28
3 VSTŘIKOVÁNÍ POLYMERŮ	29
3.1 VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	29
3.1.1 Stavba formy.....	29
3.1.2 Vtokový systém	31
3.1.3 Temperační systém	32
3.1.4 Vyhazovací systém	34
3.1.5 Materiály forem	36
3.2 VSTŘIKOVACÍ STROJ	37
3.2.1 Vstřikovací jednotka.....	37
3.2.2 Uzavírací jednotka	39
3.2.3 Rám stroje	41
3.3 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	41
3.4 PARAMETRY VSTŘIKOVACÍHO CYKLU	43
3.4.1 Teplota pracovního válce.....	43
3.4.2 Rychlost otáčení šneku – dávkování	44
3.4.3 Vstřikovací rychlost.....	44
3.4.4 Teplota formy	44
3.4.5 Doba chlazení	45

3.4.6	Dotlak.....	45
4	MĚŘENÍ TVRDOSTI	46
4.1	VTISKOVÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	47
4.1.1	Brinellova zkouška tvrdosti.....	47
4.1.2	Rockwellova zkouška tvrdosti.....	48
4.1.3	Zkouška tvrdosti podle Vickerse	49
4.1.4	Zkouška tvrdosti podle Berkoviche.....	51
4.1.5	Zkouška tvrdosti podle Knoop.....	52
4.1.6	Instrumentovaná zkouška tvrdosti – DSI	52
5	CÍL PRÁCE.....	56
6	ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	57
6.1	VÝBĚR POLYMERNÍHO MATERIÁLU	57
6.2	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	57
6.3	INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI	58
6.4	RASTROVACÍ ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP S ENERGIIVĚ DISPERZNÍM ANALYZÁTOREM (SEM/EDS).....	60
6.5	DIFERENČNÍ SKENOVACÍ KALORIMETRIE (DSC)	60
6.6	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT.....	60
7	HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	63
7.1	POLYKARBONÁT (PC).....	63
7.2	VYSOKOHUSTOTNÍ POLYETYLEN (HDPE).....	86
7.3	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	108
8	PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI	110
9	ZÁVĚR.....	111
	LITERATURA	112
	SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA	120
	CV AUTORA.....	121
	PŘÍLOHA PI: MATERIÁLOVÝ LIST PC	122
	PŘÍLOHA PII: MATERIÁLOVÝ LIST HDPE.....	125

SEZNAM ILUSTRACÍ

<i>Obr. 2.1: Příklad polymeru – polyetylen a určení molární hmotnosti [40].</i>	20
<i>Obr. 2.2: Základní rozdělení polymerů [39].</i>	20
<i>Obr. 2.3: Stavba a skladba makromolekul [40].</i>	21
<i>Obr. 2.4: Druhy uspořádání makromolekul kopolymeru [40].</i>	21
<i>Obr. 2.5: Uspořádání makromolekuly roubovaného kopolymeru [40].</i>	21
<i>Obr. 2.6: Nadmolekulární struktura amorfních plastů: a) globula, b) uspořádání globul, c) svazek [42].</i>	22
<i>Obr. 2.7: Dvofázový model semikrystalického polymeru [41].</i>	22
<i>Obr. 2.8: Schematické znázornění orientace makromolekul ve směru působící síly [41].</i>	23
<i>Obr. 2.9: Schematické znázornění obecné molekulární struktury a uspořádání typického semikrystalického materiálu [45].</i>	23
<i>Obr. 2.10: Polarizovaný mikroskopický snímek sférolitické struktury polypropylenu [45].</i>	24
<i>Obr. 2.11: Makromolekulární struktura elastomerů [46].</i>	24
<i>Obr. 2.12: Makromolekulární struktura reaktoplastů [46].</i>	25
<i>Obr. 2.13 Termomechanická křivka: tahové napětí a deformace v závislosti na teplotě u semikrystalického polymeru [49].</i>	26
<i>Obr. 2.14: Termomechanická křivka: tahové napětí a deformace v závislosti na teplotě u amorfního polymeru [49].</i>	26
<i>Obr. 2.15: Chemický vzorec polyetylenu [39].</i>	27
<i>Obr. 2.16: Konfigurace makromolekulárních řetězců PE [50].</i>	27
<i>Obr. 2.17: Chemický vzorec polykarbonátu [39].</i>	28
<i>Obr. 3.1: Popis dvoudeskové formy [53].</i>	30
<i>Obr. 3.2: Funkce vtokové vložky [51].</i>	31
<i>Obr. 3.3: Kruhový průřez rozvodných kanálů poskytuje nejefektivnější tok [53].</i>	31
<i>Obr. 3.4: Vyvážený vtokový systém [53].</i>	32
<i>Obr. 3.5: Princip oddělení tunelových vtoků ústících do dutiny v pohyblivé a pevné části formy [53].</i>	32
<i>Obr. 3.6 Doporučené vzdálenosti a průměry kanálů temperačního systému formy [53].</i>	34
<i>Obr. 3.7: Uspořádání chladících okruhů [53].</i>	34
<i>Obr. 3.8: Příklad vyhazovacího systému s válcovými vyhazovači (vlevo):(a) upínací deska, (b) opěrná deska vyhazovače, (c) kotevní desky vyhazovače, (d) kotevní (tvarová) deska formy, (e) výstřik, (f) válcový vyhazovač, (g) distanční podložka. Příklad vyhazovacího systému s trubkovými vyhazovači (vpravo):(a) upínací deska, (b) přídržovací deska vyhazovače, (c) opěrná desky vyhazovače, (d) kotevní deska vyhazovače, (e) výstřik, (f) kotevní (tvarová) deska formy, (g) trubkový vyhazovač, (h) válcový kolík, (i) distanční podložka [52].</i>	35
<i>Obr. 3.9: Princip funkce stírací desky [53].</i>	35

<i>Obr. 3.10: Stroj na vstřikování plastů ARBURG – 1) uzavírací jednotka, 2) vstřikovací jednotka, 3) rám stroje [47].</i>	37
<i>Obr. 3.11: Rozdělení vstřikovacích jednotek podle způsobu plastikace [59].</i>	37
<i>Obr. 3.12: Schéma vstřikovací jednotky - 1) výstřik, 2) dávka materiálu, 3) pohon, 4) šnek, 5) topný element, 6) násypka, 7) zpětný uzávěr, 8) pracovní válec, 9) tryska pracovního válce [60].</i>	38
<i>Obr. 3.13: Plastikační šnek – zóny 1) dávkovací, 2) kompresní a 3) výstupní [60].</i>	38
<i>Obr. 3.14: Špička plastikačního šneku se zpětným uzávěrem [60].</i>	39
<i>Obr. 3.15: Rozdělení uzavíracích jednotek vstřikovacích strojů [59].</i>	39
<i>Obr. 3.16: Hydraulickomechanický pohon uzavírací jednotky se složeným kloubovým mechanismem a hydraulickým válcem v ose stroje: 1) pevná upínací deska, 2) pohyblivá upínací deska, 3) vstřikovací forma, 4) vodící tyče, 5) nosný třmen, 6) hydraulický válec, 7) pístní tyč, 8) kloubový mechanismus, 9) seřizovací šroubový mechanismus [59].</i>	40
<i>Obr. 3.17: Hydraulická zavírací jednotka strojů ARBURG typu C [47].</i>	40
<i>Obr. 3.18: Rám hydraulického vstřikovacího stroje [47].</i>	41
<i>Obr. 3.19: Sekvence vstřikovacího cyklu: 1) forma, 2) vstřikovací jednotka, 3) výstřik [59].</i>	42
<i>Obr. 3.20: Časový diagram vstřikovacího cyklu při vstřikování plastů (u termoplastů odpadá příprava formy) [62].</i>	42
<i>Obr. 3.21: Profil teplot pracovního válce pro amorfni a semikrystalické polymery [1].</i>	44
<i>Obr. 4.1: Zkouška tvrdosti podle Brinella HBS, HBW [70].</i>	48
<i>Obr. 4.2: Rockwellova zkouška tvrdosti [71].</i>	49
<i>Obr. 4.3: Odvození vrcholového úhlu Vickersova indentoru [64].</i>	50
<i>Obr. 4.4: Zkouška tvrdosti podle Vickerse [71].</i>	50
<i>Obr. 4.5: Geometrie Berkovichova indentoru [75].</i>	51
<i>Obr. 4.6: Obraz vtisku Berkovichova indentoru [72].</i>	51
<i>Obr. 4.7: Knoopův indentor a Knoopova zkouška tvrdosti. [77]</i>	52
<i>Obr. 4.8: Indentační křivka (a), časový diagram indentační zkoušky (b) [66].</i>	53
<i>Obr. 4.9: Schématický průběh indentační křivky: a) zatěžovací křivka; b) odlehčovací křivka; c) tečna ke křivce b v P_{max} [78].</i>	54
<i>Obr. 4.10: Schématické znázornění příčného řezu vtisku: a) indentor; b) povrch zbytkového plastického vtisku ve zkušebním tělese; c) povrch vtisku ve zkušebním tělese při maximálním zkušebním zatížení [68].</i>	54
<i>Obr. 6.1: Rozměry zkušebního tělesa.</i>	57
<i>Obr. 6.2: Indentační křivka (a), časovým diagramem indentační zkoušky (b) [66].</i>	59
<i>Obr. 7.1: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 0,5 mN.</i>	74

<i>Obr. 7.2: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 0,75 mN.....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 7.3: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 1 mN.....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 7.4: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 10 mN.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 7.5: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 50 mN.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 7.6: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 100 mN.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 7.7: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 250 mN.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 7.8: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 500 mN.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 7.9: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 1000 mN.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 7.10: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 5000 mN.....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 7.11: PC – Závislost tvrdosti a hloubky vniku na zatížení při třech teplotách taveniny (T_m) a teplotě formy $T_f = 80\text{ }^\circ\text{C}$.....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 7.12: PC – Závislost tvrdosti a hloubky vniku na zatížení při třech teplotách taveniny (T_m) a teplotě formy $T_f = 90\text{ }^\circ\text{C}$.....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 7.13: PC – Závislost tvrdosti a hloubky vniku na zatížení při třech teplotách taveniny (T_m) a teplotě formy $T_f = 100\text{ }^\circ\text{C}$.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 7.14: PC – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 280\text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 80\text{ }^\circ\text{C}$.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 7.15: PC – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 280\text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 90\text{ }^\circ\text{C}$.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 7.16: PC – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 280\text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 100\text{ }^\circ\text{C}$.....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 7.17: PC – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 290\text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 80\text{ }^\circ\text{C}$.....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 7.18: PC – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 290\text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 90\text{ }^\circ\text{C}$.....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 7.19: PC – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 290\text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 100\text{ }^\circ\text{C}$.....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 7.20: PC – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 300\text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 80\text{ }^\circ\text{C}$.....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 7.21: PC – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 300\text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 90\text{ }^\circ\text{C}$.....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 7.22: PC – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 300\text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 100\text{ }^\circ\text{C}$.....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 7.23: PC – Okraj lomové plochy (zvětšeno 1000x).....</i>	<i>81</i>

<i>Obr. 7.24: PC – Okraj lomové plochy (zvětšeno 5000x).</i>	82
<i>Obr. 7.25: PC – Okraj lomové plochy (zvětšeno 10000x).</i>	82
<i>Obr. 7.26: PC – EDS analýza obsahu kyslíku pro teplotu taveniny 280 °C.</i>	84
<i>Obr. 7.27: PC – EDS analýza obsahu prvků pro teplotu taveniny 280 °C.</i>	84
<i>Obr. 7.28: PC – EDS analýza obsahu kyslíku pro teplotu taveniny 300 °C.</i>	85
<i>Obr. 7.29: PC – EDS analýza obsahu prvků pro teplotu taveniny 300 °C.</i>	85
<i>Obr. 7.30: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 0,5 mN.</i>	96
<i>Obr. 7.31: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 0,75 mN.</i>	96
<i>Obr. 7.32: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 1 mN.</i>	96
<i>Obr. 7.33: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 10 mN.</i>	97
<i>Obr. 7.34: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 50 mN.</i>	97
<i>Obr. 7.35: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 100 mN.</i>	97
<i>Obr. 7.36: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 250 mN.</i>	98
<i>Obr. 7.37: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 500 mN.</i>	98
<i>Obr. 7.38: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 1000 mN.</i>	98
<i>Obr. 7.39: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 5000 mN.</i>	99
<i>Obr. 7.40: HDPE – Závislost tvrdosti a hloubky vniku na zatížení při třech teplotách taveniny (T_m) a teplotě formy $T_f = 40$ °C.</i>	99
<i>Obr. 7.41: HDPE – Závislost tvrdosti a hloubky vniku na zatížení při třech teplotách taveniny (T_m) a teplotě formy $T_f = 50$ °C.</i>	99
<i>Obr. 7.42: HDPE – Závislost tvrdosti a hloubky vniku na zatížení při třech teplotách taveniny (T_m) a teplotě formy $T_f = 60$ °C.</i>	100
<i>Obr. 7.43: HDPE – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 200$ °C, $T_f = 40$ °C.</i>	100
<i>Obr. 7.44: HDPE – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 225$ °C, $T_f = 40$ °C.</i>	100
<i>Obr. 7.45: HDPE – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 250$ °C, $T_f = 40$ °C.</i>	101
<i>Obr. 7.46: HDPE – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 200$ °C, $T_f = 50$ °C.</i>	101
<i>Obr. 7.47: HDPE – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 225$ °C, $T_f = 50$ °C.</i>	101

<i>Obr. 7.48: HDPE – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 250\text{ °C}$, $T_f = 50\text{ °C}$.</i>	102
<i>Obr. 7.49: HDPE – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 200\text{ °C}$, $T_f = 60\text{ °C}$.</i>	102
<i>Obr. 7.50: HDPE – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 225\text{ °C}$, $T_f = 60\text{ °C}$.</i>	102
<i>Obr. 7.51: HDPE – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 250\text{ °C}$, $T_f = 60\text{ °C}$.</i>	103
<i>Obr. 7.52: HDPE – Okraj lomové plochy (zvětšeno 1000x).</i>	103
<i>Obr. 7.53: HDPE – Okraj lomové plochy (zvětšeno 5000x).</i>	104
<i>Obr. 7.54: HDPE – Okraj lomové plochy (zvětšeno 10000x).</i>	104
<i>Obr. 7.55: HDPE – EDS analýza obsahu kyslíku pro teplotu taveniny 200 °C.</i>	105
<i>Obr. 7.56: HDPE – EDS analýza obsahu prvků pro teplotu taveniny 200 °C.</i>	106
<i>Obr. 7.57: HDPE – EDS analýza obsahu kyslíku pro teplotu taveniny 250 °C.</i>	106
<i>Obr. 7.58: HDPE – EDS analýza obsahu prvků pro teplotu taveniny 250 °C.</i>	107
<i>Obr. 7.59: HDPE – Příklad záznamu z měření DSC.</i>	108

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 3.1: Rozdělení ocelí při výrobě součástí formy [57].</i>	36
<i>Tab. 6.1: Procesní parametry při výrobě zkušebních těles.</i>	58
<i>Tab. 6.2: Hodnoty koeficientu k na počtu opakování měření</i>	62
<i>Tab. 7.1: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (PC), vstřikovací teplota 280 °C, teplota formy 80 °C.</i>	65
<i>Tab. 7.2: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (PC), vstřikovací teplota 280 °C, teplota formy 90 °C.</i>	66
<i>Tab. 7.3: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (PC), vstřikovací teplota 280 °C, teplota formy 100 °C.</i>	67
<i>Tab. 7.4: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (PC), vstřikovací teplota 290 °C, teplota formy 80 °C.</i>	68
<i>Tab. 7.5: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (PC), vstřikovací teplota 290 °C, teplota formy 90 °C.</i>	69
<i>Tab. 7.6: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (PC), vstřikovací teplota 290 °C, teplota formy 100 °C.</i>	70
<i>Tab. 7.7: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (PC), vstřikovací teplota 300 °C, teplota formy 80 °C.</i>	71
<i>Tab. 7.8: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (PC), vstřikovací teplota 300 °C, teplota formy 90 °C.</i>	72
<i>Tab. 7.9: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (PC), vstřikovací teplota 300 °C, teplota formy 100 °C.</i>	73
<i>Tab. 7.10: PC - Závislost obsahu kyslíku v povrchové vrstvě na teplotě taveniny</i>	83
<i>Tab. 7.11: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (HDPE), vstřikovací teplota 200 °C, teplota formy 40 °C.</i>	87
<i>Tab. 7.12: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (HDPE), vstřikovací teplota 200 °C, teplota formy 50 °C.</i>	88
<i>Tab. 7.13: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (HDPE), vstřikovací teplota 200 °C, teplota formy 60 °C.</i>	89
<i>Tab. 7.14: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (HDPE), vstřikovací teplota 225 °C, teplota formy 40 °C.</i>	90
<i>Tab. 7.15: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (HDPE), vstřikovací teplota 225 °C, teplota formy 50 °C.</i>	91
<i>Tab. 7.16: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (HDPE), vstřikovací teplota 225 °C, teplota formy 60 °C.</i>	92
<i>Tab. 7.17: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (HDPE), vstřikovací teplota 250 °C, teplota formy 40 °C.</i>	93
<i>Tab. 7.18: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (HDPE), vstřikovací teplota 250 °C, teplota formy 50 °C.</i>	94
<i>Tab. 7.19: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (HDPE), vstřikovací teplota 250 °C, teplota formy 60 °C.</i>	95

<i>Tab. 7.20: HDPE - Závislost obsahu kyslíku v povrchové vrstvě na teplotě taveniny.</i>	<i>105</i>
<i>Tab. 7.21: HDPE - Závislost obsahu kyslíku v povrchové vrstvě na teplotě taveniny.</i>	<i>107</i>

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

DSC	Diferenční skenovací kalorimetrie
VST	Teplota měknutí
Ra	Střední aritmetická hodnota drsnosti
DSI	Instrumentovaná zkouška tvrdosti
M ₀	Molární hmotnost monomeru
M	Molární hmotnost polymeru
P	Polymerační stupeň (počet merů v řetězci)
A	Dvojfunkční jednotka (monomer)
Y	Trojfunkční jednotka (monomer)
T _g	Teplota skelného přechodu
T _f	Teplota viskózního toku
T _m	Teplota tání
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PA	Polyamid
PTFE	Polytetrafluorethylen
POM	Polyoxymetylén
PS	Polystyren
PMMA	Polymethylmethakrylát
PC	Polykarbonát
VLDPE	Velmi nízkohustotní polyethylen (Very Low Density Polyethylene)
LDPE	Nízkohustotní polyethylen (Low Density Polyethylene)
LLDPE	Lineární nízkohustotní polyethylen (Linear Low Density Polyethylene)
HDPE	Vysokohustotní polyethylen (High Density Polyethylene)
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
SVS	Studený vtokový systém
VVS	Vyhřívaný vtokový systém
Re	Reynoldsovo číslo
v	Rychlost chladící kapaliny

D	Průměr, průměr indentoru
μ	Absolutní viskozita chladící tekutiny
ρ	Hustota
\dot{V}	Objemový průtok
A	Plocha
t_{cooling}	Čas chlazení
h	Tloušťka stěny výstřiku, hloubka vtisku (vniku) indentoru
α	Součinitel teplotní vodivosti
T_m	Teplota taveniny
T_w	Teplota stěny dutiny formy
T_D	Průměrná teplota při vyhození z formy
F	Síla, zatížení
H	Tvrlost
HB _X	Tvrlost podle brinella
HR _X	Tvrlost podle Rockwella
HV	Tvrlost podle Vickerse
H _{CH}	Tvrlost podle Berkoviche
HK	Tvrlost podle Knoopu
S	Velikost povrchu
g	Gravitační zrychlení
d	Průměr, střední průměr vtisku
F ₀	Předběžné zatížení indentoru
F ₁	Přídavné zatížení indentoru
l	Délka, výška trojúhelníku z obrazu vtisku
c	Konstanta, geometrická konstanta Knoopova indentoru
P	Indentační síla
P _{max}	Maximální indentační síla
A _S	Zbytková kontaktní plocha zkušebního tělesa a indentoru
h _r	Hloubka po odlehčení indentoru, hloubka plastická
h _p	Redukovaná hloubka vtisku
H _{pl}	Plastická tvrdost

H_{IT}	Indentační tvrdost (vtisková tvrdost)
A_p	Průmět kontaktní plochy indentoru
ε	Geometrická konstanta indentoru
h_{max}	Maximální hloubka vtisku
h_p	Hloubka kontaktu indentoru se zkušebním tělesem při max.zatížení
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop
EDS	Vlnově disperzní analyzátor
WD	Pracovní vzdálenost rastrovacího el. Mikroskopu
Al	Hliník
N_2	Dusík
\bar{X}	Odhad aritmetického průměru
$s^2(x_i)$	Výběrový rozptyl
$s^2(\bar{X})$	Rozptyl výběrových průměrů
U_A	Standardní nejistota typu A
n	Počet měření
m	Medián
s	Směrodatná odchylka výběrového souboru
min	Minimální hodnota výběrového souboru
max	Maximální hodnota výběrového souboru
T_m	Teplota taveniny
T_f	Teplota formy
$HV_{0,00005}$	Vickersova tvrdost při zatížení indentoru 0,5 mN
$HV_{0,000075}$	Vickersova tvrdost při zatížení indentoru 0,75 mN
$HV_{0,0001}$	Vickersova tvrdost při zatížení indentoru 1 mN
$HV_{0,001}$	Vickersova tvrdost při zatížení indentoru 10 mN
$HV_{0,005}$	Vickersova tvrdost při zatížení indentoru 50 mN
$HV_{0,01}$	Vickersova tvrdost při zatížení indentoru 100 mN
$HV_{0,025}$	Vickersova tvrdost při zatížení indentoru 250 mN
$HV_{0,05}$	Vickersova tvrdost při zatížení indentoru 500 mN
$HV_{0,1}$	Vickersova tvrdost při zatížení indentoru 1000 mN
$HV_{0,5}$	Vickersova tvrdost při zatížení indentoru 5000 mN

$h_{\max 0,00005}$	Maximální hloubka vniku indentoru při zatížení 0,5 mN
$h_{\max 0,000075}$	Maximální hloubka vniku indentoru při zatížení 0,75 mN
$h_{\max 0,0001}$	Maximální hloubka vniku indentoru při zatížení 1 mN
$h_{\max 0,001}$	Maximální hloubka vniku indentoru při zatížení 10 mN
$h_{\max 0,005}$	Maximální hloubka vniku indentoru při zatížení 50 mN
$h_{\max 0,01}$	Maximální hloubka vniku indentoru při zatížení 100 mN
$h_{\max 0,025}$	Maximální hloubka vniku indentoru při zatížení 250 mN
$h_{\max 0,05}$	Maximální hloubka vniku indentoru při zatížení 500 mN
$h_{\max 0,1}$	Maximální hloubka vniku indentoru při zatížení 1000 mN
$h_{\max 0,5}$	Maximální hloubka vniku indentoru při zatížení 5000 mN

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Polymery se v přírodě vyskytují hojně a jsou součástí všech živých systémů. Materiály jako dřevo, papír, kůže nebo např. přírodní vlákna, byly člověkem používány už od pravěku. Tyto přírodní polymery si zachovaly svůj význam i dnes, ale v současné době se většinou používají syntetické polymery. Ve druhé polovině devatenáctého století byly chemickou modifikací přírodních materiálů vytvořeny první umělé polymery a plně syntetické polymery byly vyvinuty ve století dvacátém. Tento vývoj byl poháněn rychlou expanzí průmyslové výroby [1]. Polymerní materiály jsou v současné době nejrychleji se rozšiřující materiálovou skupinou a mezi všemi technickými materiály představují, podle objemu, nejvýznamnější odvětví výroby a spotřeby.

Jejich rychlé rozšíření a obliba ve zpracovatelském průmyslu je založena na relativní jednoduchosti a energetické nenáročnosti zpracování v porovnání s jinými druhy materiálů, a zároveň na specifických vlastnostech polymerů, které je možno ještě dodatečně modifikovat. Vzniká tak nepřeberné množství materiálů, kdy některé jsou vytvářeny na míru pro konkrétní aplikace.

Vedle výhod polymerních materiálů, jimiž jsou například nízká hustota, malá tepelná vodivost, elektroizolační vlastnosti apod., mají tyto materiály i své nevýhody. Těmi jsou například silná závislost mechanických vlastností na teplotě, tečení materiálu pod stálým zatížením (creep) nebo omezená odolnost proti povětrnostním vlivům, chemikáliím apod.

Výsledné vlastnosti výrobku z polymeru jsou proto ve značné míře závislé nejenom na samotném druhu polymeru, ale také na látkách přidávaných do základního materiálu (aditiva, plniva, barviva...), které vylepšují jeho vlastnosti nebo snižují jeho cenu. Dalším faktorem ovlivňujícím konečný výrobek je způsob zpracování polymeru a procesní podmínky výroby. Tyto mohou, při nevhodném nastavení procesu, způsobit například lokální přehřívání materiálu a tím zapříčinit degradaci polymeru, čímž se zhoršují výsledné vlastnosti a životnost finálního výrobku.

Tato práce se zabývá vlivem změny procesních parametrů technologie vstřikování polymerů (teplota taveniny a teplota formy), na mechanické vlastnosti povrchové vrstvy výrobku charakterizované jeho tvrdostí.

1.1 Vliv procesních parametrů na mechanické vlastnosti vstřikovaných dílů

Vstřikování je tvářecí metoda zpracování polymerů. Tato metoda vznikla na základě myšlenky bratří Hyattů vyrábět kulečnické koule podobně jako tlakové lití kovů. Od té doby urazila technologie vstřikování polymerů veliký kus cesty a díky jednoduchosti, efektivitě výroby a možnosti vyrábět složité díly bez nutnosti dalšího opracování se stala, spolu s vytlačováním, nejrozšířenější technologií zpracování polymerů [1].

V posledních letech se velké množství prací zabývá studiem morfologie polymerů v závislosti na změně procesních parametrů vstřikování. Optimální procesní podmínky zabezpečují kvalitu vstřikovaných dílů, která je závislá na struktuře polymeru a jeho termokinetice [2]. Morfologie polymeru ovlivňuje chování výsledného dílu, zejména jeho mechanické vlastnosti, které jsou v závislosti na morfologii různé [3][4][5][6][7][8], z čehož vyplývá, že mechanické vlastnosti vstřikovaného dílu jsou závislé jak na druhu použitého polymeru, tak i na procesních parametrech, jako jsou vstřikovací rychlost, dotlak, teplota taveniny atd. Změní-li se některý z procesních parametrů při zpracování polymerů, mohou se změnit i mechanické vlastnosti výsledného produktu, aniž by to bylo patrné na kvalitě vzhledu výrobku [9].

Do jaké míry mohou procesní parametry ovlivnit výsledné mechanické vlastnosti je předmětem mnoha zkoumání. Jsou posuzovány především vlivy vstřikovací rychlosti, tlaku a dotlaku (základních parametrů vstřikovací fáze technologie vstřikování polymerů) a teploty formy na mechanické vlastnosti a vnitřní strukturu výsledného produktu. Tyto vlastnosti jsou zjišťovány klasickými metodami a následně porovnávány [10][11]. Za klasické metody jsou považovány zkoušky v tahu a ohybu, tvrdosti; dále pak diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) a zjištění teploty měknutí Vicat (VST) [12][13][14][15][16].

1.2 Optimalizace vstřikovacího procesu

S příchodem počítačů a zejména s jejich rostoucím výpočetním výkonem se stalo v dnešní době běžnou praxí využití programů pro optimalizaci dílů a vstřikovacího procesu. Tyto metody umožňují optimalizaci tvarů a rozměrů plastových dílů i optimální podmínky procesu vstřikování, což zkracuje celou cestu od návrhu až po finální výrobek s danými vlastnostmi [17][18]. Nicméně, ne vždy optimální rozměry a vstřikovací podmínky získané ze softwaru automaticky znamenají úspěch. Testování reálných výrobků při různých procesních podmínkách je však zdlouhavou a komplikovanou záležitostí.

Existuje mnoho statistických přístupů, kterými lze predikovat výsledné chování výrobků. Jednou z využívaných metod je Taguchiho přístup ke kvalitě a řízení kvality z pohledu vnášení kvality do designu výrobku. I přesto, že je tato metoda velmi kontroverzní, je její efektivita potvrzena v mnoha publikacích [19][20][21][22][23].

1.3 Mikro-mechanické vlastnosti povrchové vrstvy

Nejen procesní podmínky a samotný polymerní materiál mají vliv na výsledné vlastnosti plastového výrobku. Velkou roli zde hraje i návrh samotného nástroje (formy) pro výrobu daného dílu. Určitou roli hraje i samotný vtokový systém a jeho umístění na výrobku. Nevhodně navrhovaný vtokový systém může vést k nadměrnému zatěžování taveniny polymeru v důsledku vysokých smykových deformací, což bývá příčinou teplotní degradace ovlivňující výsledné vlastnosti

dílu [24]. Umístění vtokového ústí dále ovlivňuje pozice stokových čar, které mohou rovněž ovlivnit pevnost vstřikovaného dílu [25]. Kvalita povrchu finálního dílu se odvíjí od kvality opracování (drsnoti) tvarové dutiny formy. Vstřikováním lze vyrobit velice hladké povrchy s drsností Ra 0,1 μm a v přesnosti nevyžadující další opracování [26][27][28].

Mikro-mechanickými vlastnostmi povrchové vrstvy vstřikovaných polymerů se dlouhou řadu let zabývala skupina vědců z univerzity Tomáše Bati ve Zlíně pod vedením doc. Davida Maňase. Nicméně, stále se nepodařilo zcela objasnit vztah mezi nastavenými procesními podmínkami vstřikovacího procesu a vlastnostmi výrobku, zejména jeho povrchové vrstvy. V publikovaných článcích je řešena problematika optimálně vyrobeného zkušební tělesa, které bylo testováno instrumentovanou zkouškou tvrdosti (metodou DSI) při daném zatížení [29][30][31][32]. Touto problematikou se rovněž zabývá i mnoho dalších publikací, které se snaží popsat, jaký vliv mají procesní parametry na povrchovou tvrdost polymerů [33][34][35][36][37][38]. Nicméně doposud se všichni zabývají mikro-mechanickými vlastnosti povrchové vrstvy, která se pohybuje řádově v mikrometrech, ale co se děje v hloubkách několika desítek až stovek nanometrů pod povrchem je stále velkou neznámou. Pro hlubší porozumění a nalezení určitého vztahu mezi nastavenými procesními podmínkami a nano-mechanickými vlastnostmi povrchové vrstvy plastových dílů je potřeba využít širokou škálu zatížení (od 0,5 mN do 5000 mN). Změnou zatížení je možno ovlivňovat hloubku vniknutí indentoru do měřeného povrchu a tím i studovat změny mechanických vlastností v jednotlivých vrstvách pod povrchem způsobených rozdílnými procesními parametry, zejména teplotou taveniny a teplotou vstřikovací formy.

Při výzkumu tohoto problému jsme se zaměřili pouze na dva parametry vstřikovacího procesu, a to na teplotu taveniny a teplotu formy. Na rozdíl od veličin vstřikovací tlaku, dotlaku a vstřikovací rychlosti, jejichž hodnoty jsou v praxi ve velké míře závislé na tvaru výrobku a kvalitě formy, je teplota taveniny a teplota formy, resp. jejich rozsah, předepsán výrobcem materiálu. Standardně jsou voleny střední hodnoty doporučených teplot a jsou upravovány hlavně při nutnosti korekce vad výrobku nebo při špatném plnění dutiny formy.

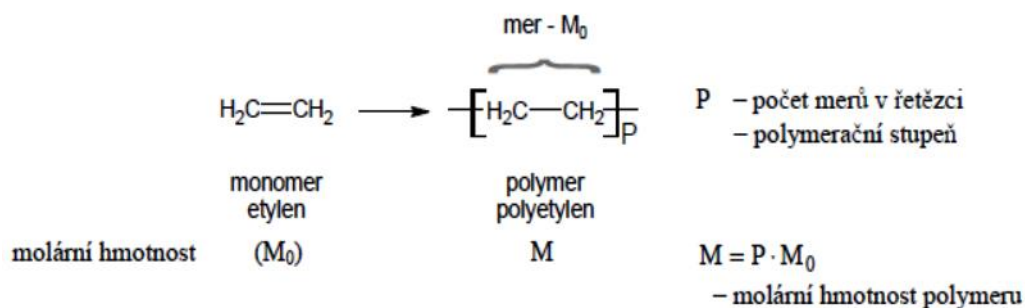
Jak jsou ovlivněny vlastnosti výsledného vzorku, bylo zjišťováno pomocí metody DSI Instrumentované vnikací zkoušky tvrdosti. Tato metoda je oproti standardně používané klasické zobrazovací metodě, kdy se výsledky zjišťují z rozměrů reziduálního vtisku, založena na principu současné detekce okamžité změny hloubky průniku indentoru do zkoumaného materiálu a nárůstu nebo poklesu zatížení v průběhu celého zatěžovacího a odlehčovacího procesu. Metoda DSI umožňuje měřit mechanické vlastnosti velmi tenkých nebo velmi elastických vrstev.

2 POLYMERY

Polymery jsou chemické látky, obsahující ve svých molekulách většinou atomy uhlíku, vodíku, kyslíku, chlóru, dusíku a jiných prvků. Polymery jsou při běžné teplotě v tuhém stavu, ale zpracovávají se ve stavu kapalném, většinou za zvýšené teploty a tlaku. Způsob zpracování dovoluje vytvářet z polymerního materiálu výrobky nejrůznějšího tvaru vzhledem ke konečnému použití [39].

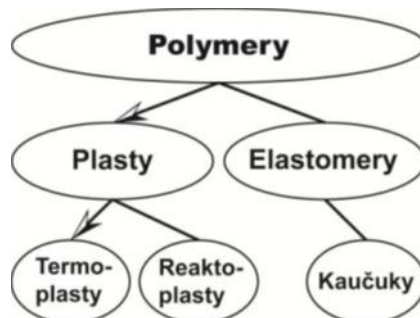
2.1 Rozdělení polymerů

Makromolekuly, extrémně velké molekuly, jsou základními jednotkami všech polymerů. Makromolekuly vznikají spojením velkého počtu opakujících se částí – merů, tento proces se nazývá polyreakce. Mery jsou zůstatky ze spojujících se výchozích molekul – monomerů. Malé množství spojených merů se označuje jako – oligomer, velké množství pak jako – polymer (Obr. 2.1) [40].



Obr. 2.1: Příklad polymeru – polyetylen a určení molární hmotnosti [40].

Polymery je možné rozdělit mnoha způsoby, za základní však můžeme považovat dělení na elastomery a plasty (Obr. 2.2). Plasty, jsou většinou tvrdé, často i křehké za běžných podmínek. Plastickými a tvarovatelnými se stávají při zvýšených teplotách. Termoplasty jsou polymery, u kterých je změna z plastického stavu do tuhého vratná. Je-li tato změna výsledkem chemické reakce, je nevratná (trvalá). V tom případě se jedná o reaktoplasty [39].



Obr. 2.2: Základní rozdělení polymerů [39].

Naproti tomu elastomery jsou velmi elastické polymery, které se za běžných podmínek, značně deformují i při malém zatížení. Jedná se převážně o vratnou deformaci [39].

Podle stupně uspořádání makromolekul (nadmolekulární struktura) dělíme polymery na amorfnní nebo krystalické [42].

2.2.1 Amorfnní struktura

Amorfnní polymery, svou náhodně uspořádanou molekulární strukturou připomínají něco, jako mísu špaget. Zde se největší uspořádaná oblast rovná velikosti uhlíkových vazeb. Tento rozměr je mnohem menší než vlnová délka viditelného světelného záření, a proto jsou obecně amorfnní termoplasty transparentní [43]. Globuly (klubička) jsou základním morfologickým útvarem této struktury a jsou tvořeny chaoticky stočenými makromolekulami. Dosahují velikost 10–30 nm [42].



Obr. 2.6: Nadmolekulární struktura amorfnních plastů: a) globula, b) uspořádání globul, c) svazek [42].

2.2.2 Krystalická struktura

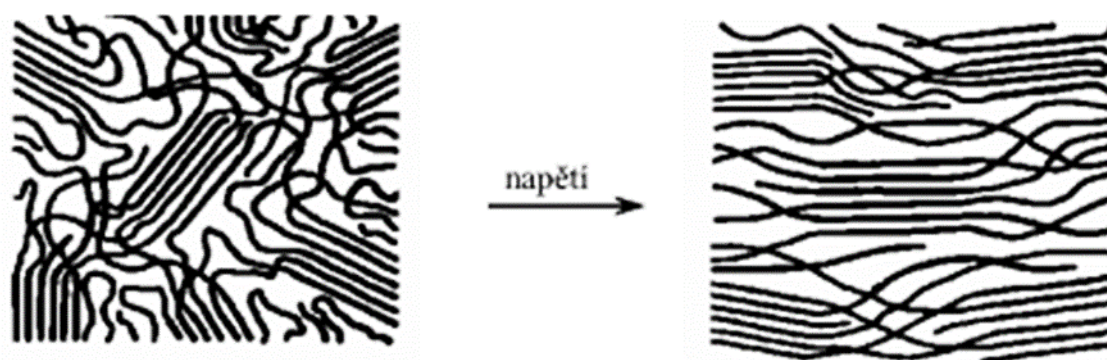
Krystalické polymery vykazují mnohem uspořádanější strukturu než polymery amorfnní, nicméně tato uspořádanost – krystalinita, kdy jsou makromolekuly uloženy těsně vedle sebe, nevyplňuje celý objem polymeru, ale je obklopena neuspořádanými (amorfnními) částmi makromolekul. Mluvíme proto o polymerech semikrystalických (částečně krystalických) [42][43].



Obr. 2.7: Dvoufázový model semikrystalického polymeru [41].

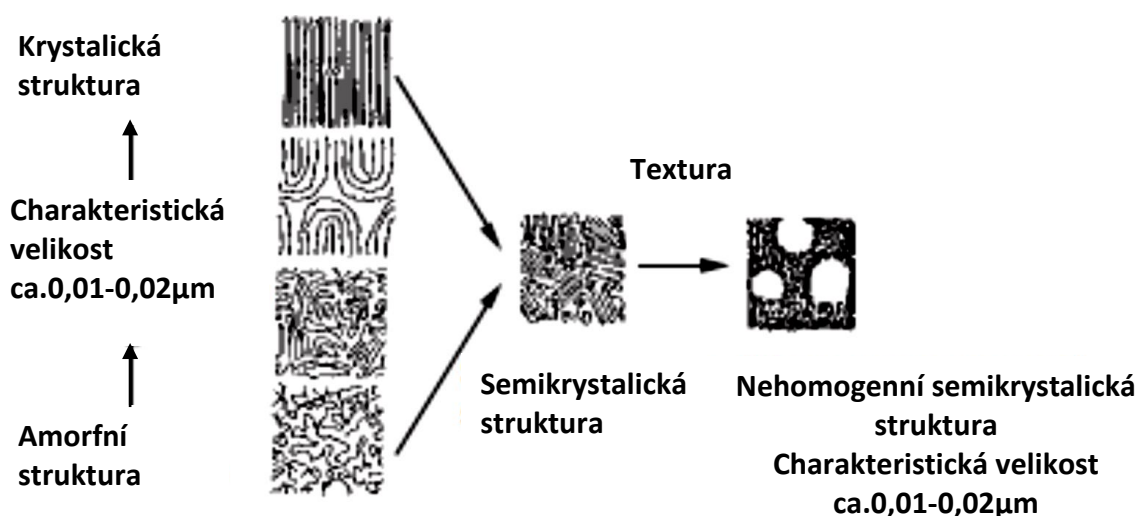
Dnes již překonaný dvoufázový model vysvětlení struktury semikrystalického polymeru uvažoval náhodnou distribuci krystalických a amorfních oblastí v polymeru. Malé krystalické oblasti v polymeru se nazývají krystality a jejich rozměr je řádově menší, než je délka makromolekuly. Proto se předpokládalo, že jedna makromolekula může být součástí více krystalitů i amorfních oblastí [41].

Zmíněný dvoufázový model se dosud užívá pro vysvětlení vlivu působícího napětí na orientaci makromolekul a tím na zvýšení obsahu krystalické fáze v polymeru. Makromolekuly se působením napětí orientují ve směru této síly a tím se zvyšuje uspořádanost struktury v původně amorfní oblasti. S rostoucím podílem krystalické fáze roste i pevnost polymeru. Tento efekt se využívá například při výrobě vláken tzv. dloužení [41].

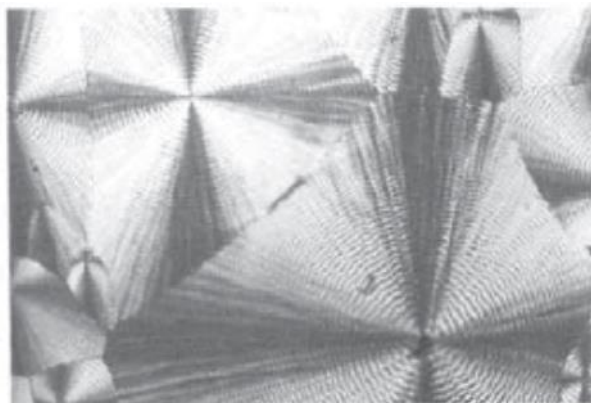


Obr. 2.8: Schematické znázornění orientace makromolekul ve směru působící síly [41].

Novější představa o morfologii polymerů přišla s objevem monokrystalů [41]. Základním morfologickým útvarem jsou tzv. lamely, fibrily. Fibrily jsou vláknité útvary, které vznikají při smykovém namáhání krystalizujícího polymeru [44]. Typickým tvarem, který vzniká při tuhnutí polymeru z taveniny jsou sférolity. Jedná se o útvary kulovitého tvaru, které vznikají radiálním růstem krystalických struktur z nukleačního centra [41].



Obr. 2.9: Schematické znázornění obecné molekulární struktury a uspořádání typického semikrystalického materiálu [45].



Obr. 2.10: Polarizovaný mikroskopický snímek sférolitické struktury polypropylenu [45].

2.3 Elastomery

Elastomer je vysoce elastický polymer, který můžeme za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení, přičemž deformace je převážně vratná. Nejpočetnějším zástupcem elastomerů jsou kaučuky [39].

Typicky elastické chování propůjčuje elastomerům jejich vnitřní amorfní struktura, kde jsou makromolekuly propojeny příčnými chemickými vazbami s velmi malou koncentrací (Obr. 2.11). Příčné vazby vznikají při zpracování lineárních nebo rozvětvených polymerů. Například u kaučuku dochází k vytvoření příčných vazeb (zesíťování) procesem vulkanizace, za přítomnosti vhodného typu síťovacího činidla, např. síry. Elastomery jsou nerozpustné a botnají.



Obr. 2.11: Makromolekulární struktura elastomerů [46].

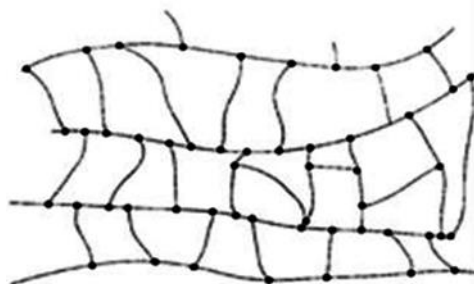
2.4 Plasty

Plasty se stávají plastickými a tvarovatelnými při zvýšené teplotě, podle toho, jaké vazby vytváří makromolekuly při zpracování, je dělíme na termoplasty a reaktoplasty (termosety). O termoplastech mluvíme, je-li změna z plastického do tuhého stavu opakovatelná, kdy makromolekuly vytváří fyzikální vazby. Jde-li o změnu trvalou (neopakovatelnou) jedná se o reaktoplasty, protože vazby mezi makromolekulami jsou výsledkem chemické reakce [39]. Na rozdíl od lineárních makromolekul, které se formují do uspořádanější nadmolekulární struktury, vytváří reaktoplasty rozvětvené makromolekuly strukturu neuspořádanou. Proto

mohou termoplasty mít jak amorfni, tak semikrystalickou vnitřní stavbu. Naproti tomu termosety mají vnitřní strukturu pouze amorfni [42].

2.4.1 Reaktoplasty

U reaktoplastů, někdy označovaných jako termosety, podobně jako elastomerů, dochází během zpracování ke vzniku příčných chemických vazeb mezi makromolekulami. Nelze je tedy opakovaně zpracovávat. Síť makromolekul je ale u termosetů velmi hustá, a proto jsou „termosety“ pevné, křehké, chemicky odolné, jsou nerozpustné a nebotnají. Fenolformaldehydová pryskyřice nebo polyestery jsou typickými zástupci reaktoplastů [47].



Obr. 2.12: Makromolekulární struktura reaktoplastů [46].

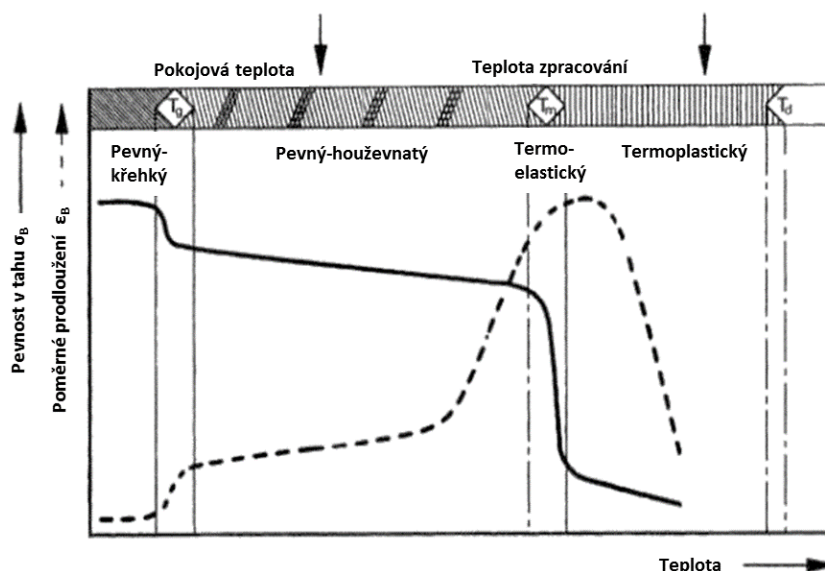
2.4.2 Termoplasty

Rozdílné způsoby uložení řetězců makromolekul vůči sobě vedou k rozdílným možnostem uplatnění mezimolekulárních sil a tím i k různým vlastnostem polymerů v pevném stavu. Nejvýrazněji se tyto rozdíly projevují v teplotním chování polymerů [40]. Výrazné změny mechanických vlastností polymerů probíhají v určitém teplotním rozsahu, přechodové oblasti, rychleji nebo skokově s přechodovými teplotami T_g , T_f a T_m , kde T_g je teplota skelného přechodu, T_f teplota viskózního toku a T_m je teplota tání [39].

Semikrystalické termoplasty

Semikrystalické polymery jsou použitelné pod teplotou viskózního toku (teplotou tání). Protože vnitřní struktura obsahuje jak krystalické, tak i amorfni oblasti, mají semikrystalické polymery dvě různé teploty fázového přechodu, teplotu zesklenní T_g a teplotu tání T_m [45]. Nad teplotou T_m dochází ke skokové změně vlastností (rozpouští se krystalický podíl), mezi teplotami T_m a T_g je krystalická struktura již uspořádána a amorfni se nachází v kaučukovitém stavu, ten přechází do stavu sklovitého pod teplotou T_g . S menším stupněm krystalinity, jsou změny vlastností při T_g výraznější [48].

Typicky jsou semikrystalické polymery houževnaté, přičemž se zvyšuje pevnost a modul pružnosti se stupněm krystalinity. Bývají mléčně zakalené až průsvitné. Mezi semikrystalické polymery patří např. PE, PP, PA, PTFE, POM atd.

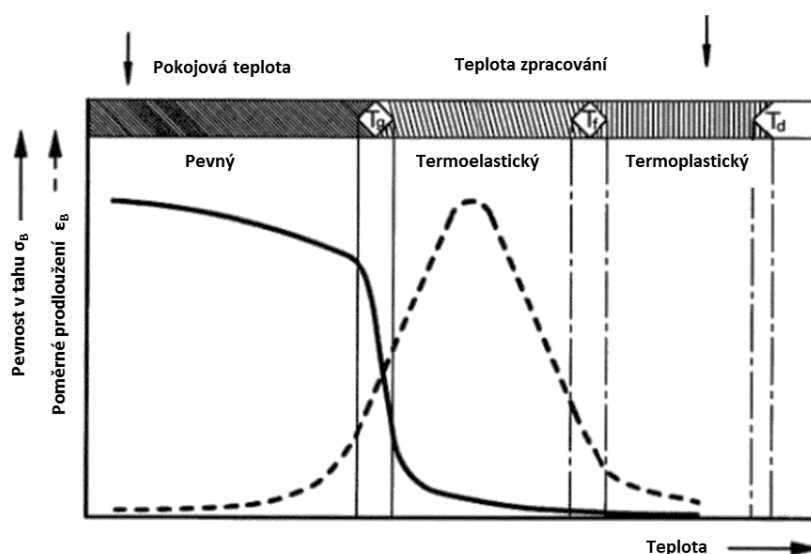


Obr. 2.13 Termomechanická křivka: tahové napětí a deformace v závislosti na teplotě u semikrystalického polymeru [49].

Amorfní termoplasty

U většiny materiálů je teplota fázového přechodu z kapalné do tuhé fáze definována jako diskrétní, zatímco amorfní polymery nemají při fázové přeměně ostrou hranici, ale děje se tak v určitém teplotním rozmezí mezi T_g a T_f [45]. Amorfní polymery jsou použitelné ve sklovitém stavu pod teplotou T_g . Mezi teplotami T_g a T_f je plast v kaučukovitém stavu. Tato vlastnost je velmi výhodná při zpracování tvářecími technologiemi. Nad teplotou T_f je polymer v plastickém stavu a při působení vnější síly dochází k viskóznímu toku [48].

Do skupiny amorfních polymerů patří např. PS, PMMA, PC apod. Amorfní polymery jsou průhledné až čiré, mají vysokou pevnost a modul pružnosti. Mají mnohem menší tepelné smrštění než materiály semikrystalické.



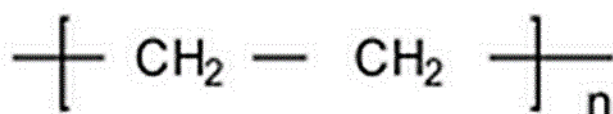
Obr. 2.14: Termomechanická křivka: tahové napětí a deformace v závislosti na teplotě u amorfního polymeru [49].

2.5 Polyetylen (PE)

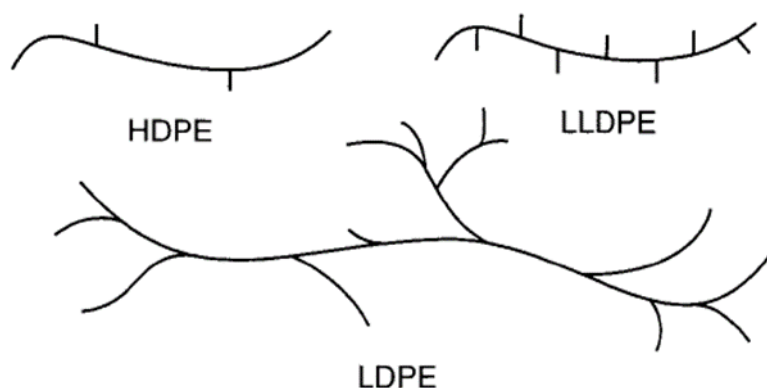
Polyetylen spadá do skupiny polyolefinů. Jedná se o jednoduchý polymer s opakující se strukturou $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$. Díky svým vlastnostem, jako jsou například houževnatost, tvárnost, výborná chemická odolnost, nízká propustnost vodní páry a velmi nízká absorpce vody a díky jednoduchosti zpracování patří mezi nejnámější a nejpoužívanější polymery [50].

Existuje několik druhů PE, jejichž příprava se liší typem polymerace. Vzniká tím spektrum polymerů, které rozlišujeme podle hustoty. Ta je mírou linearity řetězců makromolekul a tím i krystalinity polymeru [39]. Obecně rozlišujeme tři základní stupně hustoty PE: nízká, střední a vysoká, kde se rozsah pohybuje od $0,910-0,925 \text{ g/cm}^3$, přes $0,925-0,940 \text{ g/cm}^3$ až po $0,940-0,965 \text{ g/cm}^3$. Komerčně se PE rozděluje na:

- Velmi nízkohustotní PE (VLDPE),
- Nízkohustotní PE (LDPE),
- Lineární nízkohustotní PE (LLDPE),
- Vysokohustotní PE (HDPE),
- PE o velmi vysoké molekulové hmotnosti (UHMWPE) [50].



Obr. 2.15: Chemický vzorec polyetyleny [39].



Obr. 2.16: Konfigurace makromolekulárních řetězců PE [50].

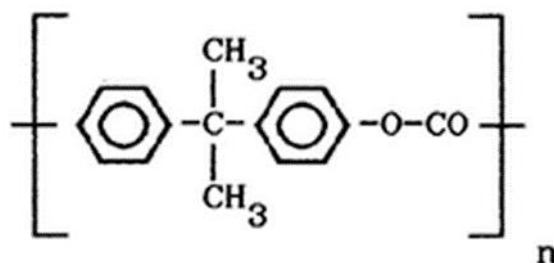
Všechny typy PE jsou relativně měkké, tvrdost vzrůstá se zvyšující se hustotou. Obecně lze říci, že čím vyšší hustota, tím lepší je rozměrová stabilita a fyzikální vlastnosti PE. Mez kluzu a teplota tání rostou spolu s hustotou, elasticita naopak klesá [50]. Použitelnost PE je v rozmezí teplot přibližně od $90 \text{ }^\circ\text{C}$ pro nízkohustotní typ PE po více než $100 \text{ }^\circ\text{C}$ pro vysokohustotní PE, přičemž si PE udržuje houževnatost i při velmi nízkých teplotách, křehne až při $-120 \text{ }^\circ\text{C}$ [39].

S rozvětveností makromolekul a jejich molekulovou hmotností vzrůstá průhlednost polyetylenu. Za normálních podmínek je bílý [39].

PE je nejpoužívanějším obalovým materiálem a nachází uplatnění i v technických aplikacích (kanystry, trubky apod.) i spotřebním zbožím [39].

2.6 Polykarbonát (PC)

Polykarbonát patří do skupiny inženýrských plastů díky svým velmi dobrým vlastnostem, a to zejména rázové houževnatosti, která je srovnatelná s některými kovy jako jsou slitiny zinku a hliníku. Mezi další výhodné vlastnosti tohoto polymeru patří tuhost, pevnost, rozměrová stálost, odolnost proti tečení (creep), dobré dielektrické vlastnosti, odolnost proti vysokým teplotám nebo odolnost proti UV záření a oxidaci. Polykarbonáty jsou průhledné a velmi dobře barvitelné. Nevýhodou polykarbonátů je jejich omezená odolnost proti rozpouštědlům [39][50].



Obr. 2.17: Chemický vzorec polykarbonátu [39].

Polykarbonáty jsou díky svým mechanickým vlastnostem přidávány do ostatních polymerů, u kterých zvyšují jejich pevnost a tuhost. Asi nejnámější jsou směsi PC a ABS, které jsou velmi hojně využívány jako materiál pro tenkostěnné výrobky. Samotný polykarbonát se používá na výrobu krytů elektrických přístrojů, ochranných pomůcek, krytů světla, světlo-vodivých a dalších optických dílů apod. [50].

Polykarbonáty se zpracovávají běžnými plastikářskými technologiemi, komerčně dostupné jsou typy PC pro vstřikování, vytlačování i vyfukování. PC lze jednoduše lepit, ale i obrábět konvenčními obráběcími metodami [50].

3 VSTŘIKOVÁNÍ POLYMERŮ

Vstřikování polymerů (plastů) patří mezi tvářecí technologie a jedná se o jeden z nejrozšířenějších způsobů zpracování polymerů. V současnosti se více než třetina všech termoplastů zpracovává vstřikováním [43]. Při vstřikování se polymer ohřeje nad teplotu T_f , resp. T_m (plastický stav) a je vysokou rychlostí vpraven – vstříknut do uzavřené formy. Dutina formy dává plastu po vychladnutí konečný tvar [49].

Jedná se o cyklický proces, jehož výstupem je konečný výrobek, který ve většině případů nepotřebuje již žádné další úpravy. Každý jednotlivý cyklus trvá sekundy až desítky minut především v závislosti na tloušťce stěny daného výrobku a tím na čase chlazení nutného ke ztuhnutí polymeru. Vzhledem k dosažované produktivitě a dosažované vysoké přesnosti výrobků, je vstřikování ideální proces pro masovou produkci [43].

Pro vstřikování plastů jsou požadovány dva hlavní komponenty:

- Vstřikovací stroj
- Forma

Oba prvky mohou zásadním způsobem ovlivnit kvalitu výsledného produktu procesu vstřikování [49].

3.1 Vstřikovací forma

Plastový výrobek vzniká ve formě, která je upnuta v uzavírací jednotce vstřikovacího stroje a dává mu konečný tvar, předtím, než je z formy vyhozen. V zásadě by konstrukce formy měla být taková, aby byl vyroben finální produkt, u kterého již nebudou vyžadovány žádné dodatečné operace, například montáž, povrchové úpravy apod. Nicméně, zvýšené požadavky na funkci formy vedou ke zvyšování konstrukční a časové náročnosti spolu s výslednou cenou [51].

Primárním úkolem formy je rozvod taveniny, její tvarování, chlazení a následné vyhození z formy. Sekundárním úkolem vyplývajícím z primární funkce je absorpce sil, přenos pohybu a vedení výrobku při vyhazování [49].

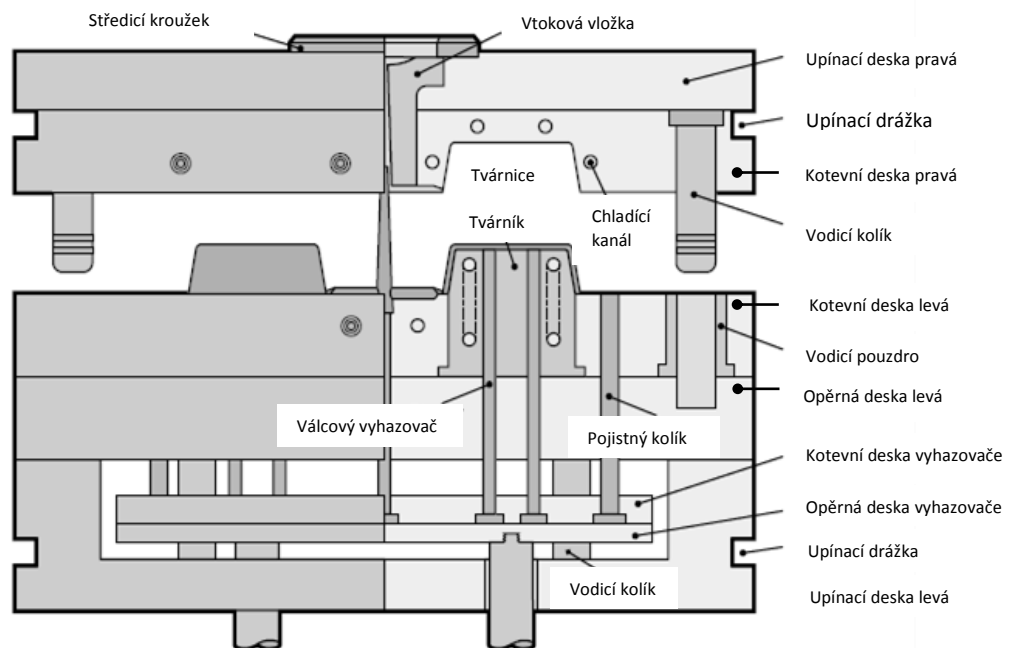
3.1.1 Stavba formy

Každá forma se v podstatě skládá ze dvou částí (polovin), které po uzavření vytvoří dutinu, která tvaruje roztavený plast do finální podoby [52].

Rám formy je tvořen deskami spojenými dohromady a doplněnými o vodící a středící prvky. Tvarové prvky formy se nazývají tvárník a tvárnice. Obvykle jsou to samostatné části připevněné do rámu formy. V případě levnějších a jednodušších forem jsou tvárník a tvárnice vytvořeny přímo v deskách formy. Tvárnice tvaruje hlavní vnější tvary výrobku a tvárník formuje vnitřní geometrii [51].

Nejčastěji je tvárník v pohyblivé části formy (levá), která je upnuta na pohyblivé desce uzavírací jednotky vstřikovacího stroje. V pohyblivé části formy je umístěn i vyhazovací systém. Běžně se jedná o sestavu pohyblivých desek, ve kterých jsou upnuty vyhazovací kolíky procházející deskami formy až do samotné tvarové vložky. Celý systém je na konci vstřikovacího cyklu (otevřená forma) aktivován, přes spojovací tyč, vstřikovacím strojem (nejčastější způsob) nebo samostatným systémem.

Tvárnice je potom upevněna v pravé části formy (rozuměj z pohledu obsluhy vstřikovacího stroje), jinak pevná část formy. Zde je také umístěna nejdůležitější část rozvodného systému taveniny, vtoková vložka, v případě studeného vtokového systému nebo vytápěná vložka nebo rozvaděč při použití vytápěného vtokového systému. Přes vtokovou vložku se připojuje vstřikovací jednotka vstřikovacího stroje a vstříknutá tavenina je skrze vtokovou vložku a rozvodné kanály dovedena až do dutiny formy. Popis jednoduché formy je na *Obr. 3.1*.



Obr. 3.1: Popis dvoudeskové formy [53].

Vstřikovací formy lze podle provedení rozdělit podle:

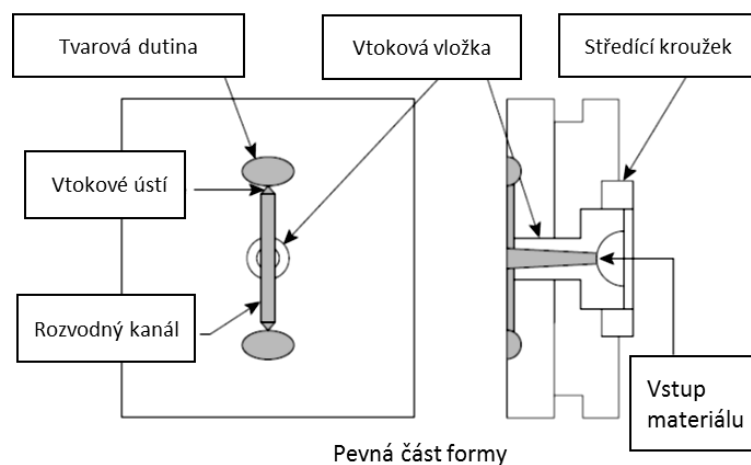
- násobnosti na jednonásobné a vícenásobné;
- způsobu zaformování a konstrukčního řešení na formy dvoudeskové, třídeskové, etážové, čelist'ové a vytáčečí;
- konstrukce vstřikovacích strojů na formy s vtokem kolmo na dělicí rovinu nebo s vtokem do dělicí roviny;
- způsobu vyhazování výstřiků na formy s mechanickým vyhazováním, s pneumatickým vyhazováním, se stírací deskou, s kombinovaným vyhazováním;

- použitého vtokového systému na formy se studeným vtokovým systémem (SVS) a s vytápěným vtokovým systémem (VVS) [54].

3.1.2 Vtokový systém

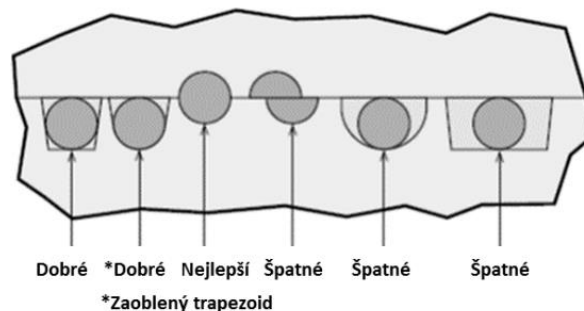
Každý typ formy obsahuje určitý druh vtokového systému, ten slouží k rozvodu taveniny od trysky vstřikovacího stroje do tvarové dutiny formy. Součástí každého vtokového systému jsou vtoková vložka, rozvodné kanály a vtoková ústí. Ty mohou být studené nebo vyhříváné včetně jejich kombinace.

Vtoková vložka je spojnicí vstřikovacího stroje a formy. Tryska vstřikovací jednotky stroje napojena na vtokovou vložku, umožňující tok taveniny do rozvodných kanálů a následně přes vtokové ústí do tvarové dutiny. Ve většině případů je vtoková vložka umístěna v pevné části formy *Obr. 3.2* [51].



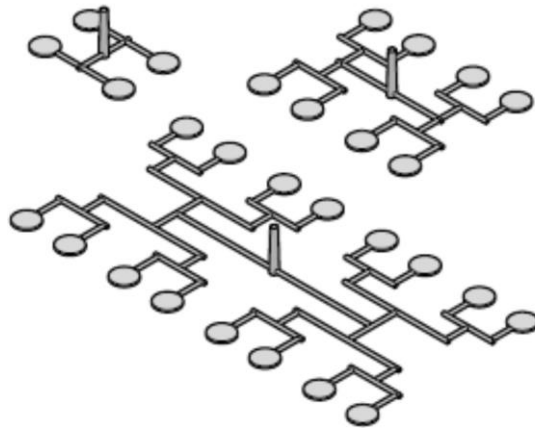
Obr. 3.2: Funkce vtokové vložky [51].

Rozvodné kanály zajišťují rozvod taveniny od vtokové vložky ke vtokovému ústí. U studeného vtokového systému se jedná o vyfrézovanou drážku, do desky formy nebo tvarové vložky, ideálně kruhového průřezu nebo tvaru „U“ (*Obr. 3.3*). U vícenásobných forem je další funkcí rozvodových kanálů rovnoměrný tok taveniny k jednotlivým tvarovým dutinám tak, aby došlo k jejich naplnění současně – vyvážený vtokový systém, *Obr. 3.4*. Tuto funkci plní spolu s vtokovým ústím.

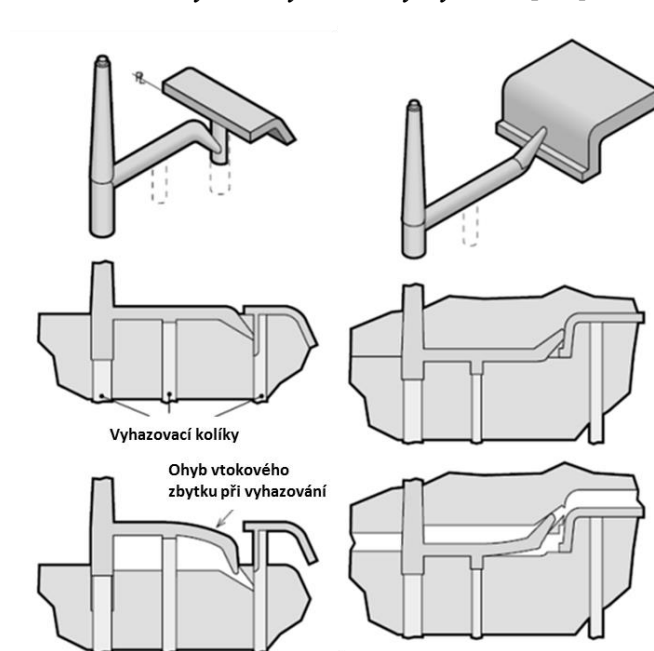


Obr. 3.3: Kruhový průřez rozvodných kanálů poskytuje nejefektivnější tok [53].

Vtokové ústí je zakončením rozvodného kanálu a přivádí taveninu přímo do tvarové dutiny. Vtokové ústí je navrženo tak, aby umožnilo naplnění dutiny požadovanou rychlostí a objemem za kontrolovaných podmínek. Teoreticky je možné naplnit dutinu jakékoliv velikosti a tvaru pouze jedním vtokovým ústím, ale někdy je nutné optimalizovat tok taveniny a plnicí profil více vtokovými ústími [51]. Existuje mnoho typů a řešení vtokových ústí. Ideální řešení je takové, které při vyhození dílu z formy zároveň oddělí vtokovou soustavu od výrobku. Mezi tato řešení patří například tunelové vtoky. Jejich funkce je zobrazena na Obr. 3.5.



Obr. 3.4: Vyvážený vtokový systém [53].



Obr. 3.5: Princip oddělení tunelových vtoků ústících do dutiny v pohyblivé a pevné části formy [53].

3.1.3 Temperační systém

Po vstříknutí taveniny do dutiny formy, se ochlazuje a tuhne, aby bylo možno hotový výrobek vyhodit z formy bez nežádoucích deformací [51]. Z důvodu

nízké tepelné vodivosti polymerů, představuje chlazení obvykle nejdelší úsek vstřikovacího cyklu. Je proto nezbytné, aby byl temperační systém dobře navržen. Dobře navržený a provedený systém chlazení formy zajišťuje požadovanou teplotu formy, rovnoměrné chlazení a krátké časy celého vstřikovacího cyklu [53]. Naproti tomu nevhodný temperační systém formy má za následek různé teploty dutiny formy a ty vedou k rozdílnému tuhnutí a smrštění dílu a tím k deformacím, zvýšeným zbytkovým napětím a rozměrovým problémům výsledného produktu [53].

Plasty obecně jsou dobrými tepelnými izolanty. Rychlost odvodu tepla z taveniny je závislá na tepelné vodivosti materiálu formy a na tloušťce stěny plastového dílu. Čas chlazení je funkcí druhé mocniny tloušťky stěny výrobku (dvojnásobná tloušťka stěny prodlouží čas chlazení čtyřikrát) [53].

Nejčastěji je temperační systém formy tvořen soustavou vrtaných kanálů v deskách formy, kterými proudí chladící medium. Obvykle je chladící medium voda nebo olej, jsou-li požadovány vysoké teploty formy. Požadovaný směr toku chladícího media zajišťují ucpávky, přepážky nebo další z mnoha komponent umožňujících směřování toku. Je důležité, aby byly všechny tvarové dutiny chlazené shodným průtokem chladícího media. Je-li rozdíl mezi vstupní a výstupní teplotou chladícího media mezi 1-5 °C pracuje temperační systém správně. Čím vyšší průtok media, tím vyšší odvod tepla z dutiny formy [51][52].

Důležitou podmínkou pro efektivní temperační systém formy je typ proudění temperačního media v chladícím okruhu formy. Cílem je dosáhnout turbulentního proudění, kdy kapalina víří v kanálu a zajišťuje tak neustálý kontakt čerstvé chladící kapaliny s horkou stěnou chladícího kanálu a tím odebírá větší teplo. Turbulentní proudění je definováno Reynoldsovým číslem (Re) [52]:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (3.1)$$

Kde ν je rychlost chladící kapaliny (m/s), D je průměr kanálu (m) a ν je kinematická viskozita chladící tekutiny (m²/s).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.2)$$

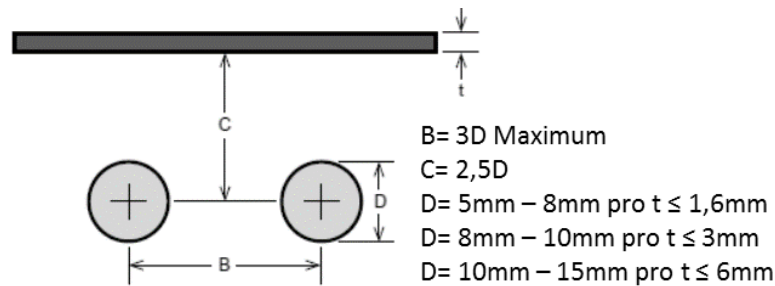
Kde μ je absolutní viskozita chladící kapaliny (kg/m·s) a ρ je její hustota (kg/m³). Rychlost kapaliny lze vypočítat z objemového průtoku:

$$v = \frac{\dot{V}}{A} \quad (3.3)$$

Kde \dot{V} je objemový průtok (m³/s) a A je průřez kanálu (m²). Reynoldsovo číslo vyšší než 4000 ukazuje na turbulentní proudění. Čím vyšší číslo, tím lepší efektivita chlazení. Pro dobré chlazení by mělo být požadováno 10 000 < Re < 20 000 [52].

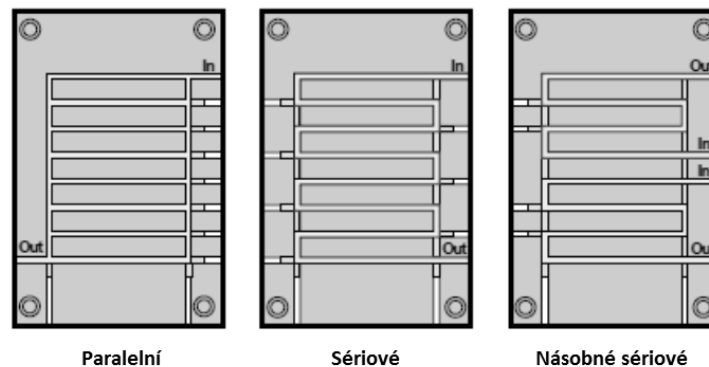
Vedle výše zmíněných podmínek je dalším parametrem ovlivňujícím efektivitu chladícího systému formy pozice a konfigurace chladících kanálů. Pozicí

chladících kanálů je myšlena vzdálenost od stěny tvarové dutiny a konfigurací výsledný tvar chladícího kanálu a tím průtok jednotlivými komponenty formy. Obecné doporučení vzdálenosti chladícího kanálu od stěny dutiny formy je zobrazeno na *Obr. 3.6*.



Obr. 3.6 Doporučené vzdálenosti a průměry kanálů temperačního systému formy [53].

Základní konfigurací vrtaného chladícího okruhu formy je sériové nebo paralelní uspořádání, případně jejich kombinace, *Obr. 3.7*.



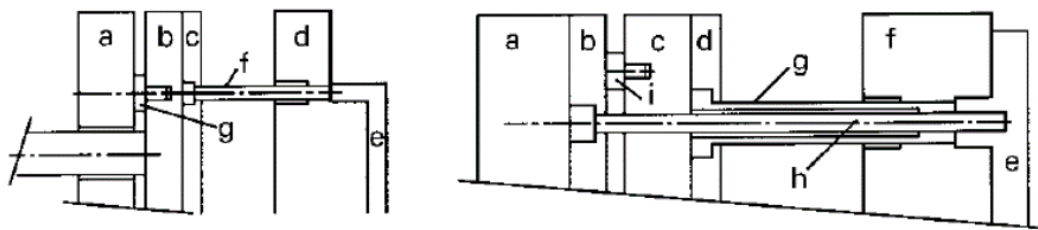
Obr. 3.7: Uspořádání chladících okruhů [53].

Paralelní chladící okruh rozděluje chladící kapalinu do jednotlivých větví okruhu rovnoměrně, ovšem za předpokladu shodného poklesu tlaku ve všech větvích. Tzn. že do každé větve chladícího okruhu je přivedena stejně chladná kapalina. Nevýhodou tohoto řešení je, že malá změna průtokových poměrů jednotlivých větví má za následek velké změny v průtoku chladiva a může být zdrojem problémů chlazení. Sériový okruh zajišťuje konstantní průtok kompletním chladícím okruhem. Nevýhodou bývá, zejména u dlouhých okruhů, velký nárůst teploty chladící kapaliny a tím snižující se účinnost. Tento problém se řeší rozdělením okruhu na více kratších úseků [51][52][53].

3.1.4 Vyhazovací systém

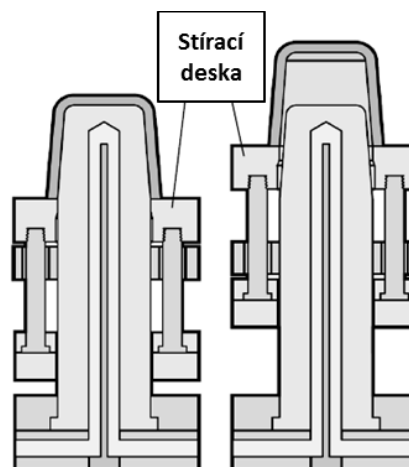
Termoplasty, podobně jako většina materiálů, během chladnutí zmenšují svůj objem, smršťují se. Proto přilnou pevně na tvárník a je potřeba z tvarové dutiny nějakým způsobem vyhodit. Spolu s výrobkem je nutno odstranit vtokové zbytky (v případě studeného vtokového systému). K tomuto účelu slouží vyhazovací systém formy [55].

Vyhazovací systém je zpravidla umístěn v pohyblivé polovině formy a skládá se z vyhazovacích desek, ve kterých jsou ukotveny vyhazovače, desky se pohybují na vodících tyčích. Vyhazovače jsou ve většině případů kolíky, nejčastěji válcové, které jsou vedeny v deskách formy a tvarových vložkách. K vyhazovacímu systému patří i přidržovač vtoku, ten zajišťuje, aby byl zbytek vtokové soustavy, resp. polymeru vyplňujícího vtokovou soustavu, stále na požadované straně formy. Během vyhazovací části cyklu jsou kotevní a opěrná deska vyhazovacího systému uvedeny do pohybu přes táhlo spojené se vstřikovacím strojem. Vyhazovače se vysunou z povrchu dutiny formy a vytlačí výrobek společně s vtokovým zbytkem z tvarové dutiny a dělicí roviny Obr. 3.8 [51][52][53][56].



Obr. 3.8: Příklad vyhazovacího systému s válcovými vyhazovači (vlevo): (a) upínací deska, (b) opěrná deska vyhazovače, (c) kotevní desky vyhazovače, (d) kotevní (tvarová) deska formy, (e) výstřik, (f) válcový vyhazovač, (g) distanční podložka. Příklad vyhazovacího systému s trubkovými vyhazovači (vpravo): (a) upínací deska, (b) přidržovací deska vyhazovače, (c) opěrná desky vyhazovače, (d) kotevní deska vyhazovače, (e) výstřik, (f) kotevní (tvarová) deska formy, (g) trubkový vyhazovač, (h) válcový kolík, (i) distanční podložka [52].

Existuje nepřehledné množství řešení vyhazovacích systémů, všechny jsou vytvořeny speciálně pro danou aplikaci. Lze najít systémy se samostatným pohybovým systémem ať hydraulickým, pneumatickým nebo elektrickým, je možno využívat mnoha druhů vyhazovacích kolíků, od plochých (prismatických) nebo trubkových vyhazovačů až po segmentové vyhazovače a stírací desky, Obr. 3.9, a mnohé jiné. Samostatnou kapitolou by pak mohly být vytáčetní mechanismy, které se používají hlavně při vstřikování výrobků se závitem [51][52][53][56].



Obr. 3.9: Princip funkce stírací desky [53].

3.1.5 Materiály forem

Na výrobu jednotlivých částí formy se používají různé druhy materiálů, ty jsou voleny podle funkce, jakou má daná součást ve formě plnit, protože na každou z nich jsou kladeny jiné požadavky. Důležitou roli zde hraje způsob namáhání, kterému bude každý jednotlivý díl formy převážně vystaven (mechanické zatížení, možnost opotřebení, ev. koroze). Vedle toho se uvažuje i životnost formy (požadovaný počet výrobních cyklů) a cena formy. Pro výrobu tvarových dutin a mechanicky namáhaných částí formy se většinou používá ocel nástrojová, cementační nebo legovaná [55]. V *Tab. 3.1* jsou uvedeny příklady ocelí pro výrobu jednotlivých součástí formy.

Tab. 3.1: Rozdělení ocelí při výrobě součástí formy [57].

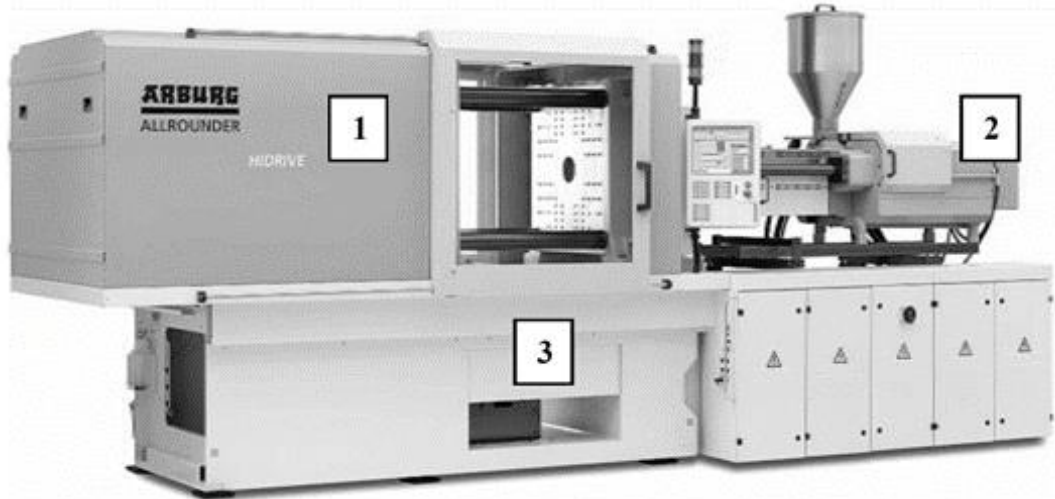
Rozdělení ocelí - místo použití	
Použití	Materiál
Desky (rám formy) Dorazy Táhla Podpůrné elementy Středicí elementy	11 373, 11 375, 11 500, 11 600, 11 700, 12 020, 12 050, 12 060
Tvarové vložky Tvarové desky Vtokové vložky Vyhazovače	14 340, 15 230, 15 330, 15 340, 17 029, 19 083, 19 191, 19 312, 19 314, 19 421, 19 436, 19 437, 19 452, 19 486, 19 487, 19 550, 19 572, 19 573, 19 574, 19 581, 19 642, 19 662, 19 663, 19 665, 19 652, 19 732, 19 786
Vodící a kluzné elementy	14 220, 14 221
Spojovací elementy	11 109, 11 600
Izolační desky	PA + 30% skla, syntetická pryskyřice, sklotextit

Vedle ocelí, se při stavbě forem uplatňují i jiné materiály, jako například hliník, dural, měď, mosaz a nejrůznější izolační a ochranné materiály. Dobrá tepelná vodivost a kluzné vlastnosti slitin mědi předurčují tyto materiály pro výrobu vodících prvků forem nebo pro výrobu částí tvarových dutin s horším dostupností chlazení. Slitiny hliníku jsou preferovaným materiálem např. při výrobě forem pro strukturní pěny nebo tvárníků a tvárnic pro formy malosériové výroby, a to zejména pro svou snadnou obrobitelnost, dobrou tepelnou vodivost, chemickou odolnost a korozivzdornost [58].

Kromě zvoleného materiálu má na životnost formy významný vliv i tepelné nebo chemicko-tepelné zpracování jednotlivých součástí, povrchová úprava (leštěný povrch je odolnější vůči korozi) a také vlastní zacházení s formou [55].

3.2 Vstřikovací stroj

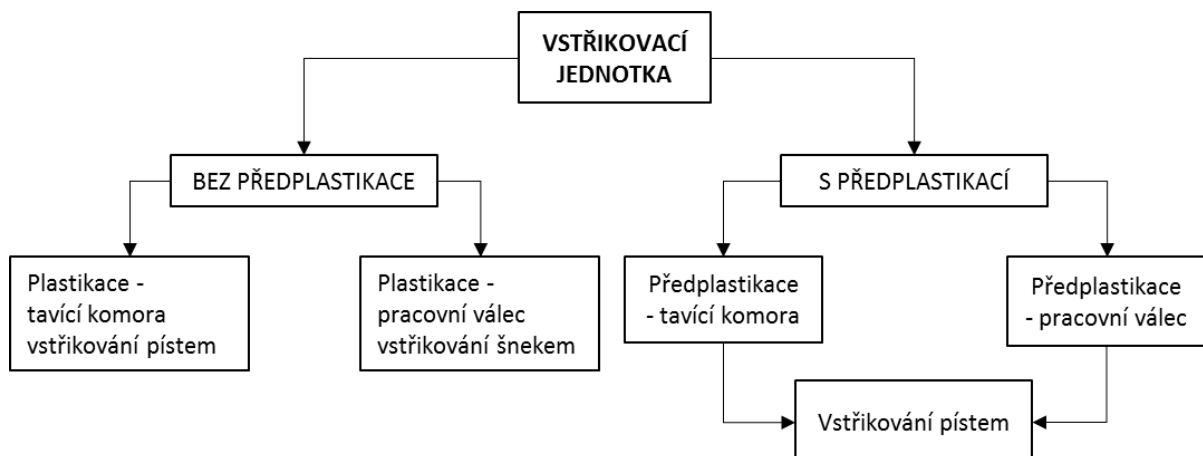
Celý vstřikovací cyklus realizují vstřikovací stroje, těch existuje celá řada konfigurací. Všechny musí mít vstřikovací jednotku, zajišťuje přípravu taveniny a její vstříknutí do uzavřené formy, a uzavírací jednotku ovládající formu (uzavírání, otevírání, vyhazování výstřiku) [59]. Vstřikováním se dají zpracovávat plasty i elastomery. Vstřikovací stroj a jeho části jsou zobrazeny na Obr. 3.10.



Obr. 3.10: Stroj na vstřikování plastů ARBURG – 1) uzavírací jednotka, 2) vstřikovací jednotka, 3) rám stroje [47].

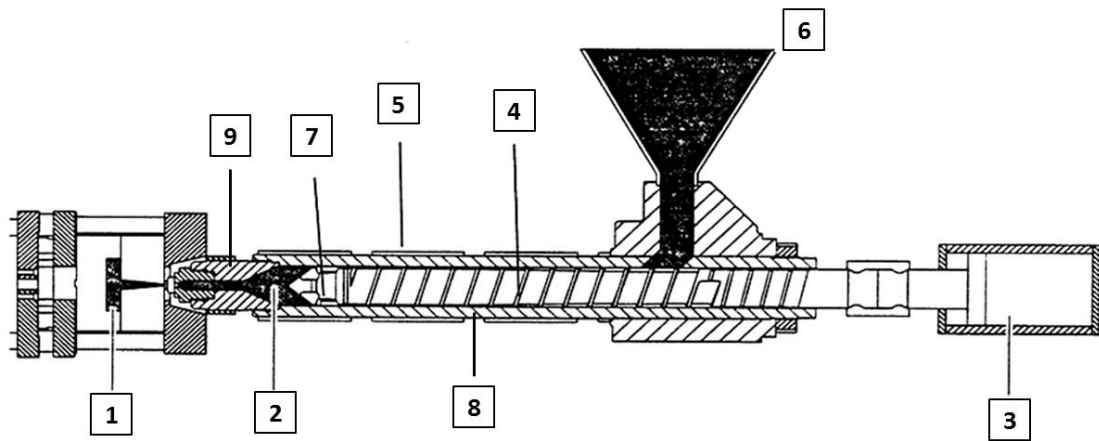
3.2.1 Vstřikovací jednotka

Vstřikovací jednotka plní tři základní funkce. Dávkování materiálu, jeho roztavení – plastikaci a konečné vstříknutí do dutiny formy. Vstřikovací jednotky se běžně dělí podle způsobu plastikace, viz Obr. 3.11 [59].



Obr. 3.11: Rozdělení vstřikovacích jednotek podle způsobu plastikace [59].

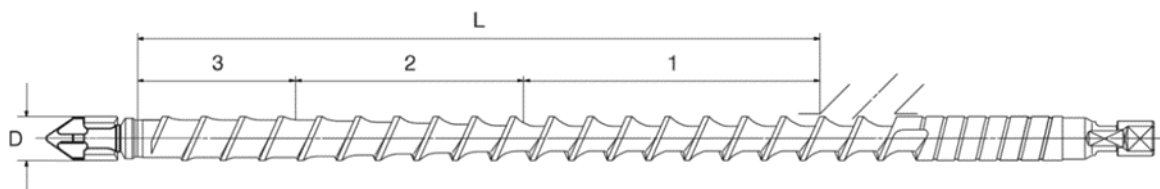
Největší zastoupení na trhu dnes mají vstřikovací jednotky s plastikací v pracovním válci se vstřikováním šnekem. Ostatní typy se používají okrajově. Například jednotky s předplastikací se používají u mikrovstřikování. Na Obr. 3.12 jsou znázorněny základní části vstřikovací jednotky s plastikací v pracovním válci se vstřikováním šnekem.



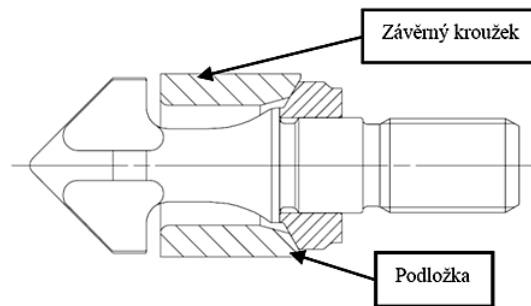
Obr. 3.12: Schéma vstřikovací jednotky - 1) výstřik, 2) dávka materiálu, 3) pohon, 4) šnek, 5) topný element, 6) násypka, 7) zpětný uzávěr, 8) pracovní válec, 9) tryska pracovního válce [60].

V pracovním válci se pohybuje šnek, který plní několik funkcí. Během rotačního pohybu šnek z násypky nabírá materiál (dávkování) ve formě granulí, který se třením a teplem z topných elementů taví, stává se tekutým a je šnekem tlačěn před špičku šneku. Materiál před špičkou odtlačuje šnek zpět a tato fáze končí, když je před šnekem požadované množství polymeru. Následuje vstříknutí polymeru do dutiny formy, kdy se šnek posune ve směru své osy.

Celý tento proces je umožněn speciální konstrukcí plastikačního šneku a jeho špičky, viz Obr. 3.13 a Obr. 3.14. Hloubka šnekového kanálu se snižuje směrem ke špičce a vytvořená tavenina protéká přes zpětný uzávěr (Obr. 3.12 a Obr. 3.13) před špičku šneku. Zpětný uzávěr tvoří závěrný kroužek a těsnicí podložka (Obr. 3.14). Závěrný kroužek se volně pohybuje mezi špičkou a podložkou v ose šneku. Během dávkovací fáze, kdy se celý šnek pohybuje dozadu, se závěrný kroužek posune ke špičce a polymer může proudit mezerou mezi závěrným kroužkem a podložkou. V okamžiku výstřiku se šnek posune rychle dopředu, závěrný kroužek dosedne na podložku a tlakem taveniny je prostor mezi kroužkem a podložkou utěsněn. Tím je zabráněno k protékání taveny zpět do komory. Dopředným pohybem se zároveň šnek přemění v píst, který tlačí taveninu do dutiny formy.



Obr. 3.13: Plastikační šnek – zóny 1) dávkovací, 2) kompresní a 3) výstupní [60].

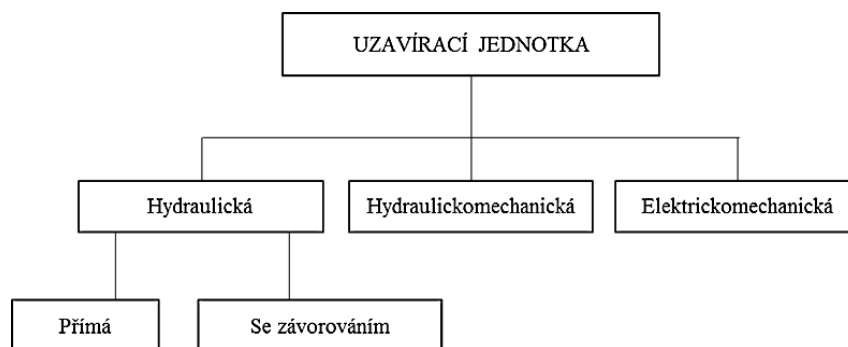


Obr. 3.14: Špička plastikačního šneku se zpětným uzávěrem [60].

3.2.2 Uzavírací jednotka

Uzavírání a otevírání formy zajišťuje uzavírací jednotka vstřikovacího stroje. Ta se skládá ze dvou desek, z nichž jedna je pohyblivá a druhá pevná. Na desky se upíná forma. Levá strana formy se upíná na pohyblivou desku, která obsahuje vyhazovací mechanismus. Dále jsou součástí zavírací jednotky vodící elementy a pohon zavírací jednotky.

Podle druhu pohonu lze uzavírací jednotky rozdělit na hydraulické, hydraulickomechanické a elektromechanické (Obr. 3.15).

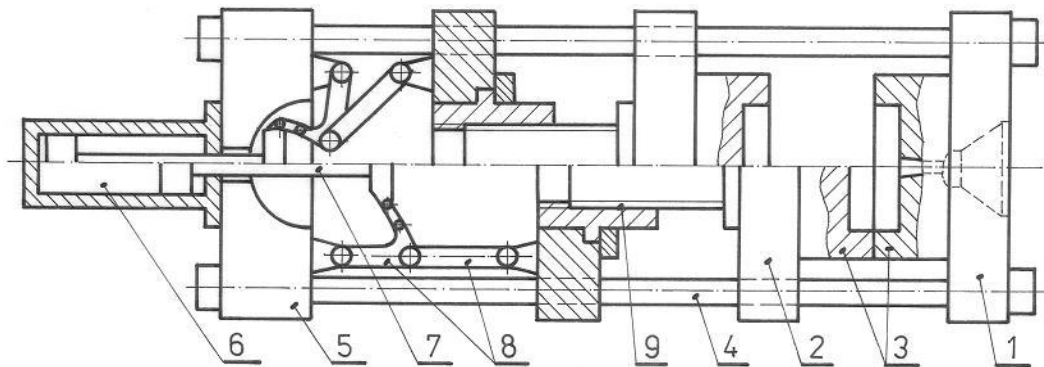


Obr. 3.15: Rozdělení uzavíracích jednotek vstřikovacích strojů [59].

Dříve převládaly uzavírací jednotky s hydraulickými pohony vzhledem ke své jednoduché konstrukci, spolehlivosti a ceně. Konkrétní konstrukční řešení vychází především z velikosti uzavírací síly. Hydraulickomechanické pohony se uplatňovaly a stále se používají pro malé až střední velikosti uzavírací síly. Jedná se o hydraulický válec, který ovládá jednoduchý nebo složený kloubový mechanismus (Obr. 3.16).

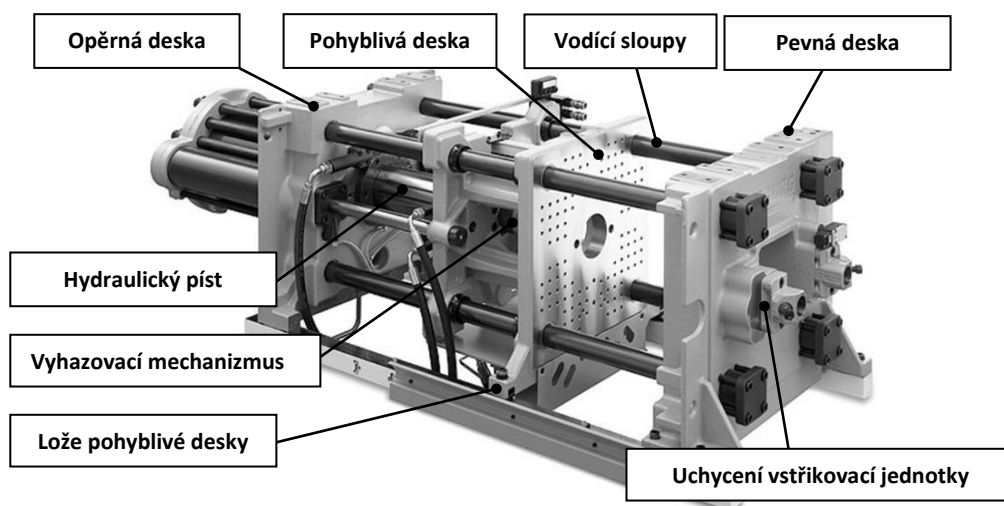
Uzavírací síla se nastavuje pouze regulací vzdálenosti pohyblivé části formy, resp. přesahu přes dělicí rovinu – předepnutí kloubového mechanismu.

Výhodou kloubových mechanismů je jejich tuhost při vystavení uzavírací síly a průběh rychlosti uzavírací jednotky během zavírání a otevírání formy, kdy se rychlost na koncích dráhy pohybu plynule snižuje až na nulu, bez nutnosti nastavování rychlostních profilů. Nevýhodou je potom vyšší cena, poměrně náročná údržba a u strojů s manuálním nastavováním uzavírací síly komplikovanost tohoto procesu.



Obr. 3.16: Hydraulickomechanický pohon uzavírací jednotky se složeným kloubovým mechanizmem a hydraulickým válcem v ose stroje: 1) pevná upínací deska, 2) pohyblivá upínací deska, 3) vstřikovací forma, 4) vodící tyče, 5) nosný třmen, 6) hydraulický válec, 7) pístní tyč, 8) kloubový mechanizmus, 9) seřizovací šroubový mechanizmus [59].

Přímý hydraulický mechanizmus je stále asi nejpoužívanější systém uzavírání formy a používá se od malých až po velké uzavírací síly (Obr. 3.17). Uzavírací sílu zde vyvolává přímo hydraulický válec a ta je regulována velikostí tlaku v hydraulickém okruhu. Pro rychlé pohyby uzavírací jednotky se obvykle používá hydraulického válce s malým průměrem a pro vystavení uzavírací síly potom válec s průměrem mnohem větším. Nevýhodou tohoto systému je především energetická náročnost a potřeba velkého množství hydraulického oleje a velikost hydraulického válce pro velké zavírací síly. Výhodou je potom možnost regulace zavírací síly a rychlosti uzavírací jednotky a ceny systému.



Obr. 3.17: Hydraulická zavírací jednotka strojů ARBURG typu C [47].

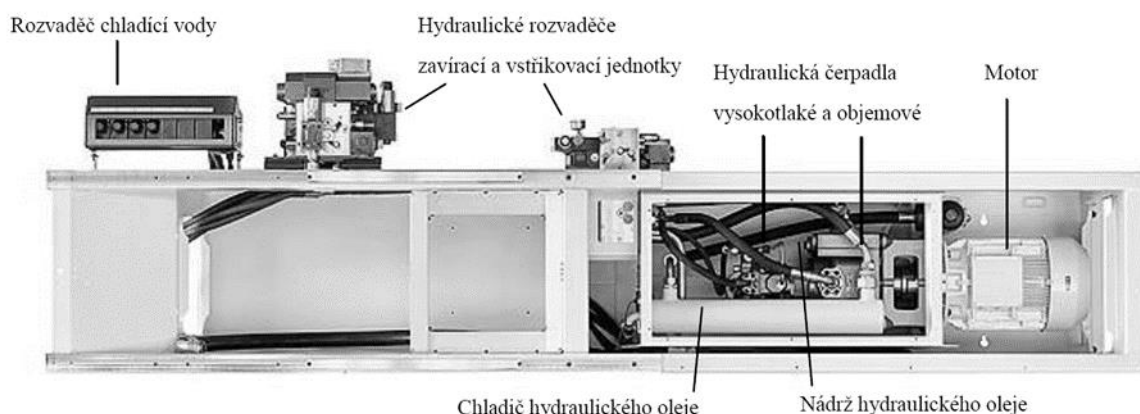
Hydraulické uzavírací jednotky se závorováním v dnešní době nacházejí své uplatnění především u strojů s vysokou zavírací silou. Pro pohyb uzavírací jednotky se používá, podobně jako u přímého hydraulického systému, hydraulický válec s malým průměrem. Pohyblivá deska se pohybuje na kluzném loži a ozubených vodících sloupech. Pro vystavení uzavírací síly se potom využívá samostatných hydraulických válců s velkým průměrem a malým zdvihem, umístěný-

mi na koncích vodících sloupů, spolu s hydraulickými čelistmi, které jsou umístěny na pohyblivé desce v místě vodících sloupů. V okamžiku vystavení uzavírací síly se čelisti sevřou a zapřou se o ozubení vodících sloupů. Vodící sloupy se po-tom díky hydraulickým válcům na svých koncích pohnou. Sloupy v tu chvíli plní funkci pístu.

Elektromechanické uzavírací jednotky jsou obdobou hydraulickomechanického pohonu uzavírací jednotky, s tím rozdílem, že pohyb zajišťuje elektromotor s vhodným typem transformačního mechanismu, nejčastěji tvořený kuličkovým šroubem. Tento druh pohonu stále více nahrazuje pohony hydraulické, a to především díky své účinnosti, přesnosti a rychlosti. Výhody jsou podobné, jako u hydraulickomechanických pohonů. Nevýhodou je potom jejich cena a náročnost na údržbu.

3.2.3 Rám stroje

Rám zajišťuje celkovou tuhost konstrukce stroje a obsahuje veškeré pomocné a řídicí systémy nutné pro správnou funkci vstřikovacího stroje. Jeho součástí je elektrický rozvaděč s řídicími a silovými obvody. V případě hydraulických nebo hybridních vstřikovacích strojů je v rámu ukryta nádrž na hydraulický olej včetně čerpadel (*Obr. 3.18*). V neposlední řadě je v rámu umístěno mnoho periferních zařízení jako např. třídící klapky nebo dopravníky [46].



Obr. 3.18: Rám hydraulického vstřikovacího stroje [47].

3.3 Vstřikovací cyklus

Sled na sebe navazujících sekvencí během vstřikovacího procesu se nazývá vstřikovací cyklus, viz *Obr. 3.19*. Celý proces začíná uzavřením formy (a), která je upevněna na vstřikovacím stroji. Následuje příjezd vstřikovací (plastikační) jednotky (b) a následuje vstříknutí polymeru do dutiny formy (c). Po naplnění dutiny formy je aplikován dotlak, aby se kompenzovalo smrštění materiálu a následuje dávkování (plastikace) materiálu ve vstřikovací jednotce (d). Po dávkování odjíždí vstřikovací jednotka (e) a po uplynutí doby chlazení se forma

otevře a výrobek je z dutiny formy vyhozen za pomoci vyhazovačů (f) [43]. Časový diagram vstřikovacího cyklu je znázorněn na Obr. 3.20.

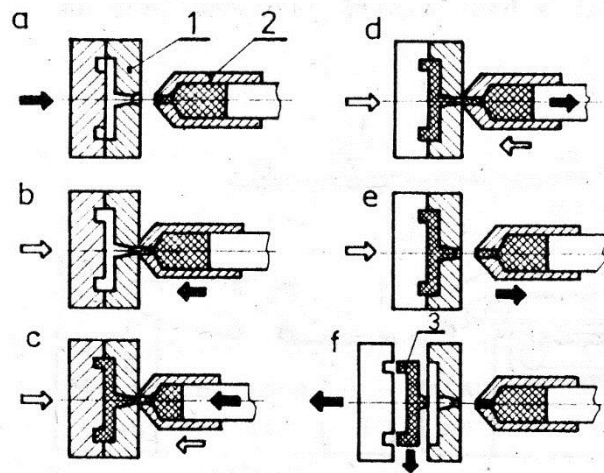
Z Obr. 3.20 je zřejmé, že převážnou část celého cyklu zabírá chlazení výrobku v dutině formy. Čas chlazení je závislý na tloušťce stěny výrobku a dá se odhadnout, pro výrobky s tloušťkou stěny h použitím rovnice:

$$t_{cooling} = \frac{h^2}{\pi\alpha} \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \frac{T_m - T_w}{T_D - T_w} \right) \quad (3.4)$$

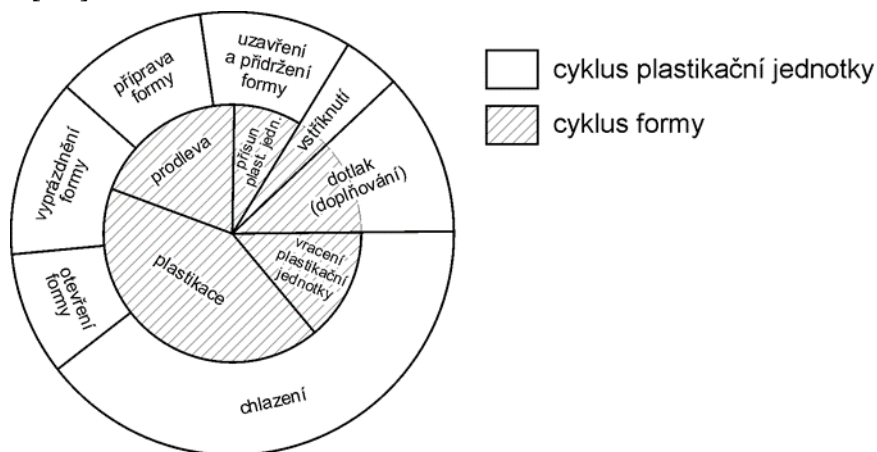
a pro válcové tvary s průměrem D potom rovnicí upravenou

$$t_{cooling} = \frac{D^2}{23,14\alpha} \ln \left(0,692 \frac{T_m - T_w}{T_D - T_w} \right), \quad (3.5)$$

kde T_m je teplota taveniny, T_w je teplota stěny dutiny formy, T_D průměrná teplota při vyhození z formy a α udává součinitel teplotní vodivosti [43].



Obr. 3.19: Sekvence vstřikovacího cyklu: 1) forma, 2) vstřikovací jednotka, 3) výstřík [59].



Obr. 3.20: Časový diagram vstřikovacího cyklu při vstřikování plastů (u termoplastů odpadá příprava formy) [62].

3.4 Parametry vstřikovacího cyklu

Každá fáze vstřikovacího cyklu je ovládaná skupinou parametrů, které se dají nastavit na vstřikovacím stroji. Tyto parametry lze rozdělit do dvou skupin, a to na parametry ovládající pouze pohyby jednotlivých částí vstřikovacího stroje a parametry ovládající samotný proces vstřikování.

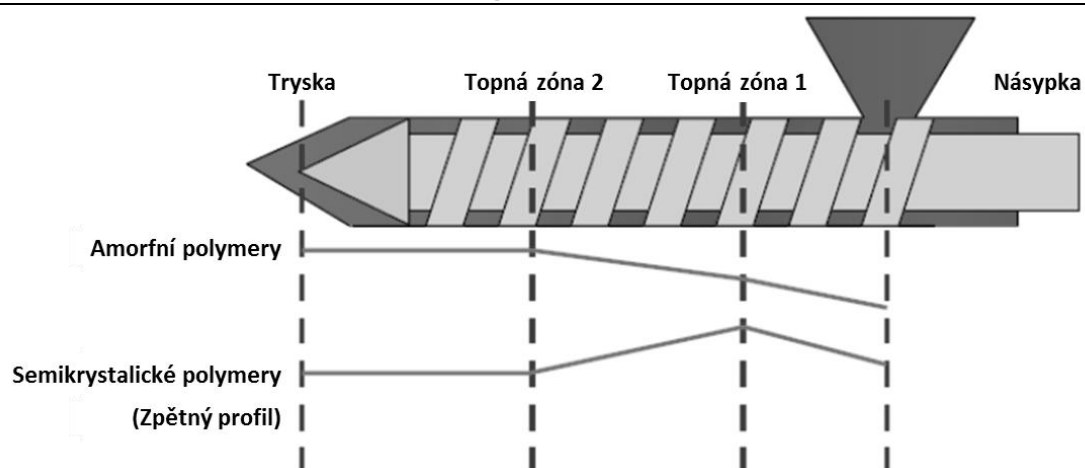
Do první skupiny můžeme zařadit parametry uzavírací jednotky, jako rychlost a dráha uzavírání a otevírání formy a velikost uzavírací síly formy. Dále parametry vyhadzovací jednotky, rychlost a síla vyhadzování, počet opakování, délka vyhadzování a podobně. U vstřikovací jednotky patří do této skupiny rychlost a dráha příjezdu a odjezdu a přítlačná síla vstřikovací jednotky na formu.

Druhá skupina parametrů je důležitá pro samotnou kvalitu výsledného produktu. Tyto parametry mají přímý vliv na výslednou strukturu polymeru, mechanické vlastnosti a rozměrovou stabilitu konečného výrobku. Většina těchto parametrů je spojena se vstřikovací jednotkou a procesem plastikace – tavení polymeru. Jedná se o teploty trysky a pracovního válce a jejich profil, otáčky šneku při dávkování a vstřikovací rychlost. Důležitým parametrem vstřikovací formy je teplota formy, která ovlivňuje čas chlazení. Velikost dotlaku je potom specifický parametr, který je velice důležitý pro výslednou kvalitu výstřiku, ale nesouvisí přímo s plastikací.

3.4.1 Teplota pracovního válce

Teploty pracovního válce a jejich profil jsou parametry kritické zvláště pro semikrystalické polymery. Semikrystalické polymery potřebují hodně energie, aby se roztavily, proto se obvykle nastavuje teplota druhé zóny od násypky na vyšší teplotu, než jsou teploty následující, tak aby se inicializovalo tavení polymeru. Semikrystalické polymery jsou ale také velmi často citlivé na dlouhodobé teplotní zatížení, proto jsou teploty dalších zón sníženy. To vytváří typický teplotní profil s maximem ve střední části, viz *Obr. 3.21* [1][49].

U amorfních polymerů není takového nastavení profilu třeba, vzhledem k jejich menší citlivosti na dlouhodobé vysoké teploty a menší energii potřebné pro roztavení. Vedle teplotního profilu pracovního válce je dalším důležitým parametrem teplota trysky pracovního válce. Ta musí být nastavena tak, aby tavenina v trysce nezatuhla a zároveň aby během odjetí vstřikovací jednotky nedocházelo k samovolnému vytékání taveniny z plastikačního válce [1][49].



Obr. 3.21: Profil teplot pracovního válce pro amorfni a semikrystalické polymery [1].

3.4.2 Rychlost otáčení šneku – dávkování

Topné pásy vyvíjejí teplo z vnější strany pracovního válce, a protože jsou polymery obecně špatné vodiče tepla, materiál blíže šneku potřebuje další přidané teplo, aby se roztavil. Dodatečné teplo dodává smykové tření vytvářené rotujícím šnekem při dávkování. Vysoká rychlost otáčení generuje velké tření a tím i velké množství energie potřebné k roztavení plastu. Na druhou stranu příliš vysoké otáčky vedou k degradaci polymeru a tím k nežádoucím změnám vlastností polymerního materiálu [1][49].

3.4.3 Vstřikovací rychlost

Viskozita polymeru je nepřímo závislá na teplotě taveniny, se vzrůstající teplotou klesá. V okamžiku, kdy je polymer vstříknut do studené formy, jeho teplota klesá a zvyšuje se viskozita. Proto musí mít čelo taveniny vždy vyšší teplotu, než je minimální požadovaná teplota taveniny, aby nedošlo k jeho zatuhnutí. Toho není jednoduché dosáhnout zvláště u semikrystalických polymerů, kde je rozsah teplot zpracování velmi úzký. Tato skutečnost je důvod, proč musí být dutina formy naplněna tak rychle, jak je to jen možné. U amorfni polymerů je možno, vzhledem k poměrně širokému rozsahu zpracovatelských teplot, používat i nižších vstřikovacích rychlostí, do té míry, dokud zůstává čelo taveniny nad minimální procesní teplotou. Toho se využívá například při výrobě optických čoček a jiných optických dílů [1].

3.4.4 Teplota formy

Podobně jako při tavení polymeru při určité teplotě, dochází k jejich tuhnutí za určité teploty. Mluvíme-li o semikrystalických polymerech, polymer přechází do stavu polymerní taveniny při teplotě tání T_m a formovat zpět za teplot krystalizace, obvykle nižších než T_m . Pokud je forma příliš studená, dochází k rychlému zatuhnutí polymeru a krystality nejsou schopny se zformovat. Dochází tak ke změnám vlastností výstřiku. Z tohoto důvodu se musí teplota formy pohybovat ve výrobci materiálu doporučeném rozsahu teplot. U amorfni plastů je

opět rozsah teplot formy mnohem širší, a i nižší teploty formy jsou přijatelné [1].

3.4.5 Doba chlazení

Ve chvíli, kdy je uspořádána krystalická struktura u semikrystalických plastů, získá výstřik potřebnou pevnost a stačí jen malé ochlazení proto, aby mohl být vyhozen z formy. Proto jsou časy chlazení v případě semikrystalických polymerů kratší než u amorfních. Pro ještě kratší časy chlazení se přidávají do některých semikrystalických polymerů nukleační činidla, která zrychlují krystalizaci [1][49].

3.4.6 Dotlak

Dotlak je statická fáze vstřikovacího cyklu následující po vstřiku polymeru do dutiny formy a její naplnění. Na rozdíl od vstřikování, kde je důležitým parametrem rychlost vstřikování a vstřikovací tlak je pouze omezující veličina, u dotlaku je tomu naopak. Určující veličina je v tomto případě tlak a nastavená rychlost stanovuje pouze hranici.

Dotlak zajišťuje dopravu další taveniny do dutiny formy a kompenzuje změny objemu v důsledku smrštění polymeru v dutině formy. Smrštění představuje nežádoucí jev z pohledu dodržení požadovaných rozměrů výstřiku je řešen doplňováním materiálu do dutiny formy i během chlazení výstřiku. Vstřikovací šnek tlačí materiál do dutiny tak dlouho, dokud nedojde k zatuhnutí vtokového ústí. Obvykle se míra zaplnění dutiny formy zjišťuje pomocí hmotnosti výstřiku. Zvyšuje se dotlak, případně čas jeho působení a váží se výstřik. Dokud se jeho hmotnost zvyšuje, pokračuje se v plnění formy. Fáze dotlaku končí při neměnění se hmotnosti výstřiku[1][49].

4 MĚŘENÍ TVRDOSTI

V zásadě existují dva principy měření tvrdosti. Jedna metoda je založena na plastické deformaci materiálu, kdy je do povrchu vtlačován hrot definovaných rozměrů a známých mechanických vlastností (indentor) – indentační metody. Druhá metoda využívá elastické odezvy povrchu materiálu na indentor [63].

Zkoušky tvrdosti lze podle použitého principu rozdělit na [63]:

- Zkoušky vrypové, kdy se tvrdost měří ze šířky vrypu tvrdého hrotu, který je zatížený malou konstantní silou, do broušeného povrchu zkoušeného materiálu.
- Zkoušky odrazové měří tvrdost na základě výšky odrazu kulového hrotu od povrchu zkoušeného materiálu.
- Zkoušky vtiskové určují tvrdost z velikosti a tvaru vtisku indentoru, resp. hloubky vtisku do povrchu zkoušeného materiálu.

Podle aplikovaného zatížení a odezvy materiálu na zatížení dělíme zkoušky tvrdosti na [64]:

- Statické
- Dynamické

U statických zkoušek je indentor do povrchu vzorku vtlačováno předem definovanou silou a rychlostí. Statické zkoušky tvrdosti jsou nejrozšířenější. Do této skupiny patří zkoušky podle Brinella, Rockwella, Vickerse, Berkoviche a Knoop. Indentor nesmí podléhat plastické deformaci (má vysokou tvrdost, Youngův modul a mez pevnosti), proto se na hroty indentorů používá nejčastěji diamant. Hrot indentoru namáhá měřený vzorek ve více osách a výsledná tvrdost je tak ovlivněna materiálovými vlastnostmi vzorku a velikostí zatěžující síly. Výsledky zkoušek se vyhodnocují zobrazovací metodou, kdy se měří rozměry nebo hloubka vtisku [64].

Podle normy ČSN ISO 14577-1 jsou statické zkoušky děleny podle velikosti zatěžující síly a hloubky vtisku na [65]:

- Zkoušky makrotvrdomi – $2\text{N} < F < 30\,000\text{N}$
- Zkoušky mikrotvrdomi – $2\text{N} > F, h > 200\text{nm}$
- Zkoušky nanotvrdomi – $0,1\text{N} > F, h < 200\text{nm}$

Kde F je maximální zatěžující síla a h maximální hloubka vtisku indentoru.

S rozvojem technologie tenkých vrstev a požadavku na měření lokálních mechanických vlastností, byla vyvinuta nová indentační metoda DSI (Depth Sensing Indentation) – Instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti [64].

Mezi dynamické zkoušky se řadí Poldiho kladívko, Shoreho skleroskop nebo duroskop. U těchto zkoušek působí síla na zkušební těleso relativně velkou rychlostí. Tyto zkoušky se nejčastěji používají jako kontrolní [64].

4.1 Vtiskové zkoušky tvrdosti

Vtlačováním indentoru do zkušebního tělesa má za následek jeho plastické a elastické deformace. Vtiskové – indentační zkoušky tvrdosti se používají ke zjišťování tvrdosti [64][66].

4.1.1 Brinellova zkouška tvrdosti

Brinellova zkouška tvrdosti je vtiskovou statickou zkouškou, při které se k určení tvrdosti využívá plastické deformace zkoušeného materiálu. V roce 1900 ji vyvinul švédský metalurg Johan Augustus Brinell [63].

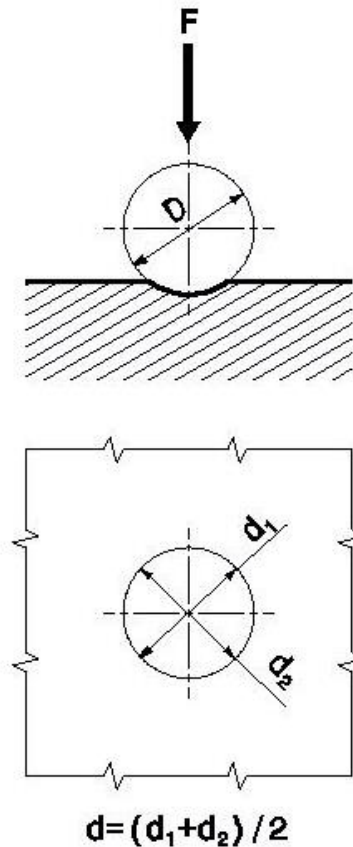
Indentačním tělesem je leštěná kulička ze slinutých karbidů, která je vtlačována do zkoušeného vzorku. Po odlehčení zatížení se měří průměr vtisku. Tato metoda je označována HBW. Dříve používaná metoda s ocelovou kuličkou, označována HBS, není dnes již přípustná. Tvrdost se počítá jako poměr zkušebního zatížení F a kulového povrchu vtisku S vypočítaného ze středního průměru vtisku d (*Obr. 4.1*) [67][68].

$$HBW = \frac{1}{g} * \frac{F}{S}, \quad (4.1)$$

$$HBW = 0.102 * \frac{2 * F}{\pi * D * (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (4.2)$$

kde g je gravitační zrychlení, F je zatěžující síla, S je kulová plocha vtisku, D je průměr indentoru a d střední průměr vtisku. Průměr kuličky je odvozen od tloušťky zkoumaného vzorku, která by měla být alespoň 10krát větší. Kulička je vtlačována do hladkého, rovného a čistého povrchu zkoušeného vzorku silou, která je obvykle v rozmezí $9,807 \div 29,42 \cdot 10^3$ N. Zkušebního zatížení je dosaženo od 2 do 8 sekund a působí po dobu 10 až 15 sekund [69].

Tato zkouška je vhodná ke zkoušení měkkých a středně tvrdých materiálů a díky relativně velké ploše vtisku je možné zkoušet i materiály s heterogenní strukturou [64].

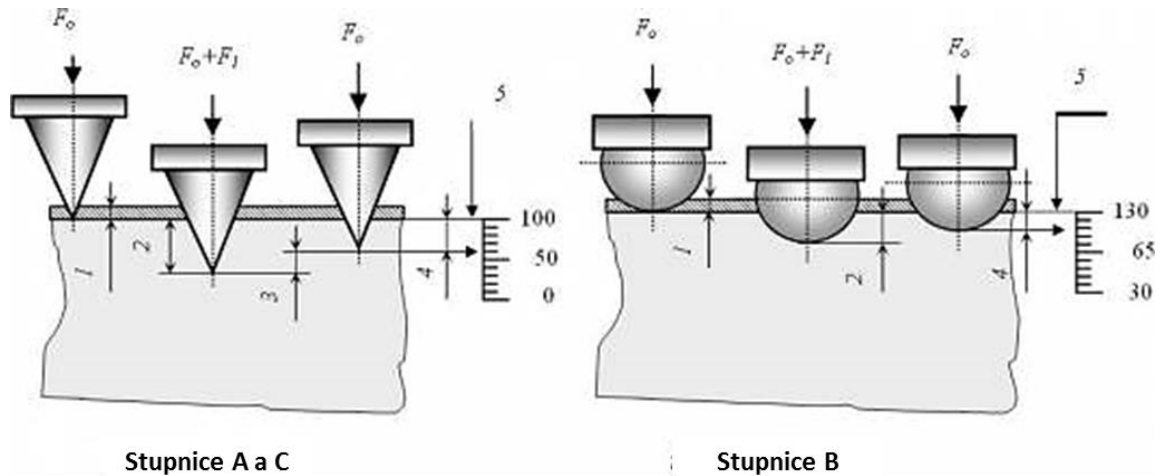


Obr. 4.1: Zkouška tvrdosti podle Brinella HBS, HBW [70].

4.1.2 Rockwellova zkouška tvrdosti

Zkouška tvrdosti podle Rockwella je další ze statických vtiskových zkoušek využívající plastických deformací zkoušeného vzorku po působení indentoru. Tato metoda byla vyvinuta roku 1919 Hugh M. a Stanley P. Rockwellovými [64].

Rockwellova metoda pracuje na obdobném principu, jako Brinellova metoda s tím rozdílem, že využívá předběžného zatížení F_0 . Indentor je silou F_0 vtlačován do zkoušeného vzorku po dobu max. 3 sekundy. Toto zatížení vede k průniku indentačního tělíska do hloubky (1) pod povrch vzorku. Potom je aplikováno přídatné zatížení F_1 , které vmáčkne indentor o hloubku (2) hlouběji do vzorku. Celkové zkušební zatížení F je součtem předběžného zatížení F_0 a zatížení přídatného F_1 . Celkového zkušebního zatížení je dosaženo mezi 1 a 8 sekundami. Celkové zkušební zatížení F působí na vzorek 4 ± 2 s a pak následuje odlehčení na F_0 . Výsledná tvrdost se určuje z hloubky vniknutí indentoru do zkoumaného vzorku po odlehčení přídatného zatížení F_1 z hloubky (4), viz Obr. 4.2 [64][71].



Obr. 4.2: Rockwellova zkouška tvrdosti [71].

Rockwellova metoda měření používá dva geometrické tvary indentorů. Ocelová nebo tvrdokovová kulička s průměrem 1,5875 nebo 3,175 mm je jednou z možností. Druhým tvarem indentoru je kužel s vrcholovým úhlem 120° , ten je vyroben z diamantu.

Hodnoty tvrdosti podle Rockwella mají, vzhledem k více možným indentorům a různým přídatným zátěžným silám, různá značení a specifické výpočty k určení tvrdosti [64][72].

- diamantový kužel - HRA, **HRC**, HRD, HRN,
- kulička - **HRB**, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK, HRT.

Tvrlost se počítá podle následujících vztahů [73]:

$$HRA, HRC, HRD = 0,100 - \frac{h}{0,002}, \quad (4.3)$$

$$HRB, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK = 0,130 - \frac{h}{0,002}, \quad (4.4)$$

$$HRN, HRT = 0,100 - \frac{h}{0,001}, \quad (4.5)$$

kde HRx je tvrdost podle Rockwella a h je hloubka vtisku po odlehčení na F_0 .

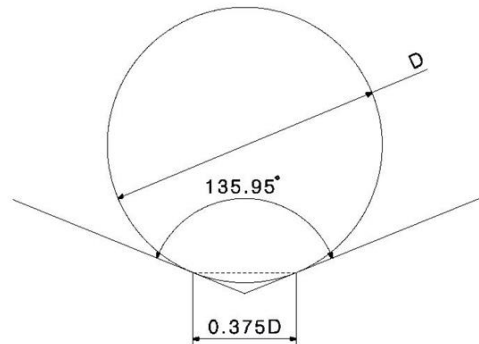
Zásadní výhodou této metody je rychlost určování, kdy se výpočet provádí přímo z hloubky vtisku, která je odečítána na testovacím přístroji. Odpadá tak složité měření otisku indentoru z povrchu zkoušeného vzorku [64][72].

4.1.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

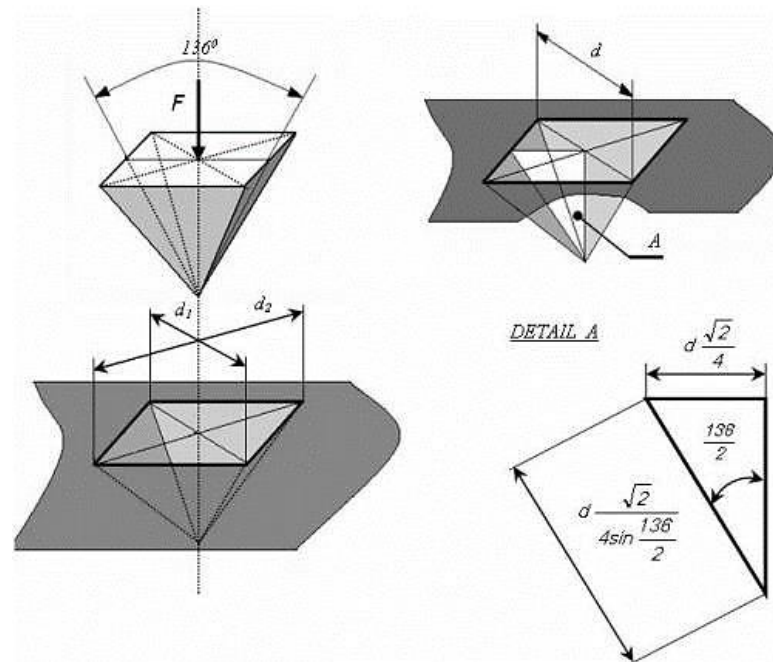
Statická vnikací zkouška tvrdosti podle Vickerse dostala název podle firmy, která sestrojila první tvrdoměr pro tuto metodu. Metodu vyvinuly R.L.Smith a G.E.Sandland v roce 1922 [64][72].

Diamantový Indentor pro Vickersovu metodu má tvar čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem mezi protilehlými stěnami 136° . Tento úhel byl navržen

proto, aby se výsledky zkoušek tvrdosti podle Vickerse co nejvíce blížily výsledkům zkoušek tvrdosti podle Brinella. Kulička o průměru D vtlačovaná do povrchu zkoušeného vzorku během Brinellovy zkoušky vytváří nejčastěji vtisk, který má průměr mezi $0,25D$ a $0,5D$. Průměrná hodnota průměru vtisku je $0,375D$. Tečny ke kružnici o průměru D vedené těživou kružnice o délce $0,375D$ svírají úhel přibližně 136° [64][68].



Obr. 4.3: Odvození vrcholového úhlu Vickersova indentoru [64].



Obr. 4.4: Zkouška tvrdosti podle Vickerse [71].

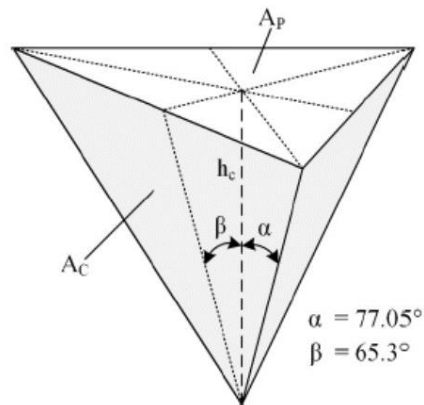
Velikost tvrdosti se počítá jako podíl zatěžující síly F a plochy vtisku A_s . Pro určení plochy se měří uhlopříčka vtisku d . Výsledný vztah má tvar [64][74]:

$$HV = \frac{1}{g} * \frac{2F * \sin \frac{136}{2}}{d^2}, \quad (4.6)$$

kde g je gravitační zrychlení, F zatěžující síla a d je aritmetický průměr měření uhlopříček. Vickersova metoda měření tvrdosti je vhodná pro měření i při velmi malých zatěžujících silách díky nezávislosti tvrdosti na velikosti zatěžující síly [63].

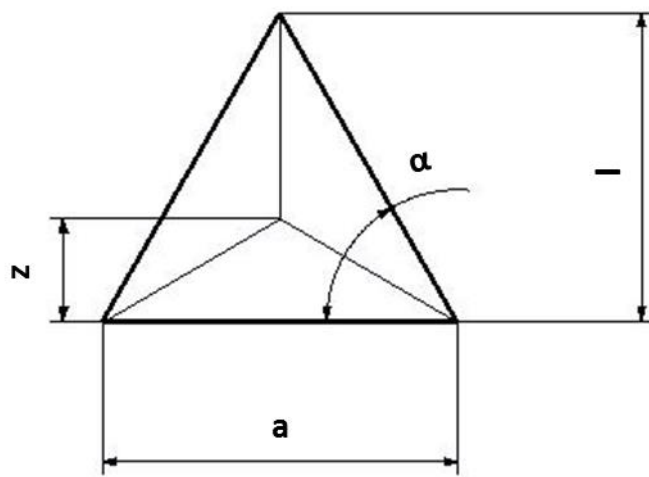
4.1.4 Zkouška tvrdosti podle Berkoviche

Berkovichova zkouška tvrdosti patří mezi statické vnikací zkoušky a využívá diamantového indentoru ve tvaru trojbokého jehlanu s úhlem mezi bočními stěnami a výškou jehlanu 65.3° (Obr. 4.5). Tato geometrie zajišťuje stejný poměr projekční plochy vtisku indentoru vůči hloubce vtisku jako u Vickersova jehlanu [64][72].



Obr. 4.5: Geometrie Berkovichova indentoru [75].

Výhodou Berkovichova indentoru je jednodušší výroba oproti Vickersovu indentoru, kde se musí dodržovat přísná geometrická pravidla sbíhavosti hran jehlanu. Tyto problémy u trojbokého jehlanu odpadají. V současnosti se Berkovichův indentor využívá pro nanoindentační zkoušky tvrdosti [64].



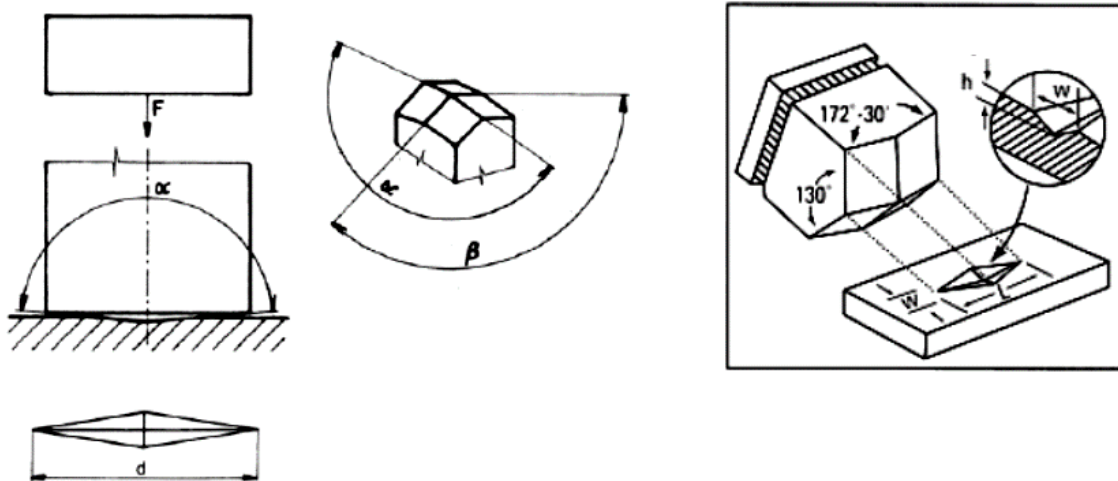
Obr. 4.6: Obraz vtisku Berkovichova indentoru [72].

Tvrdost podle Berkoviche se vypočítá, jako poměr zatěžující síly F a plochy vtisku, kterou získáme změřením výšky trojúhelníku z obrazu vtisku l , viz Obr. 4.6. Platí následující vztah [72]:

$$H_{CH} = 1570 * \frac{F}{l^2}. \quad (4.7)$$

4.1.5 Zkouška tvrdosti podle Knoop

Další statickou vnikací zkouškou tvrdosti je zkouška podle Knoop. Pracuje na stejném principu, jako předchozí zkoušky, s tím rozdílem, že využívá jinou geometrii indentoru. Knoopův diamantový indentor má tvar čtyřstěnného jehlanu, kde protilehlé hrany svírají úhly 172° a 130° . Otisky mají potom tvar kosoúhelníka s poměrem délek hlavní a vedlejší uhlopříčky 1:7,11 a poměrem hlavní uhlopříčky k hloubce vtisku 30:1 (Obr. 4.7) [64][76].



Obr. 4.7: Knoopův indentor a Knoopova zkouška tvrdosti. [77]

Tvrdość podle Knoopa (HK) je vyjádřením poměru zkušebního zatížení k ploše vtisku indentoru [77]:

$$HK = \frac{1}{g} * \frac{F}{d^2 * c}, \quad (4.8)$$

kde g je gravitační zrychlení, F zkušební zatížení, d je délka delší uhlopříčky vtisku a c je geometrická konstanta Knoopova indentoru, která se počítá podle vztahu [77]:

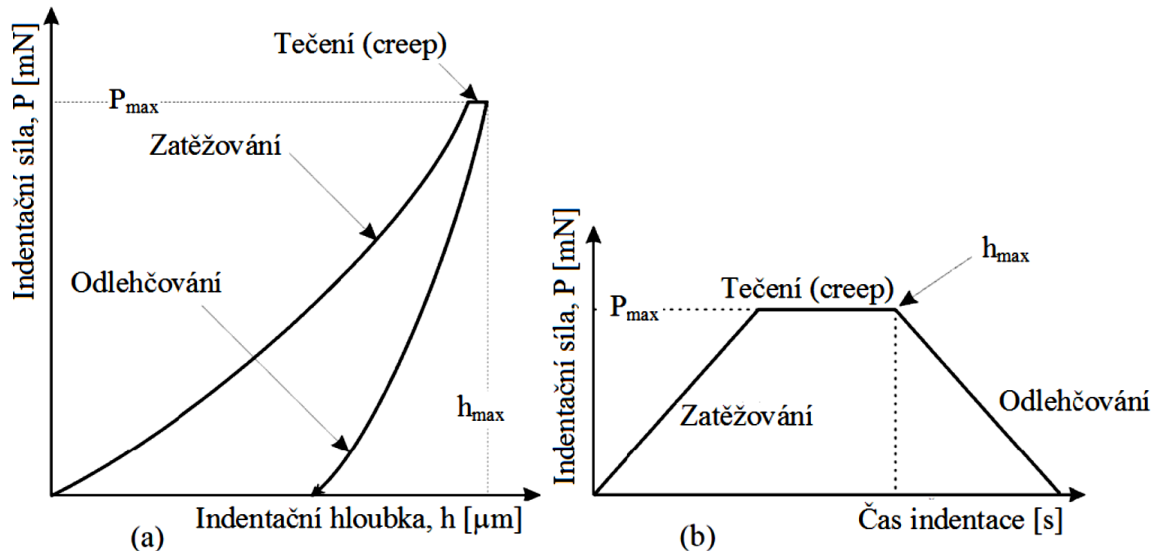
$$c = \frac{\tan \frac{\beta}{2}}{2 * \tan \frac{\alpha}{2}} = 0,07028. \quad (4.9)$$

Knoopův indentor se s výhodou používá pro zjišťování tvrdosti křehkých materiálů [64].

4.1.6 Instrumentovaná zkouška tvrdosti – DSI

Instrumentovaná zkouška tvrdosti byla vyvinuta v souvislosti s rozvojem technologií tenkých vrstev a z nutnosti měření lokálních mechanických vlastností, kde nebylo možno použít klasických zobrazovacích metod vyhodnocování tvrdosti. Metodu vyvinuly sedmdesátých letech dvacátého století, Bulichev a Alekin, ale zásadní vylepšení provedli až Oliver a Pharr. Ti zdokonalili metodologii, sběr dat a analýzy [64][68].

Na rozdíl od předchozích metod, DSI metoda pracuje na principu sledování okamžité změny hloubky vtisku do zkoumaného vzorku a průběhu zkušebního zatížení v průběhu celého měřicího cyklu. Ze sledovaných dat vzniká indentační křivka závislosti zatížení na hloubce vtisku (*Obr. 4.8*). Průběh zkoušky je rozdělen do dvou částí. První částí indentačního cyklu je zvyšování zatěžující síly definovanou rychlostí a část druhá spočívá v řízeném snižování zatěžující síly až na nulovou hodnotu. Mezi tyto fáze se často vřazuje časová prodleva s výdrží na maximální aplikované zatěžující síle, je tak možno měřit creep – tečení materiálu při konstantním zatížení [64][66][76].



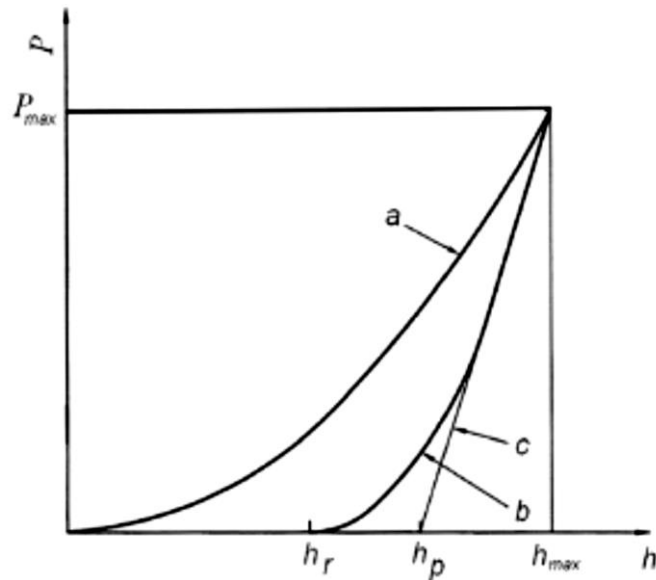
Obr. 4.8: Indentační křivka (a), časový diagram indentační zkoušky (b) [66].

Tvrdoost se obecně definuje jako poměr maximální zatěžovací síly P_{max} a zbytkové kontaktní plochy vytvořené vtiskem indentoru do zkušebního tělesa A_s (stýčná plocha). Platí tedy vztah [78]:

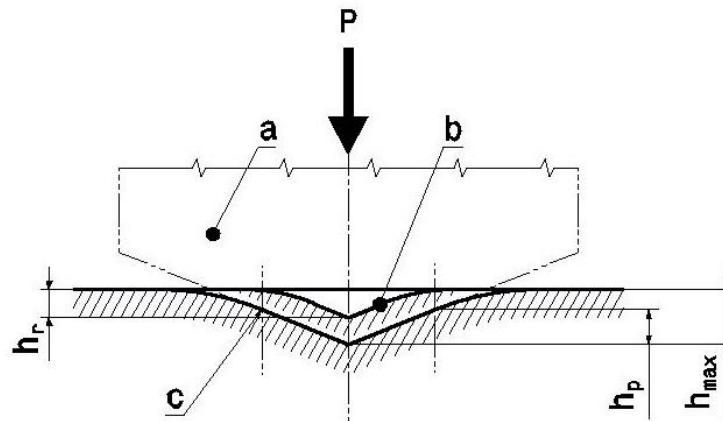
$$H = \frac{P_{max}}{A_s} . \quad (4.10)$$

Metodou DSI je možné, vzhledem k principu a funkci této metody, vypočítat tvrdoost z okamžité hloubky vtisku. Přitom se předpokládá elasticko-plastické zatěžování, zatěžovací křivka *a* na *Obr. 4.9*, a elastické odlehčování indentoru, odlehčovací křivka *b* [68].

Odlehčovací křivka končí v bodě h_r , jedná se o kontaktní hloubku po odlehčení zatížení, označovanou také jako hloubka plastická. Bod h_p představuje hloubku redukovanou, fiktivní, která je průsečíkem sestrojené tečny, na *Obr. 4.9* označena *c*, s osou hloubky vtisku *h*. Výše zmíněné body indentační křivky jsou zobrazeny ve schématickém řezu vtisku, *Obr. 4.10* [68][78].



Obr. 4.9: Schématický průběh indentační křivky: a) zatěžovací křivka; b) odlehčovací křivka; c) tečna ke křivce b v P_{max} [78].



Obr. 4.10: Schématické znázornění příčného řezu vtisku: a) indentor; b) povrch zbytkového plastického vtisku ve zkušební tělese; c) povrch vtisku ve zkušební tělese při maximálním zkušební zatížení [68].

Jako funkce okamžité hloubky vtisku je definována Martenzova tvrdost HM a pro Vickersův indentor platí vztah [68]:

$$HM = \frac{P}{A_s(h)} = \frac{P}{26,43 \cdot h^2}, \quad (4.11)$$

kde P je okamžitá zatěžující síla, A_s je styčná plocha vtisku a h je okamžitá hloubka vtisku. Univerzální tvrdost HU je definována maximálním zatížením P_{max} a tím i maximální hloubkou h_{max} podle vztahu [68]:

$$HU = \frac{P_{max}}{A_s} = \frac{P_{max}}{26,43 \cdot h_{max}^2}. \quad (4.12)$$

Jelikož univerzální tvrdost zahrnuje elastickou i plastickou reakci materiálu na působící zatížení, určuje se samostatně i plastická tvrdost H_{pl} , charakterizující plastickou deformaci materiálu:

$$H_{pl} = \frac{P_{max}}{A_s} = \frac{P_{max}}{26,43 \cdot h_p^2}, \quad (4.13)$$

kde h_p je průsečík tečny, sestrojené k odlehčovací křivce v bodě P_{max} , s osou hloubky vtisku, kterou lze vyjádřit rovnicí:

$$h_p = h_{max} - \frac{P_{max}}{dP/dh}, \quad (4.14)$$

h_{max} je maximální hloubka vtisku při maximální zatěžující síle P_{max} [68].

Nejčastěji používanou je ale vtisková tvrdost H_{IT} . Ta je, stejně jako H_{pl} , mírou odolnosti materiálu vůči trvalé deformaci a poškození. H_{IT} je popsána vztahem [68]:

$$H_{IT} = \frac{P_{max}}{A_p} = \frac{P_{max}}{24,50 \cdot h_p^2}, \quad (4.15)$$

kde A_p je průmět kontaktní plochy indentoru ve vzdálenosti h_p od hrotu, kde h_p je hloubka kontaktu indentoru se zkušebním tělesem při maximálním zatížení P_{max} (kontaktní, resp. plastická hloubka). Matematicky ji lze vyjádřit jako:

$$h_p = h_{max} - \varepsilon \frac{P}{dP/dh} = h_{max} - \varepsilon (h_{max} - h_r), \quad (4.16)$$

kde ε geometrická konstanta závislá na použitém indentoru. Hloubka h_r se určí jako [64][68][78]:

$$h_r = h_{max} * \frac{P_{max}}{dP/dh}. \quad (4.17)$$

Hloubka h_r je ve skutečnosti speciální případ h_p , protože pro válcový (plochý) indentor se $\varepsilon=1$. Pro Vickersův indentor a rotační paraboloid (včetně koule) je $\varepsilon=3/4$ a pro kuželový indentor je $\varepsilon=0,73$ [64][68][78].

5 CÍL PRÁCE

Cílem disertační práce je studium vlivu vybraných procesních parametrů vstřikování, teploty taveniny a teploty formy, na povrchové vlastnosti výrobků zhotovených z komerčně dostupných polymerů. Byli vybráni zástupci amorfních a semikrystalických polymerů, u kterých se hodnotily vlastnosti povrchové vrstvy na základě výsledků instrumentované zkoušky tvrdosti – metoda DSI. Získané výsledky mohou sloužit jako zdroj užitečných informací pro výrobce a zpracovatele polymerů, stejně jako pro technology a konstruktéry, kteří mohou využít výsledky práce k usnadnění a urychlení nastavení procesních parametrů vstřikování pro konkrétní aplikace na základě výsledků vlastností povrchové vrstvy měřené pomocí instrumentované zkoušky tvrdosti.

Postup při řešení disertační práce:

- Volba vhodných typů polymerních materiálů.
- Příprava zkušebních těles vstřikováním, dle normy ČSN EN ISO 527-2 [79].
- Provedení mechanických zkoušek na připravených zkušebních tělesech v oblasti povrchové vrstvy.
- Provedení dalších testů umožňujících detailnější popis povrchové vrstvy polymerů.
- Statistické vyhodnocení naměřených dat.
- Porovnání naměřených dat a určení vzájemných korelací.

6 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

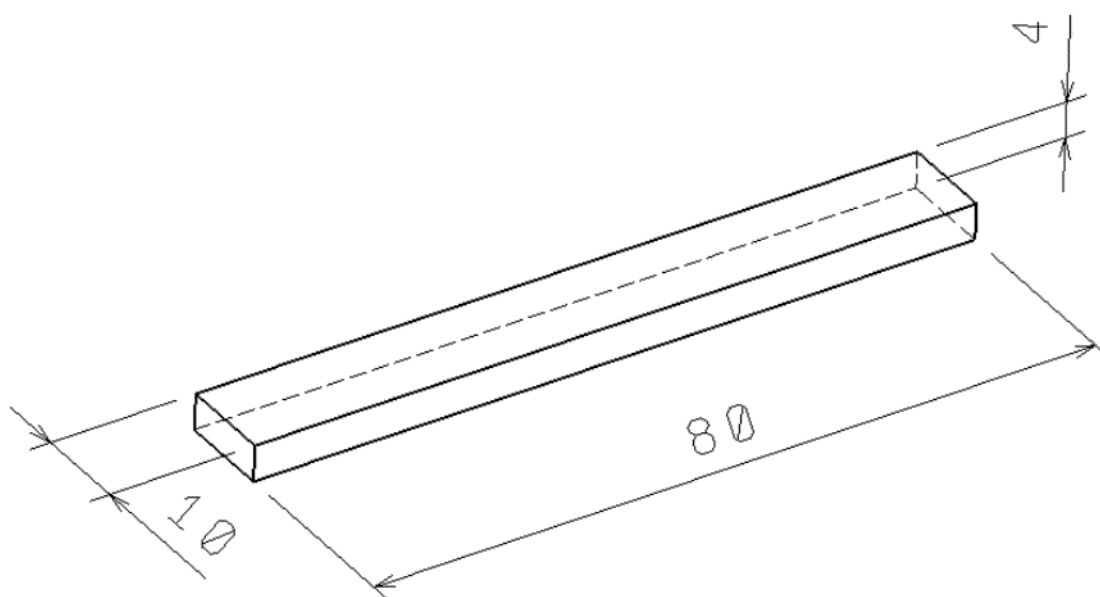
Disertační práce se zabývá výzkumem povrchových vlastností polymerů zpracovaných technologií vstřikování v závislosti na teplotě taveniny a teplotě formy. K zjištění povrchových vlastností byla použita Instrumentovaná zkouška tvrdosti (metoda DSI).

6.1 Výběr polymerního materiálu

Jedinými kritérii pro volbu vhodných materiálů pro experimentální část byly dostupnost, nenáročnost na zpracování a dostatečně široký rozsah teploty taveniny. Jako zástupce semikrystalických komerčních polymerů byl vybrán vysokohustotní polyetylen (HDPE) DOW HDPE 25055E. Jako zástupce skupiny amorfních polymerů polykarbonát (PC) LEXAN ML 3729.

6.2 Příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa byla vyrobena technologií vstřikování na stroji ARBURG 470H 1000-400 s průměrem vstřikovacího šneku 40 mm. Měření teploty taveniny bylo prováděno v části trysky, teplotním čidlem integrovaným v systému vstřikovacího stroje, verifikace teploty taveniny byla provedena vpichovacím teploměrem s jehlovou sondou. Tvar zkušebních těles byl vyroben dle normy ČSN EN ISO 527-2 (Obr. 6.1) [79].



Obr. 6.1: Rozměry zkušebního tělesa.

Nastavení vstřikovacího procesu u obou materiálů bylo provedeno standardní cestou. Nejdříve byla teplota vstřikovacího válce, stejně jako teplota formy, nastavena na střední hodnotu doporučeného rozsahu (na výstupní zóně s lineárně rostoucím teplotním profilem od dávkovací zóny). Objem dávky byl postupně zvyšován až na 95 % vypočítaného objemu výrobku spolu s postupným zvyšováním vstřikovací rychlosti, tak až bylo dosaženo zaplnění dutiny formy bez

přetoků. Následně byla do vstřikovacího cyklu zařazena fáze dotlaku s dvou-
stupňovým profilem, který byl nastaven tak, aby nedošlo k přetokům materiálu
do dělicí roviny a zároveň aby byl výrobek s maximální hmotností a bez vad.
Konečné hodnoty základních parametrů vstřikovacího procesu výroby vzorků
jsou zobrazeny v *Tab. 6.1*.

Po ustálení vstřikovacího cyklu byla měřena teplota taveniny. Regulací teploty
vstřikovacího válce byla nastavena teplota taveniny ve středu doporučeného
rozsahu teplot (HDPE 225 °C, PC 290 °C). Z ustálené produkce bylo po 30 mi-
nutách odebráno 10 vzorků. Následně se nastavila teplota formy na spodní hra-
nici doporučeného rozsahu a po ustálení cyklu se opět odebralo 10 vzorků. Celý
proces se opakoval s teplotou formy na horní hranici doporučeného rozsahu. Ná-
sledně se teplota taveniny nastavila na spodní hranici (HDPE 200 °C, PC 280
°C) a celý proces se změnami teplot formy se opakoval. Po odebrání vzorků se
teplota taveniny zvýšila na horní hranici doporučeného rozsahu teplot (HDPE
250 °C, PC 300 °C). Po ustálení procesu bylo po 30 minutách opět odebráno 10
vzorků.

Tab. 6.1: Procesní parametry při výrobě zkušebních těles.

Materiál	Teplota taveniny [°C]	Vstřikovací rychlost [mm/s]	Dotlak [MPa]	Teplota formy [°C]		
				Dolní	Střední	Horní
DOW HDPE 25055E	200	60	660	40	50	60
	225	60	660	40	50	60
	250	60	660	40	50	60
PC Lexan ML3729	280	90	680	80	90	100
	290	90	680	80	90	100
	300	90	680	80	90	100

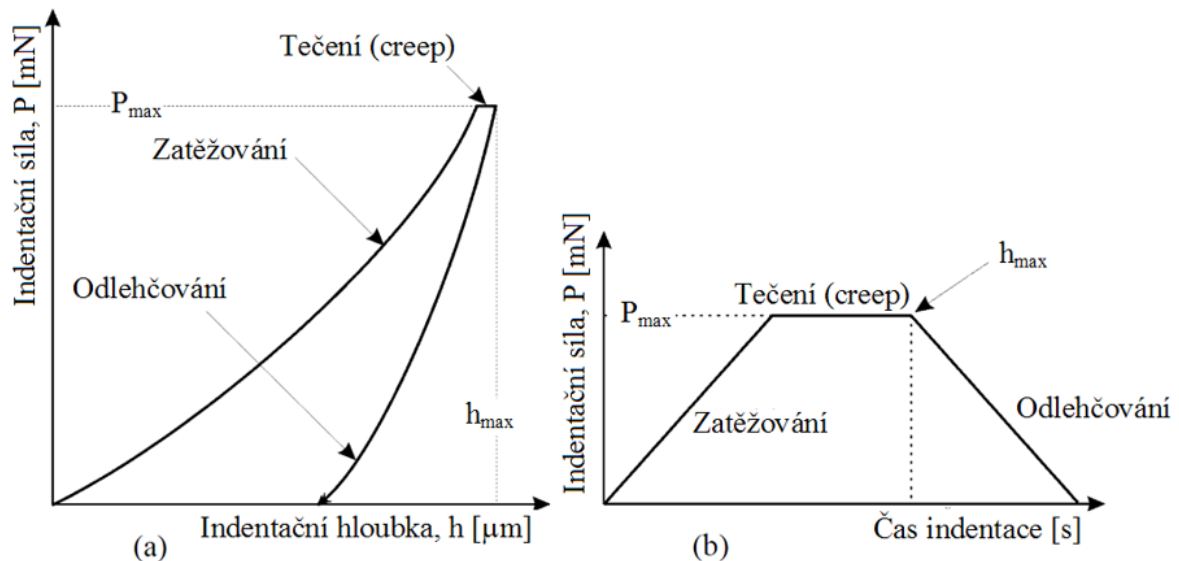
6.3 Instrumentovaná zkouška tvrdosti

Standardní zkoušky tvrdosti umožňují stanovení čísla tvrdosti na základě vy-
hodnocení hloubky nebo obrazu vtisku. DSI instrumentovaná vnikací zkouška
tvrdosti je metoda, při které je detekována okamžitá změna hloubky vtisku in-
dentoru ve zkoumaném materiálu a zároveň je snímán průběh zatížení během
celého měřicího cyklu.

Průběh DSI lze rozdělit na dvě základní fáze. Během první zatěžující fáze je
na indenter vyvíjena zvyšující se síla definovanou rychlostí. Ke snižování zatí-
žení až na nulovou hodnotu dochází potom ve fázi druhé. Mezi tyto stupně je
často zařazena prodleva s aplikovaným maximálním zatížením. Tento časový
úsek umožňuje zkoumat tok materiálu za studena pod zatížením – tzv. creep. Z

takto získaných dat je možno sestavit indentační křivku – tj. závislost indentační síly na indentační hloubce, a časový diagram indentační zkoušky – tj. závislost indentační síly na čase, viz Obr. 6.2.

DSI metoda umožňuje vyhodnocovat tvrdost, elastický modul, creep a práci vynaloženou na vtisk. Vzhledem k tomu, že indentační křivka, resp. její tvar vyjadřuje reakci zkoušeného materiálu na zatěžovací sílu, lze z ní vyčíst, vedle výpočtu tvrdosti a modulu pružnosti i další důležité informace. Např. fázová transformace, trhliny a delaminace vrstvy se projevují na indentační křivce nespojitým průběhem [66].



Obr. 6.2: Indentační křivka (a), časovým diagramem indentační zkoušky (b) [66].

Měření Instrumentované zkoušky tvrdosti bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 14577-1 [80] na třech přístrojích:

1) Mikrotvrdoměr MICRO – COMBI TESTER od firmy CSM Instruments.

Parametry zkoušky:

- aplikované zatížení – 500 / 1 000 / 5 000 mN
- výdrž na maximálním zatížení – 90 / 90 / 90 s
- rychlost zatěžování a odlehčování – 1 000 / 2 000 / 10 000 mN/min

Měření bylo provedeno metodou DSI s Vickers indentorem (čtyřbokým jehlan s vrcholovým úhlem 136 °C) jako vnikacím tělískem. Mechanické vlastnosti byly vyhodnoceny metodou Oliver&Pharr.

2) Nanotvrdoměr NHT2 od firmy CSM Instruments.

Parametry zkoušky:

- aplikované zatížení – 10 / 50 / 250 mN

- výdrž na maximálním zatížení – 90 / 90 / 90 s
- rychlost zatěžování a odlehčování – 20 / 100 / 500 mN/min

Měření bylo provedeno metodou DSI s Berkovich indentorem (tříboký jehlan s vrcholovým úhlem 142,3 °C) jako vnikacím tělískem. Mechanické vlastnosti byly vyhodnoceny metodou Oliver&Pharr.

3) Ultra nanotvrdoměr UNHT od firmy Anton Paar.

Parametry zkoušky:

- aplikované zatížení – 0,5 / 0,75 / 1 mN
- výdrž na maximálním zatížení – 90 / 90 / 90 s
- rychlost zatěžování a odlehčování – 1 / 1,5 / 2 mN/min

Měření bylo provedeno metodou DSI s Berkovich indentorem (tříboký jehlan s vrcholovým úhlem 142,3 °C) jako vnikacím tělískem. Mechanické vlastnosti byly vyhodnoceny metodou Oliver&Pharr.

6.4 Rastrovací elektronový mikroskop s energiově disperzním analyzátozem (SEM/EDS)

Struktura lomových ploch byla zkoumána pomocí skenovacího elektronového mikroskopu JEOL 7500F. Lomové plochy pro SEM se připravovaly přelomením zkušebních těles po zchlazení v tekutém dusíku. Zkušební tělesa s lomovými plochami byla pomocí disperzního lepidla přilepena k terčíkům a pokovena zla-tem v argonové atmosféře na naprašovací zařízení Balzars. SEM obrázky byly snímány ve formátu *.bmp programem PC SEM. Použité urychlovací napětí bylo 15 kV a pracovní vzdálenost (WD) od 6 do 9 mm. Dodatečným zařízením SEM je vlnově disperzní analyzátor (EDS), který slouží k analýze složení povrchové vrstvy. Prvková analýza je prováděna na základě charakteristického rentgenového záření, které jednotlivé prvky vyzářují.

6.5 Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC)

Měření bylo prováděno na zařízení DSC 1 od společnosti METTLER TOLEDO. Zkušební vzorky o navážce (20 ± 10) mg byly zalisovány do hliníkových (Al) pánviček s víčky. Jako reference byla použita prázdná Al pánvička. Měření probíhala v teplotním rozsahu (80 – 160) °C rychlostí ohřevu i chlazení při prvním a druhém cyklu 10 °C/min v inertní dusíkové (N₂) atmosféře s průtokem média 20 ml/min. Výsledky byly vyhodnocovány pomocí programu STA-Re, METTLER TOLEDO.

6.6 Statistické vyhodnocení naměřených dat

Ke statistickému vyhodnocení bylo využito programu MS Excel 2016. Vyhodnocování probíhalo dle normy ČSN ISO 2602 [81], která určuje statistickou

interpretaci výsledků měření - odhadem průměrů a konfidenčních intervalů. Je předpokládáno, že konečný/nekonečný základní soubor se řídí základním Gaussovým rozdělením pravděpodobnosti. Nicméně tohoto souboru lze velmi těžko dosáhnout, je využíván výběrový statistický soubor dat, který se skládá z určitého počtu měření n . Aby byl výběrový statistický soubor dostatečně přesný, doporučuje se počet měření n minimálně deset [81][82][83].

Kvantil nazývaný medián je hodnota souboru určitého znaku, který tento soubor rozděluje na dvě části. Jedna část obsahuje hodnoty menší nebo stejné, než je medián, druhá část obsahuje hodnoty větší nebo stejné, než medián. Medián je střední hodnotou z lichého souboru dat. Pokud je sudý soubor dat, mediánem je průměr dvou středních hodnot. Výhodou je, že medián není ovlivněn vychýlenými hodnotami, na rozdíl od aritmetického průměru X [81][82][83].

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.1)$$

Odhad rozptylu naměřených hodnot, rovněž označovaný jako výběrový rozptyl $s^2(x_i)$ je určen vztahem:

$$s^2(x_i) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{n - 1} \quad (6.2)$$

Výběrová směrodatná odchylka $s(x_i)$ je odmocninou výběrového rozptylu. Tato hodnota ukazuje rozptyl naměřených hodnot okolo výběrového průměru X . Rozptyl výběrových průměrů $s^2(X)$ je určen vztahem:

$$s^2(X) = \frac{s^2(x_i)}{n} \quad (6.3)$$

Směrodatná odchylka výběrového průměru $s^2(X)$ je považována za standardní nejistotu typu A (označení u_A). Všeobecně neznámé příčiny způsobené náhodnými chybami jsou zde obsaženy. Standardní nejistota typu A se získává statistickou analýzou série pozorování z opakovaných měření stejné hodnoty (veličiny) za stejných podmínek. Čím je větší počet opakovaných měření, tím je menší nejistota měření [81][82][83].

$$u_A \equiv s(\bar{X}) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{n \cdot (n - 1)} \quad (6.4)$$

Jestli je počet opakování měření menší než deset, určí se korigovaná nejistota u_{Ak} ze vztahu:

$$u_{Ak} = k \cdot s(X) \quad (6.5)$$

Koeficient k je závislý na počtu opakování měření (*Tab. 6.2*) [81][82][83].

Tab. 6.2: Hodnoty koeficientu k na počtu opakování měření

n	9	8	7	6	5	4	3	2
k	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7,0

Korigovanou nejistota u_{Ak} lze určit i na základě kvalifikovaného odhadu, na základě vlastních zkušeností.

7 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

PC se řadí do skupiny amorfních polymerů, které netvoří uspořádanou strukturu, jako polymery semikrystalické (např. HDPE apod.). Kvůli jejich vnitřní neuspořádanosti mají amorfní polymery širší zpracovatelské okno a nižší deformace či smrštění.

Zástupcem semikrystalických polymerů byl vybrán HDPE, se kterým se běžně setkáváme v domácnostech při běžných činnostech. Např. z tohoto materiálu se vyrábějí obaly a domácí potřeby. Důležitým předpokladem je dlouhá trvanlivost povrchu proti poškrábání a ostatním nepříznivým vlivům. Změna vlastností povrchové vrstvy je závislá na uspořádání a množství amorfního podílu.

V celé práci je vyhodnocována Vickersova tvrdost, která není závislá na aplikovaném zatížení indentoru, což umožnilo měření velmi tenkých povrchových vrstev na několika instrumentovaných měřících přístrojích (ultranano, nano a mikro tvrdoměr). Metoda „Depth Sensing Indentation“ (DSI) byla vyvinuta k instrumentovanému měření tvrdosti povrchových vrstev. Přičemž Oliver a Pharr tuto metodu (zejména podstatu vyhodnocování naměřených dat) zdokonalili tak, že v současné době je považována za jednu z nejpřesnějších pro hodnocení velmi tenkých povrchových vrstev.

7.1 Polykarbonát (PC)

Hodnoty uvedené v *Tab. 7.1 až Tab. 7.9* představují statistické vyhodnocení tvrdosti (HV) a maximální indentační hloubky (h_{\max}) v nm pro definované zatížení, které je značeno spodním indexem. Např. u $HV_{0,5}$ bylo použito zatížení 0,5 kg, což odpovídá zatěžovací síle 5 N.

Jak vyplývá z grafického vyjádření na *Obr. 7.1 až Obr. 7.3* tvrdost povrchové vrstvy vstříkovaného výrobku z PC měřená při zatížení 0,5 až 1 mN vykazuje se vzrůstající teplotou taveniny mírný pokles. Uvedená tendence je zřetelná zejména při aplikaci nejnižších použitých zatížení, tj. zatížení 0,5 a 0,75 mN, a to při všech teplotách vstříkovací formy. Naměřená tvrdost kolísá v rozmezí 21 až 18 HV (*Obr. 7.1 až Obr. 7.3*). Jak je zřejmé z *Obr. 7.11 až Obr. 7.13* byla při aplikaci těchto zatížení dosažena nejmenší hloubky vtisku pohybující se v rozsahu od 370 do 560 nm. Aplikace uvedeného zatížení byla zjišťována povrchová tvrdost v nejmenší indentační hloubce, kterou bylo možné při použití dostupného zařízení identifikovat. Zjištěné výsledky velmi dobře korelují s mikroskopickými snímky (*Obr. 7.23 až Obr. 7.25*), u kterých je možno identifikovat tři podpovrchové vrstvy lišící se mikrostrukturou. Nejmenší identifikovaná vrstva I těsně pod povrchem je v rozsahu do cca 100 nm. Ačkoliv je pracoviště vybaveno vysoce citlivými přístroji pro měření tvrdosti (mikrotvrdost, nanotvrdost a ultranantvrdost) je jejich rozsah pro posouzení mechanických vlastností této vrstvy nedostatečný. Tvrdost této první identifikované vrstvy (vrstva I) nebylo možné změřit. Další mikroskopicky identifikovaná vrstva

(vrstva II, *Obr. 7.23*) dosahuje hloubky do cca 500 nm. S ohledem na maximální hloubku indentace od 370 do 550 nm je možno konstatovat, že při zatížení 0,5 – 1 mN je měřena tvrdost této vrstvy. Výsledky vykazují, že u PC je tvrdost povrchové vrstvy do hloubky cca 500 nm nejvyšší s mírným poklesem při zvyšující se teplotě taveniny. Pokles však není větší než 5 %. Tato tendence je zachována u všech teplot vstřikovací formy. Při použití vyšší indentační síly, od 10 do 100 mN, byl zaznamenán průnik indentoru až do hloubky téměř 5800 nm (vrstva III). Z hlediska výsledků tvrdosti se jedná o měření tvrdosti třetí identifikované povrchové vrstvy III (*Obr. 7.4 až Obr. 7.6*), jak je zřejmé z naměřených hodnot s minimálními rozdíly tvrdosti HV při aplikaci zatížení od 10 do 100 mN. Naměřené hodnoty tvrdosti třetí identifikované vrstvy (vrstva III) jsou podstatně nižší než v případě první povrchové vrstvy a kolísají okolo 15 HV s mírným poklesem při zvyšující se teplotě taveniny a poklesem teploty formy (*Obr. 7.11 až Obr. 7.13*). Zároveň je zjištěna větší indentační hloubka zvyšující se s rostoucí indentační silou s minimem cca 4000 nm při zatěžující síle 10 mN a maximem cca 5800 nm při zatěžující síle 100 mN.

Při aplikaci nejvyšší použité zatěžující síly (250–5000 mN), byl zjištěn další pokles tvrdosti, která oscilovala mezi 13 a 14 HV (*Obr. 7.7 a Obr. 7.10*). Vyšší zatěžující síla měla za následek významný průnik indentoru do testovaného materiálu. Hodnota indentační hloubky dosahovala od 9200 nm při zatížení silou 250 mN až po 43700 nm při maximální aplikované zatěžovací síle 5000 mN, doprovázené snížením tvrdosti (*Obr. 7.11 a Obr. 7.13*). Hodnoty naměřené tvrdosti klesaly při zvyšující se zátěžné síle a rostoucí indentační hloubce.

Názorně jsou změny tvrdosti v jednotlivých hloubkách pod povrchem viditelné na *Obr. 7.14 až Obr. 7.22*. Maximální rozdíl tvrdosti povrchové vrstvy a substrátem dosáhl od 25 % při teplotě taveniny 300 °C a teplotě formy 80 °C (*Obr. 7.20*) až po více než 30 % při teplotě 290 °C a teplotě formy 90 °C (*Obr. 7.18*).

Z výsledků studie vyplývá, že povrch vstřikovaného zkušebního tělesa z PC má vyšší tvrdost než vlastní polymer. Z naměřených hodnot lze vyvozovat, že u výrobků z PC zhotovených technologií vstřikování dochází k ovlivnění tvrdosti povrchové vrstvy, přičemž ovlivněná vrstva sahá až do hloubky cca 5 μm. Mikroskopicky byly identifikovány tři vrstvy pod povrchem výrobku. Nejtenčí vrstva dosahuje tloušťky řádově v desítkách nanometrů. Ačkoliv pracoviště disponuje velmi přesnými přístroji (ultrananotvrdoměr), nebylo možno tvrdost této vrstvy objektivně posoudit. Další vrstva zasahuje do hloubky řádově stovek nanometrů a její tvrdost byla změřena. Naměřené hodnoty prezentované v grafické podobě průměrných hodnot tvrdosti vykazují relativně snadno identifikovatelnou tendenci poklesu tvrdosti s teplotou taveniny vstřikovaného PC, přičemž tato tendence je zachována pro všechny testované teploty formy. Poslední identifikovaná vrstva dosahuje hloubky řádově v tisících nanometrů a byl u ní zaznamenán výrazný pokles tvrdosti.

Tab. 7.1: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (PC), vstřikovací teplota 280 °C, teplota formy 80 °C.

n = 10	X	m	s	U_A	min	max
HV_{0,00005} [-]	19,1	19,3	0,7	0,2	18,1	19,8
h_{max 0,00005} [nm]	393	394	11	3	377	410
HV_{0,000075} [-]	19,4	19,1	0,8	0,3	18,4	20,8
h_{max 0,000075} [nm]	473	462	17	5	455	495
HV_{0,0001} [-]	17,6	17,6	0,6	0,2	16,6	18,4
h_{max 0,0001} [nm]	563	572	28	9	516	597
HV_{0,001} [-]	14,9	15,4	1,0	0,3	13,3	15,8
h_{max 0,001} [nm]	1886	1900	36	11	1820	1928
HV_{0,005} [-]	14,7	14,8	0,6	0,2	14,0	15,5
h_{max 0,005} [nm]	4063	4050	70	22	3964	4149
HV_{0,01} [-]	14,2	13,9	0,5	0,1	13,7	14,9
h_{max 0,01} [nm]	5863	5921	80	25	5735	5933
HV_{0,025} [-]	14,1	14,0	0,2	0,1	13,9	14,4
h_{max 0,025} [nm]	9365	9376	60	19	9282	9435
HV_{0,05} [-]	14,1	13,9	0,5	0,2	13,5	15,1
h_{max 0,05} [nm]	13265	13322	225	71	12844	13508
HV_{0,1} [-]	15,0	15,5	0,7	0,2	14,0	15,9
h_{max 0,1} [nm]	19088	18257	1096	347	18082	20480
HV_{0,5} [-]	13,5	13,2	0,5	0,2	13,0	14,2
h_{max 0,5} [nm]	44006	44385	692	219	43137	44789

Tab. 7.2: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (PC), vstřikovací teplota 280 °C, teplota formy 90 °C.

n = 10	X	m	s	U_A	min	max
HV_{0,00005} [-]	19,9	20,1	0,9	0,3	18,3	20,9
h_{max 0,00005} [nm]	392	394	22	7	355	416
HV_{0,000075} [-]	19,8	20,1	0,8	0,2	18,3	20,4
h_{max 0,000075} [nm]	471	469	6	2	464	483
HV_{0,0001} [-]	15,0	14,9	0,2	0,1	14,8	15,3
h_{max 0,0001} [nm]	566	559	31	10	532	621
HV_{0,001} [-]	14,7	14,2	0,9	0,3	13,7	16,1
h_{max 0,001} [nm]	1918	1900	47	15	1872	1995
HV_{0,005} [-]	15,4	15,5	0,5	0,2	14,5	15,9
h_{max 0,005} [nm]	3973	3966	56	18	3909	4075
HV_{0,01} [-]	15,4	15,4	0,4	0,1	14,8	16,0
h_{max 0,01} [nm]	5660	5660	65	21	5560	5762
HV_{0,025} [-]	15,0	14,9	0,2	0,1	14,8	15,3
h_{max 0,025} [nm]	9132	9143	40	13	9057	9174
HV_{0,05} [-]	14,3	14,3	0,1	0,0	14,1	14,5
h_{max 0,05} [nm]	13185	13171	54	17	13119	13282
HV_{0,1} [-]	14,3	14,2	0,9	0,3	13,4	15,9
h_{max 0,1} [nm]	18924	18989	452	143	18082	19412
HV_{0,5} [-]	13,3	13,3	0,1	0,0	13,1	13,4
h_{max 0,5} [nm]	44194	44197	136	43	44003	44423

Tab. 7.3: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (PC), vstřikovací teplota 280 °C, teplota formy 100 °C.

n = 10	X	m	s	U_A	min	max
HV_{0,00005} [-]	20,7	21,1	1,1	0,3	18,6	21,5
h_{max 0,00005} [nm]	365	366	15	5	339	386
HV_{0,000075} [-]	20,7	20,9	0,7	0,2	19,5	21,7
h_{max 0,000075} [nm]	456	441	29	9	437	514
HV_{0,0001} [-]	19,1	19,4	0,6	0,2	18,2	19,9
h_{max 0,0001} [nm]	535	532	10	3	523	552
HV_{0,001} [-]	15,0	14,6	0,9	0,3	14,2	16,7
h_{max 0,001} [nm]	1964	1951	115	36	1858	2175
HV_{0,005} [-]	15,6	15,6	0,7	0,2	14,5	16,6
h_{max 0,005} [nm]	3926	3957	145	46	3660	4091
HV_{0,01} [-]	14,9	14,9	0,2	0,1	14,4	15,1
h_{max 0,01} [nm]	5749	5736	41	13	5709	5829
HV_{0,025} [-]	14,6	14,3	0,8	0,2	14,1	16,1
h_{max 0,025} [nm]	9218	9310	204	64	8813	9351
HV_{0,05} [-]	14,1	14,1	0,1	0,0	14,0	14,3
h_{max 0,05} [nm]	13238	13245	49	15	13149	13294
HV_{0,1} [-]	14,6	15,0	0,9	0,3	13,3	15,6
h_{max 0,1} [nm]	18857	18615	515	163	18309	19549
HV_{0,5} [-]	14,1	14,0	0,2	0,1	14,0	14,4
h_{max 0,5} [nm]	43311	43541	352	111	42682	43595

Tab. 7.4: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (PC), vstřikovací teplota 290 °C, teplota formy 80 °C.

n = 10	X	m	s	U_A	min	max
HV_{0,00005} [-]	18,4	18,8	0,8	0,3	17,0	19,3
h_{max 0,00005} [nm]	387	388	19	6	360	418
HV_{0,000075} [-]	19,1	19,4	0,4	0,1	18,4	19,5
h_{max 0,000075} [nm]	461	462	7	2	448	469
HV_{0,0001} [-]	17,5	17,5	0,9	0,3	16,1	18,8
h_{max 0,0001} [nm]	557	569	34	11	494	591
HV_{0,001} [-]	14,3	14,0	0,6	0,2	13,6	15,4
h_{max 0,001} [nm]	1878	1893	32	10	1820	1910
HV_{0,005} [-]	14,9	14,8	0,3	0,1	14,5	15,3
h_{max 0,005} [nm]	4031	4044	33	11	3992	4074
HV_{0,01} [-]	14,9	14,9	0,2	0,1	14,7	15,2
h_{max 0,01} [nm]	5731	5736	37	12	5664	5766
HV_{0,025} [-]	14,8	14,7	0,4	0,1	14,3	15,4
h_{max 0,025} [nm]	9044	9013	98	31	8910	9176
HV_{0,05} [-]	14,0	14,0	0,5	0,2	13,5	15,0
h_{max 0,05} [nm]	13458	13455	171	54	13271	13753
HV_{0,1} [-]	15,3	15,4	0,5	0,2	14,5	16,0
h_{max 0,1} [nm]	18186	18161	268	85	17803	18597
HV_{0,5} [-]	13,8	13,9	0,4	0,1	13,2	14,2
h_{max 0,5} [nm]	43659	43617	584	185	42878	44323

Tab. 7.5: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (PC), vstřikovací teplota 290 °C, teplota formy 90 °C.

n = 10	X	m	s	U_A	min	max
HV_{0,00005} [-]	19,5	18,9	1,0	0,3	18,5	20,7
h_{max 0,00005} [nm]	375	377	12	4	360	390
HV_{0,000075} [-]	19,8	19,7	0,7	0,2	18,8	20,8
h_{max 0,000075} [nm]	449	453	21	7	423	479
HV_{0,0001} [-]	18,4	18,3	0,8	0,3	17,2	19,7
h_{max 0,0001} [nm]	548	543	30	9	500	589
HV_{0,001} [-]	14,5	14,1	1,0	0,3	13,7	16,4
h_{max 0,001} [nm]	1857	1874	54	17	1755	1908
HV_{0,005} [-]	15,2	15,4	0,4	0,1	14,7	15,6
h_{max 0,005} [nm]	3996	3963	49	15	3946	4063
HV_{0,01} [-]	14,6	14,7	0,6	0,2	13,9	15,5
h_{max 0,01} [nm]	5780	5759	97	31	5635	5909
HV_{0,025} [-]	14,6	14,7	0,4	0,1	13,7	15,0
h_{max 0,025} [nm]	9217	9180	134	42	9087	9476
HV_{0,05} [-]	14,8	14,9	0,3	0,1	14,3	15,2
h_{max 0,05} [nm]	12986	12956	113	36	12835	13157
HV_{0,1} [-]	14,9	14,9	0,3	0,1	14,4	15,3
h_{max 0,1} [nm]	18645	18916	618	195	17893	19315
HV_{0,5} [-]	13,6	13,6	0,4	0,1	13,2	14,2
h_{max 0,5} [nm]	43729	43747	495	156	42916	44336

Tab. 7.6: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (PC), vstřikovací teplota 290 °C, teplota formy 100 °C.

n = 10	X	m	s	U_A	min	max
HV_{0,00005} [-]	20,6	20,6	0,6	0,2	19,7	21,6
h_{max 0,00005} [nm]	371	366	27	9	338	420
HV_{0,000075} [-]	20,1	20,4	0,9	0,3	19,0	21,2
h_{max 0,000075} [nm]	469	481	40	13	394	510
HV_{0,0001} [-]	18,6	18,4	0,7	0,2	17,6	19,3
h_{max 0,0001} [nm]	548	551	17	5	528	567
HV_{0,001} [-]	14,9	15,2	0,6	0,2	13,8	15,4
h_{max 0,001} [nm]	1835	1826	31	10	1809	1895
HV_{0,005} [-]	14,8	15,2	0,6	0,2	13,9	15,3
h_{max 0,005} [nm]	4044	3997	67	21	3984	4155
HV_{0,01} [-]	15,1	14,9	0,5	0,2	14,6	16,0
h_{max 0,01} [nm]	5706	5751	88	28	5563	5786
HV_{0,025} [-]	14,7	14,8	0,3	0,1	14,2	15,2
h_{max 0,025} [nm]	9166	9154	93	29	9053	9319
HV_{0,05} [-]	14,3	14,4	0,2	0,1	14,0	14,7
h_{max 0,05} [nm]	13157	13128	90	29	13029	13281
HV_{0,1} [-]	15,1	14,6	0,9	0,3	14,1	16,5
h_{max 0,1} [nm]	18575	18765	455	144	17828	19098
HV_{0,5} [-]	13,6	13,8	0,6	0,2	12,5	14,3
h_{max 0,5} [nm]	43771	43519	902	285	42673	45384

Tab. 7.7: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (PC), vstřikovací teplota 300 °C, teplota formy 80 °C.

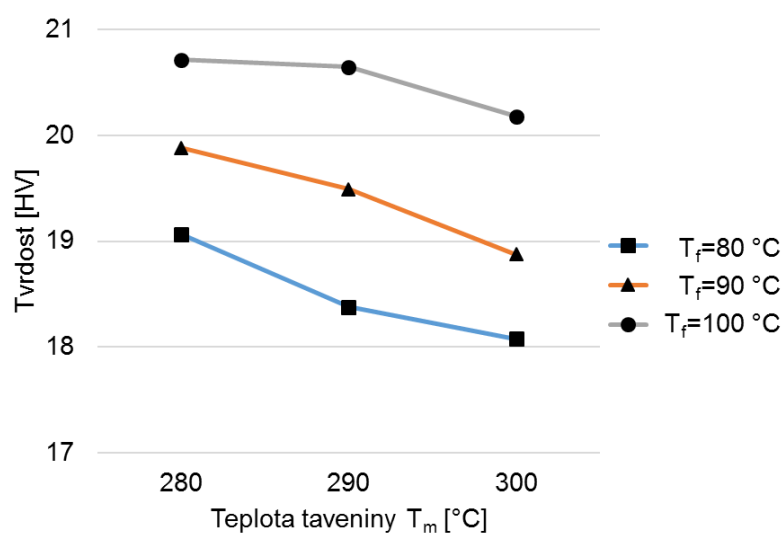
n = 10	X	m	s	U_A	min	max
HV_{0,00005} [-]	18,1	18,3	0,5	0,2	17,1	18,4
h_{max 0,00005} [nm]	365	376	23	7	319	382
HV_{0,000075} [-]	18,7	18,7	0,9	0,3	17,2	20,0
h_{max 0,000075} [nm]	471	470	17	5	450	498
HV_{0,0001} [-]	17,8	17,5	0,8	0,3	16,6	19,0
h_{max 0,0001} [nm]	533	531	39	12	463	578
HV_{0,001} [-]	14,6	14,5	0,8	0,2	13,6	15,8
h_{max 0,001} [nm]	1912	1914	38	12	1855	1957
HV_{0,005} [-]	14,9	14,8	0,4	0,1	14,3	15,6
h_{max 0,005} [nm]	4035	4033	48	15	3956	4104
HV_{0,01} [-]	14,8	14,8	0,4	0,1	14,1	15,2
h_{max 0,01} [nm]	5761	5747	76	24	5674	5874
HV_{0,025} [-]	13,8	14,2	0,6	0,2	12,9	14,4
h_{max 0,025} [nm]	9429	9303	187	59	9254	9728
HV_{0,05} [-]	14,1	14,2	0,3	0,1	13,6	14,3
h_{max 0,05} [nm]	13268	13218	110	35	13163	13457
HV_{0,1} [-]	14,9	14,9	0,3	0,1	14,4	15,3
h_{max 0,1} [nm]	18698	18923	603	191	17952	19382
HV_{0,5} [-]	13,9	14,0	0,3	0,1	13,5	14,2
h_{max 0,5} [nm]	43343	43165	320	101	43032	43851

Tab. 7.8: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (PC), vstřikovací teplota 300 °C, teplota formy 90 °C.

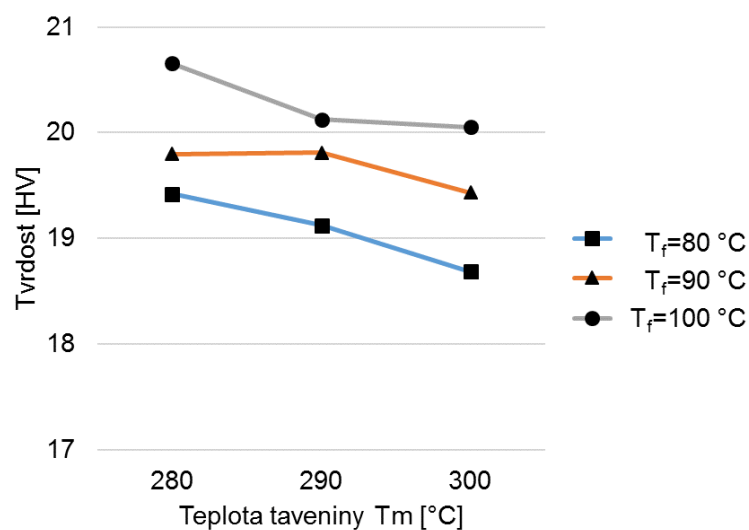
n = 10	X	m	s	U_A	min	max
HV_{0,00005} [-]	18,9	18,4	0,8	0,3	18,0	19,9
h_{max 0,00005} [nm]	403	372	68	22	351	537
HV_{0,000075} [-]	19,4	21,8	5,7	1,8	10,7	25,0
h_{max 0,000075} [nm]	474	437	70	22	412	593
HV_{0,0001} [-]	18,1	18,1	0,8	0,3	17,0	19,2
h_{max 0,0001} [nm]	561	532	68	22	514	696
HV_{0,001} [-]	15,6	16,0	0,6	0,2	14,6	16,2
h_{max 0,001} [nm]	1808	1790	34	11	1778	1866
HV_{0,005} [-]	14,8	15,0	0,7	0,2	13,5	15,4
h_{max 0,005} [nm]	4055	4042	84	27	3968	4213
HV_{0,01} [-]	15,0	15,2	0,6	0,2	14,0	15,6
h_{max 0,01} [nm]	5707	5677	98	31	5606	5886
HV_{0,025} [-]	14,5	14,4	0,2	0,1	14,2	14,8
h_{max 0,025} [nm]	9251	9254	74	23	9166	9352
HV_{0,05} [-]	14,3	14,1	0,3	0,1	14,0	14,7
h_{max 0,05} [nm]	13188	13247	115	36	13003	13313
HV_{0,1} [-]	14,3	13,8	0,8	0,2	13,6	15,4
h_{max 0,1} [nm]	18982	19286	412	130	18373	19363
HV_{0,5} [-]	13,7	13,5	0,4	0,1	13,3	14,3
h_{max 0,5} [nm]	43690	44066	588	186	42952	44313

Tab. 7.9: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (PC), vstřikovací teplota 300 °C, teplota formy 100 °C.

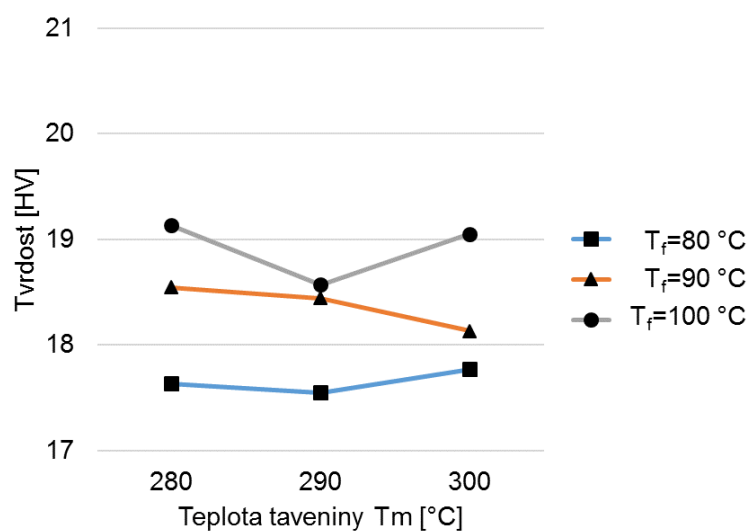
n = 10	X	m	s	U_A	min	max
HV_{0,00005} [-]	20,2	20,9	2,1	0,7	16,0	21,9
h_{max 0,00005} [nm]	375	368	19	6	361	412
HV_{0,000075} [-]	20,1	20,0	0,5	0,2	19,3	20,8
h_{max 0,000075} [nm]	439	431	17	5	424	468
HV_{0,0001} [-]	19,1	19,0	0,8	0,2	18,1	20,1
h_{max 0,0001} [nm]	491	489	8	2	483	504
HV_{0,001} [-]	15,4	15,6	1,0	0,3	14,0	16,9
h_{max 0,001} [nm]	1815	1801	49	16	1744	1890
HV_{0,005} [-]	14,5	14,7	1,3	0,4	12,0	15,7
h_{max 0,005} [nm]	4101	4072	174	55	3939	4426
HV_{0,01} [-]	14,0	14,3	1,3	0,4	12,2	15,4
h_{max 0,01} [nm]	5927	5845	262	83	5655	6277
HV_{0,025} [-]	15,0	15,3	0,6	0,2	14,0	15,6
h_{max 0,025} [nm]	9100	9025	153	48	8959	9379
HV_{0,05} [-]	14,9	15,0	0,3	0,1	14,3	15,2
h_{max 0,05} [nm]	12965	12891	117	37	12856	13174
HV_{0,1} [-]	14,4	14,0	0,9	0,3	13,6	16,2
h_{max 0,1} [nm]	19035	19236	506	160	18042	19459
HV_{0,5} [-]	14,2	14,6	0,5	0,2	13,5	14,6
h_{max 0,5} [nm]	43093	42679	695	220	42346	44196



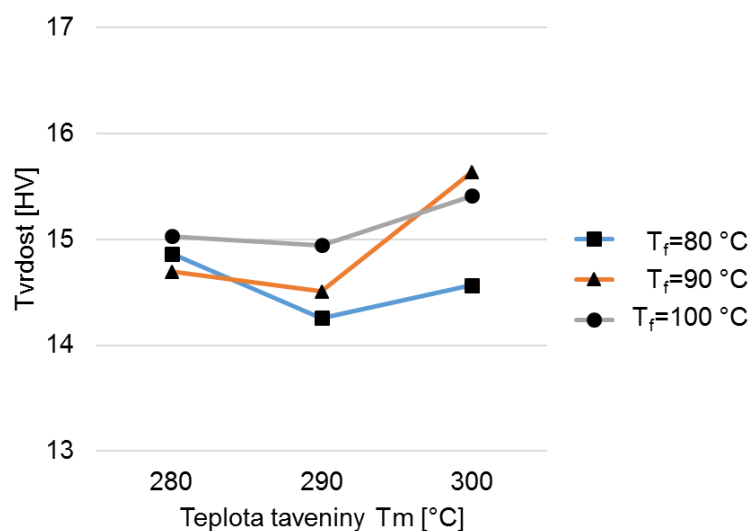
Obr. 7.1: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 0,5 mN



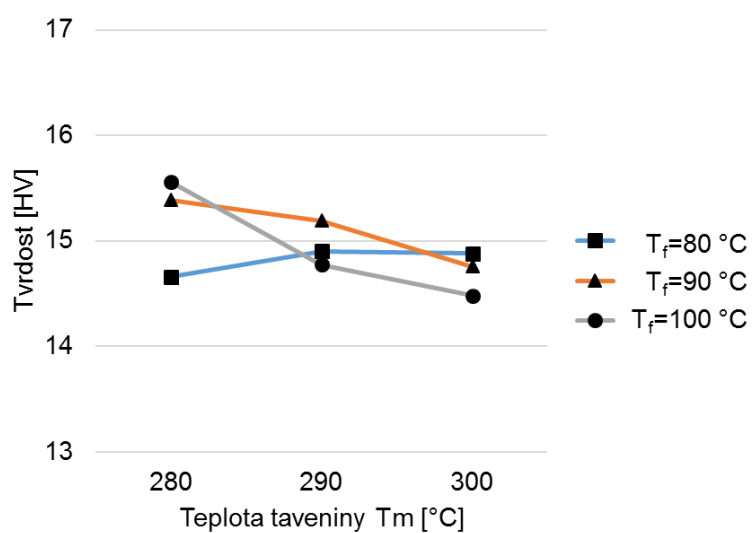
Obr. 7.2: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 0,75 mN.



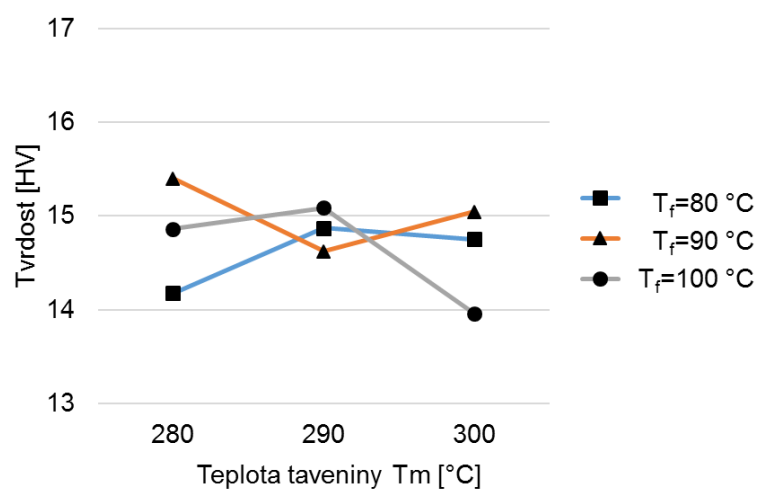
Obr. 7.3: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 1 mN.



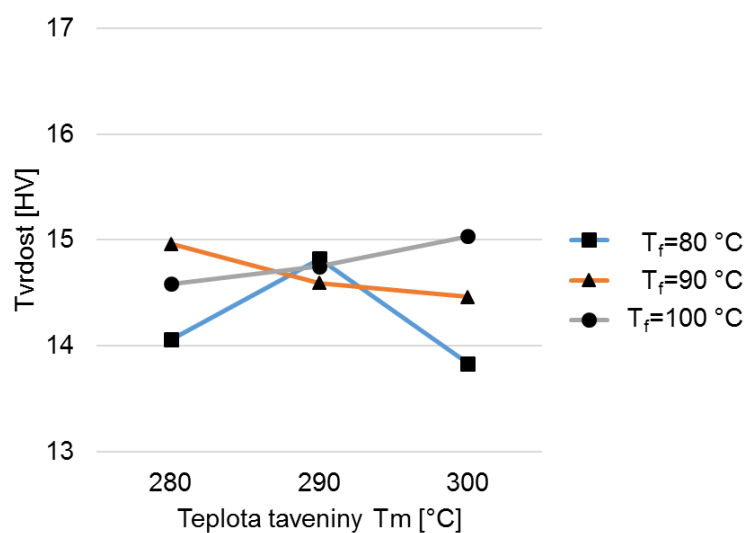
Obr. 7.4: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 10 mN.



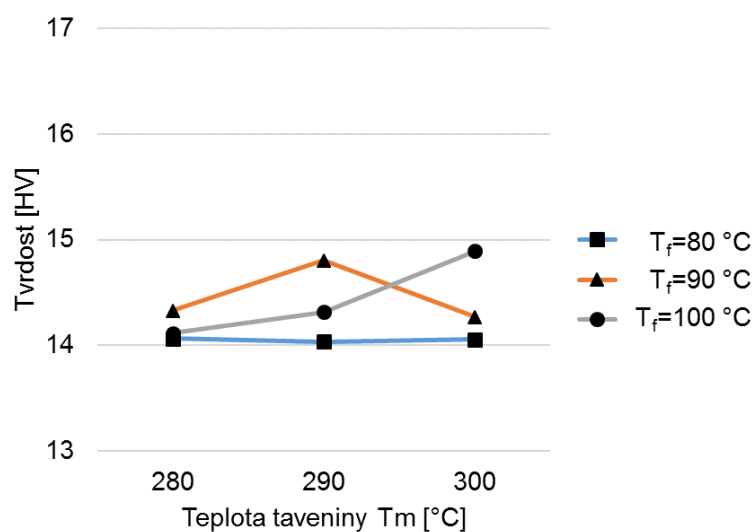
Obr. 7.5: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 50 mN.



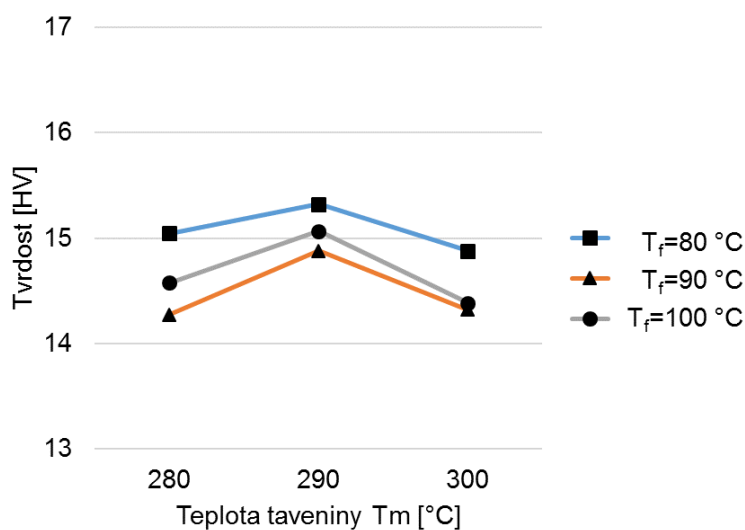
Obr. 7.6: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 100 mN.



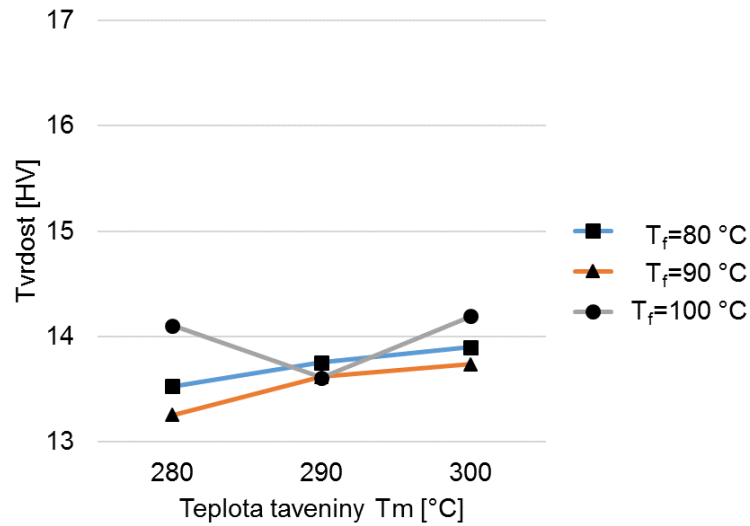
Obr. 7.7: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 250 mN.



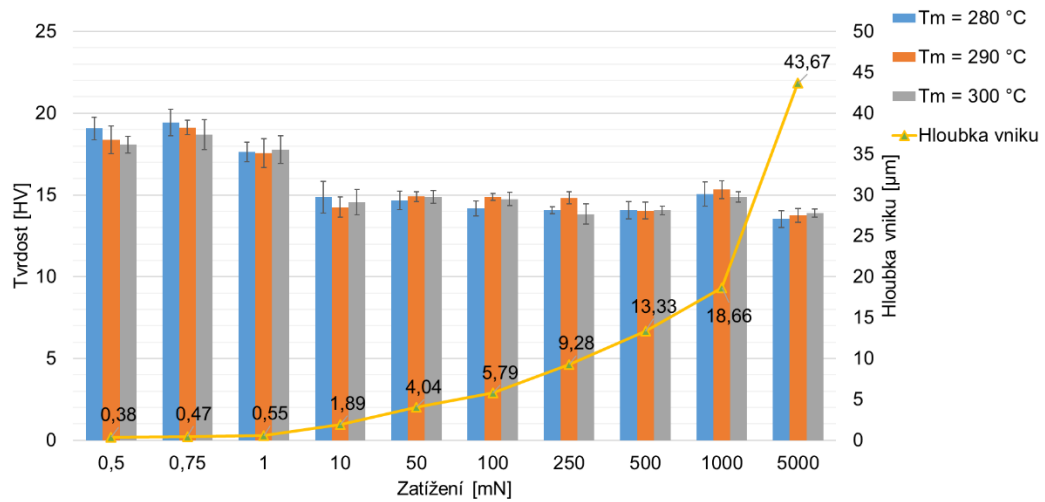
Obr. 7.8: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 500 mN.



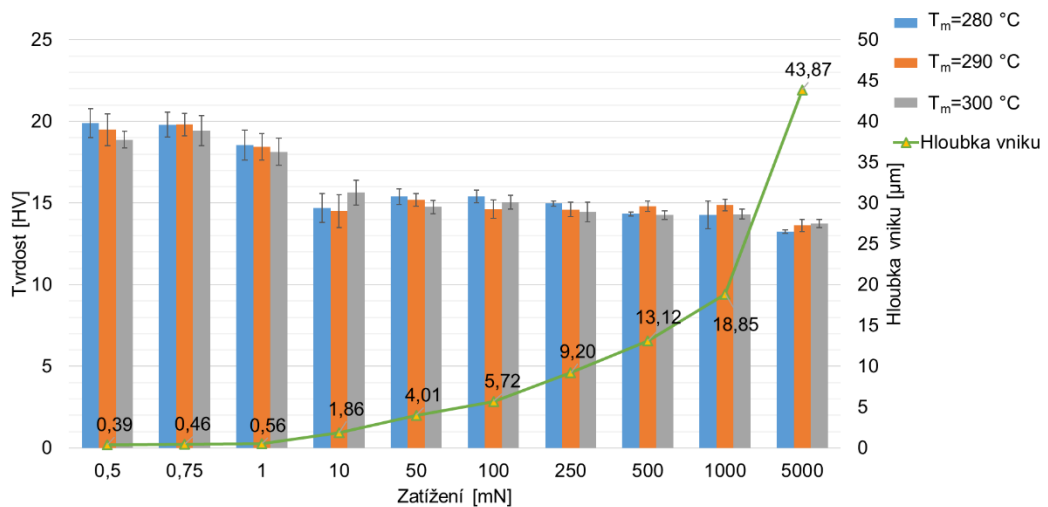
Obr. 7.9: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 1000 mN.



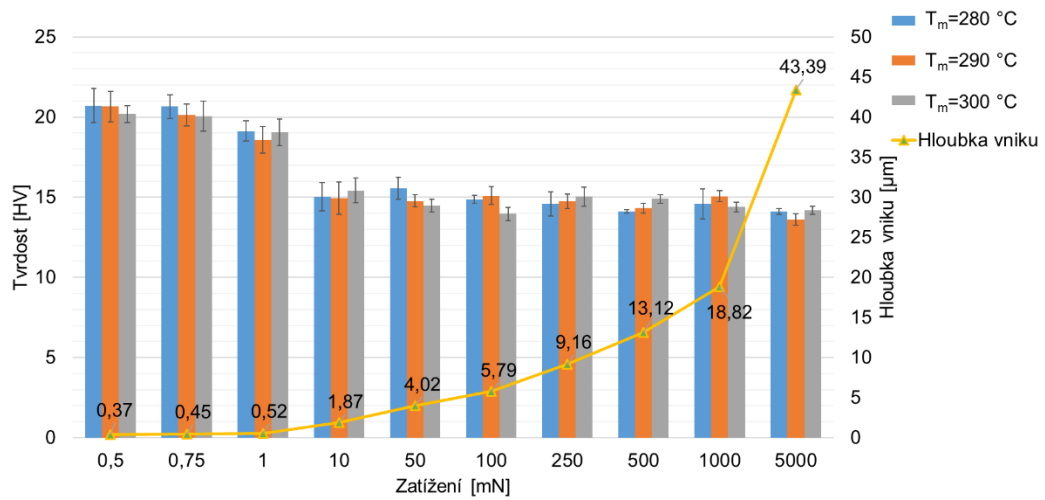
Obr. 7.10: PC – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 5000 mN.



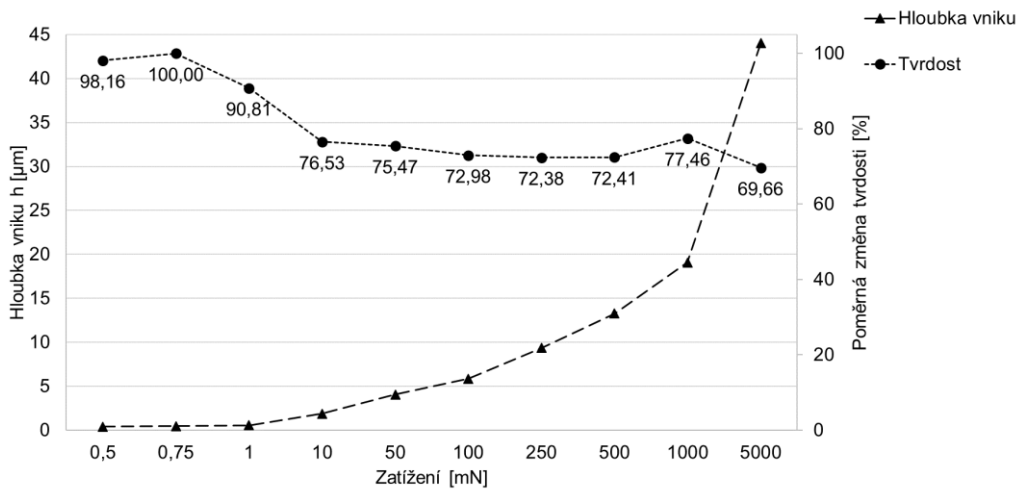
Obr. 7.11: PC – Závislost tvrdosti a hloubky vniku na zatížení při třech teplotách taveniny (T_m) a teplotě formy $T_f = 80$ °C.



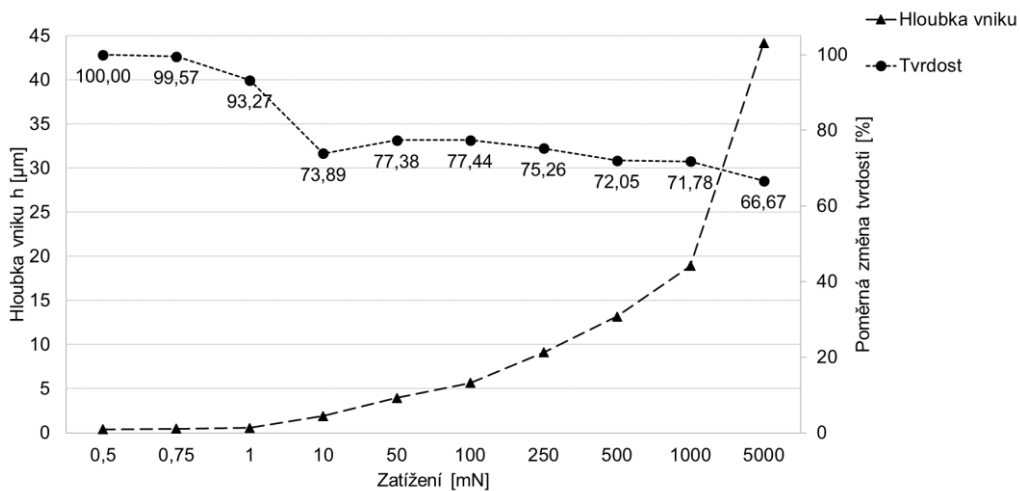
Obr. 7.12: PC – Závislost tvrdosti a hloubky vniku na zatížení při třech teplotách taveniny (T_m) a teplotě formy $T_f = 90$ °C.



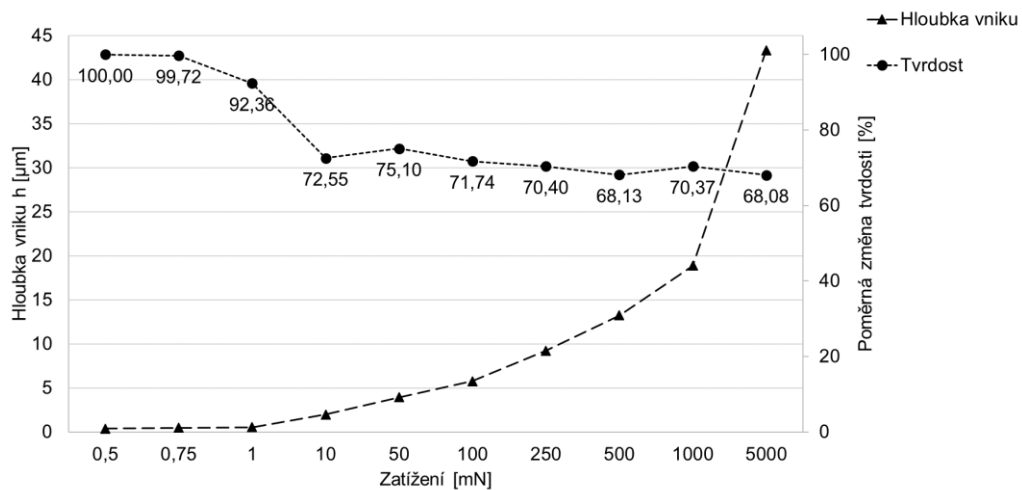
Obr. 7.13: PC – Závislost tvrdosti a hloubky vniku na zatížení při třech teplotách taveniny (T_m) a teplotě formy $T_f = 100\text{ °C}$.



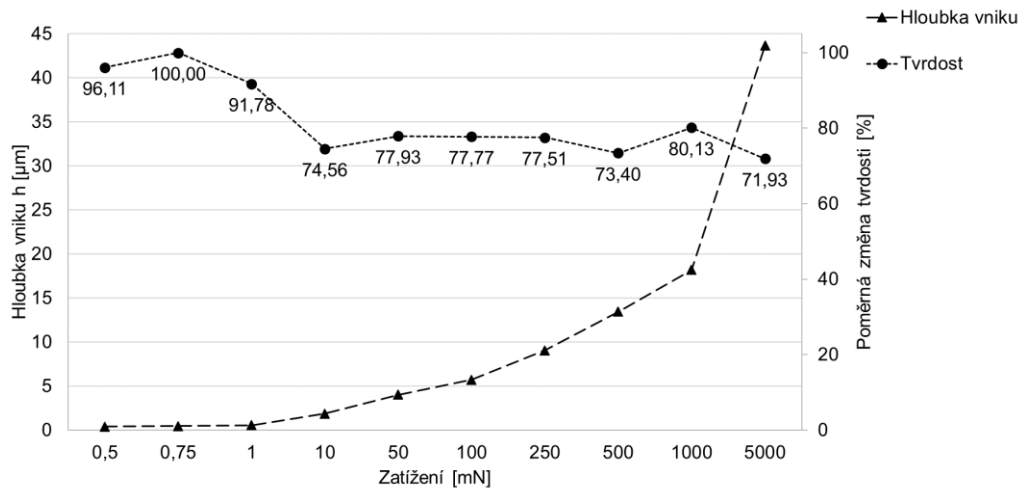
Obr. 7.14: PC – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 280\text{ °C}$, $T_f = 80\text{ °C}$.



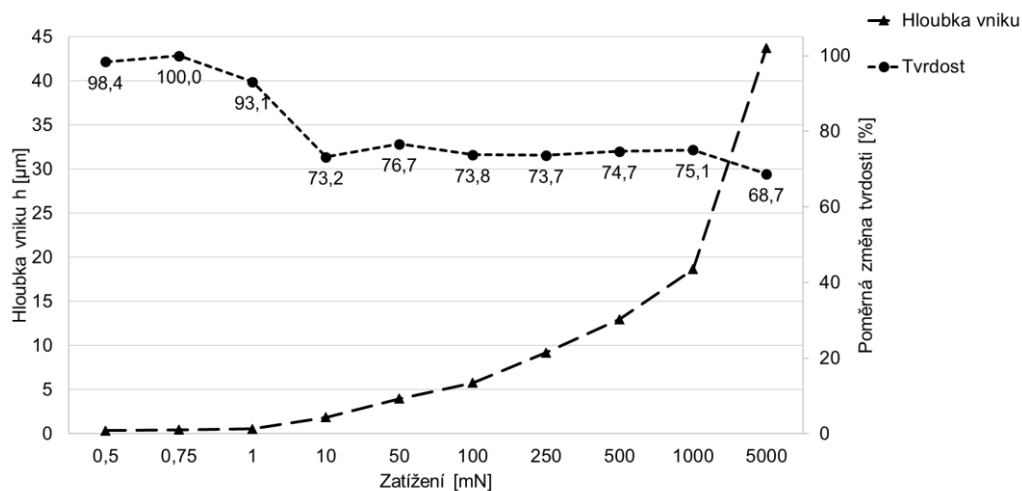
Obr. 7.15: PC – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 280\text{ °C}$, $T_f = 90\text{ °C}$.



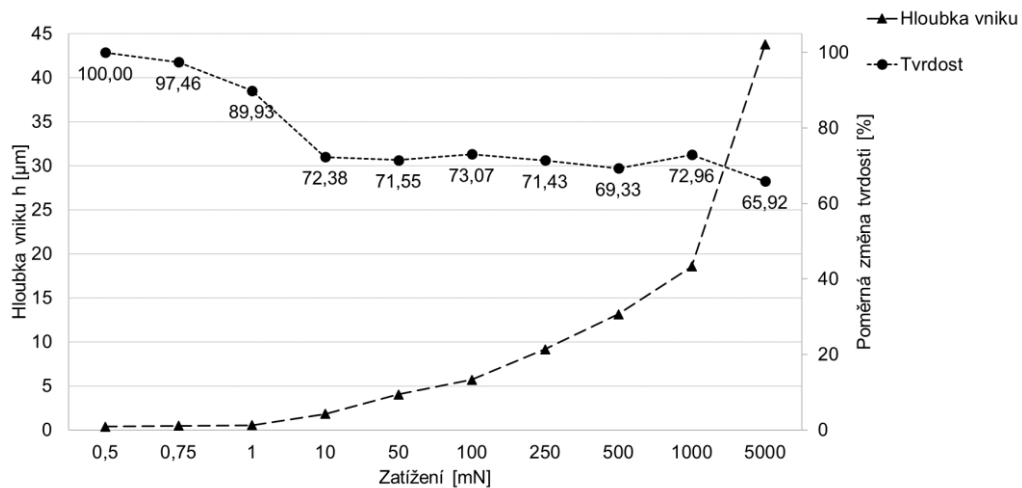
Obr. 7.16: PC – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 280\text{ °C}$, $T_f = 100\text{ °C}$.



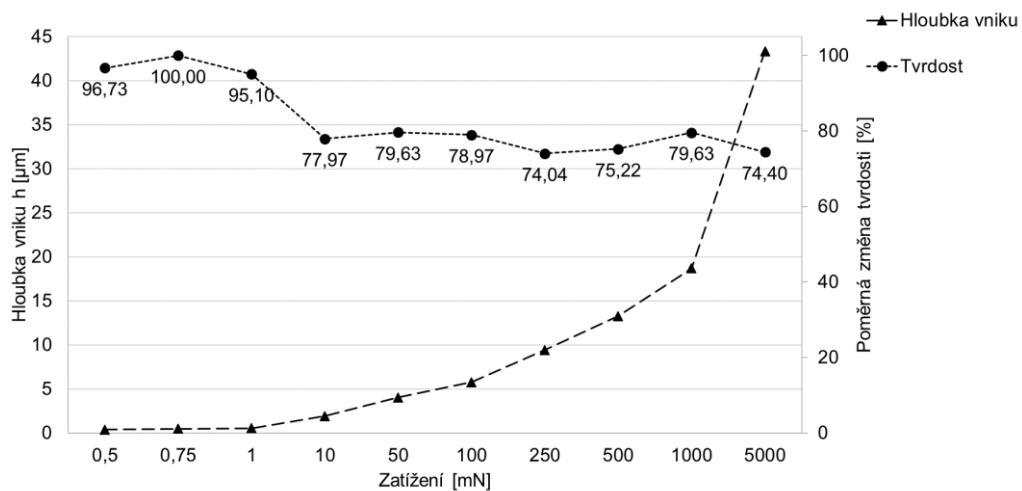
Obr. 7.17: PC – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 290\text{ °C}$, $T_f = 80\text{ °C}$.



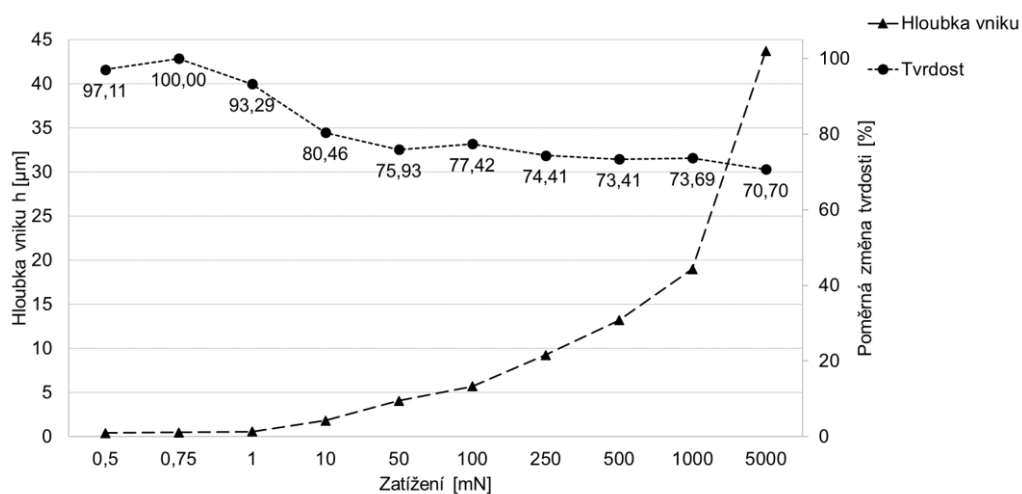
Obr. 7.18: PC – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 290\text{ °C}$, $T_f = 90\text{ °C}$.



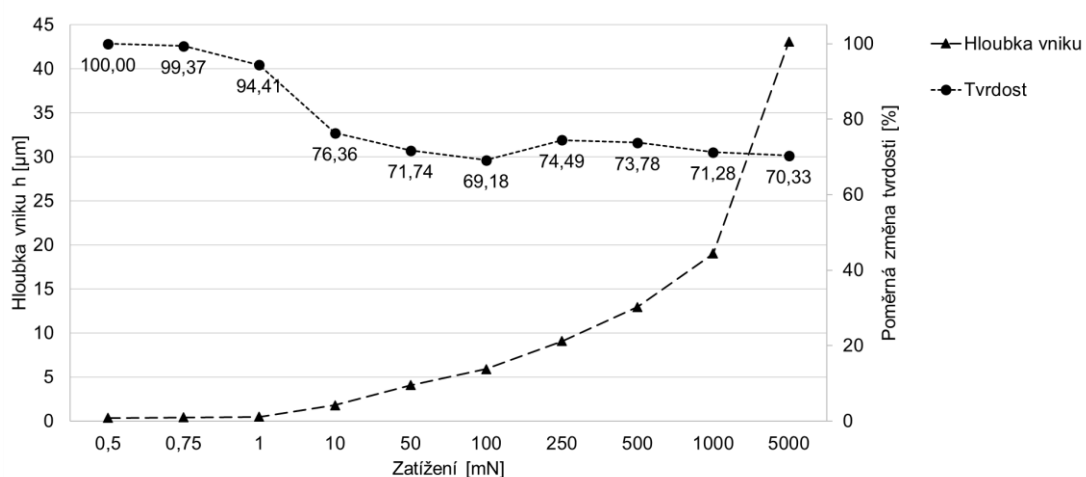
Obr. 7.19: PC – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 290\text{ °C}$, $T_f = 100\text{ °C}$.



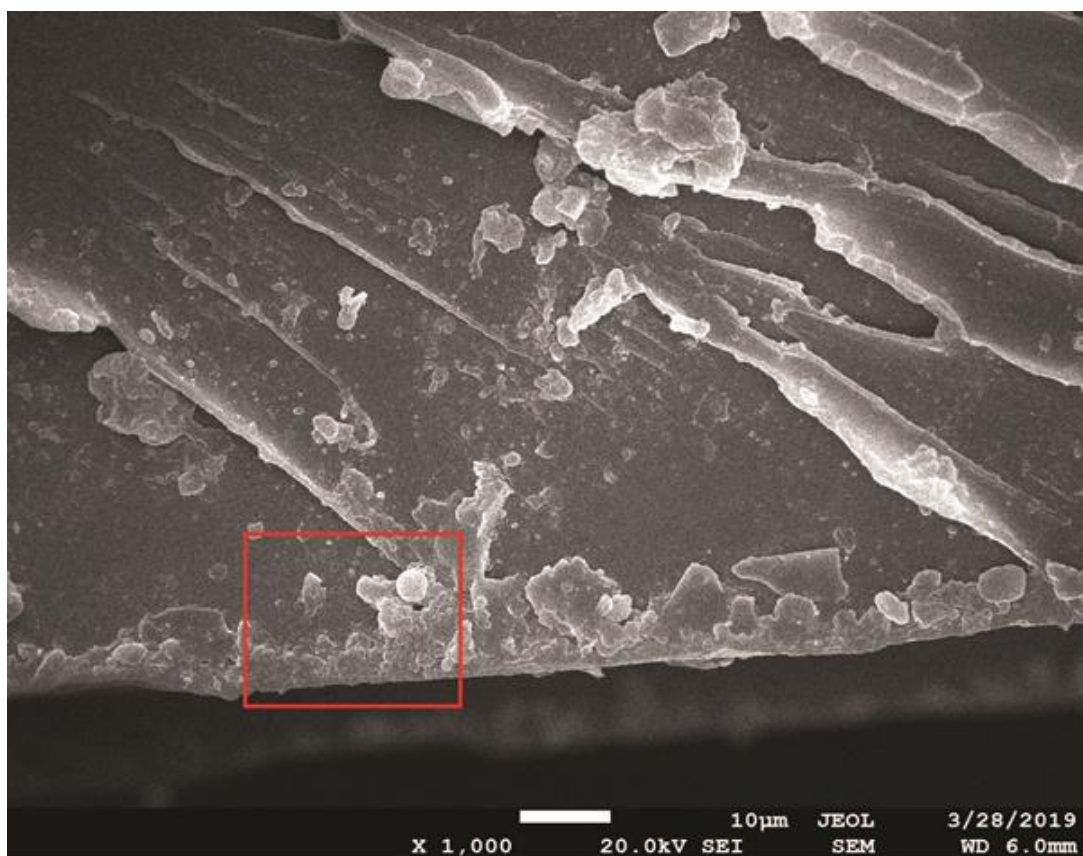
Obr. 7.20: PC – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 300\text{ °C}$, $T_f = 80\text{ °C}$.



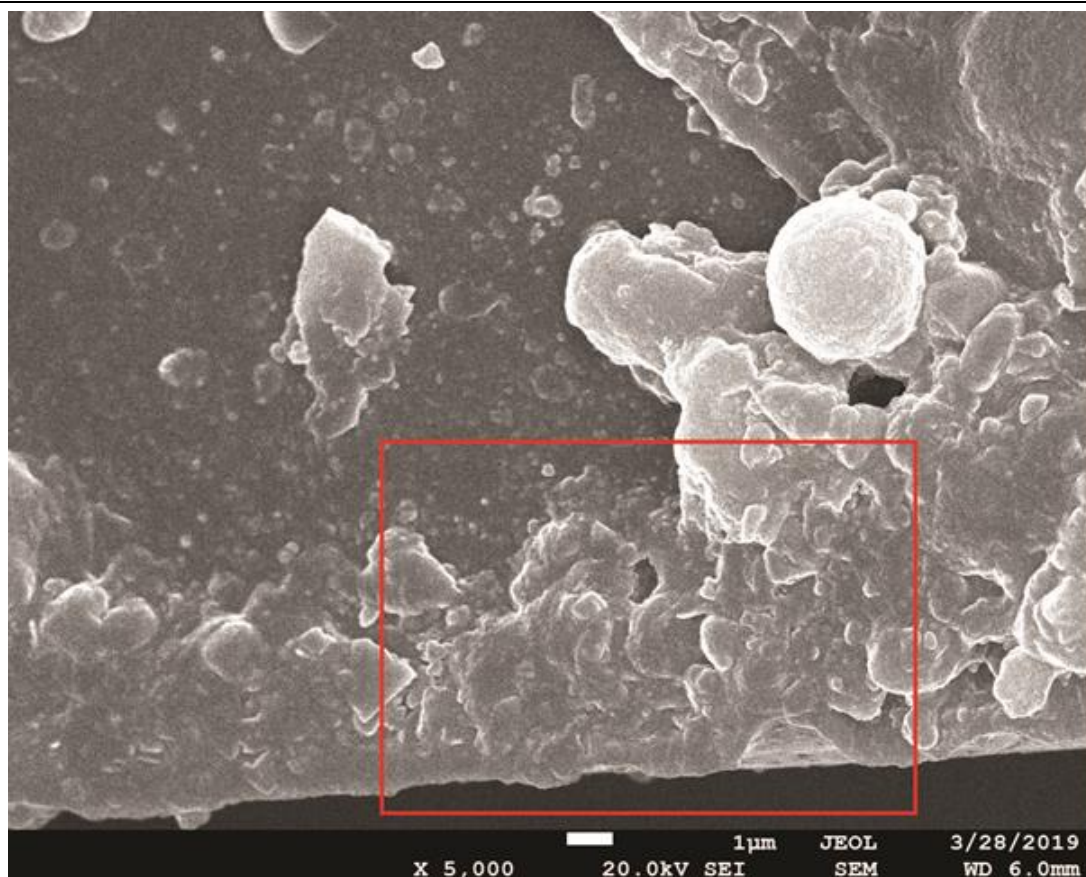
Obr. 7.21: PC – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 300\text{ °C}$, $T_f = 90\text{ °C}$.



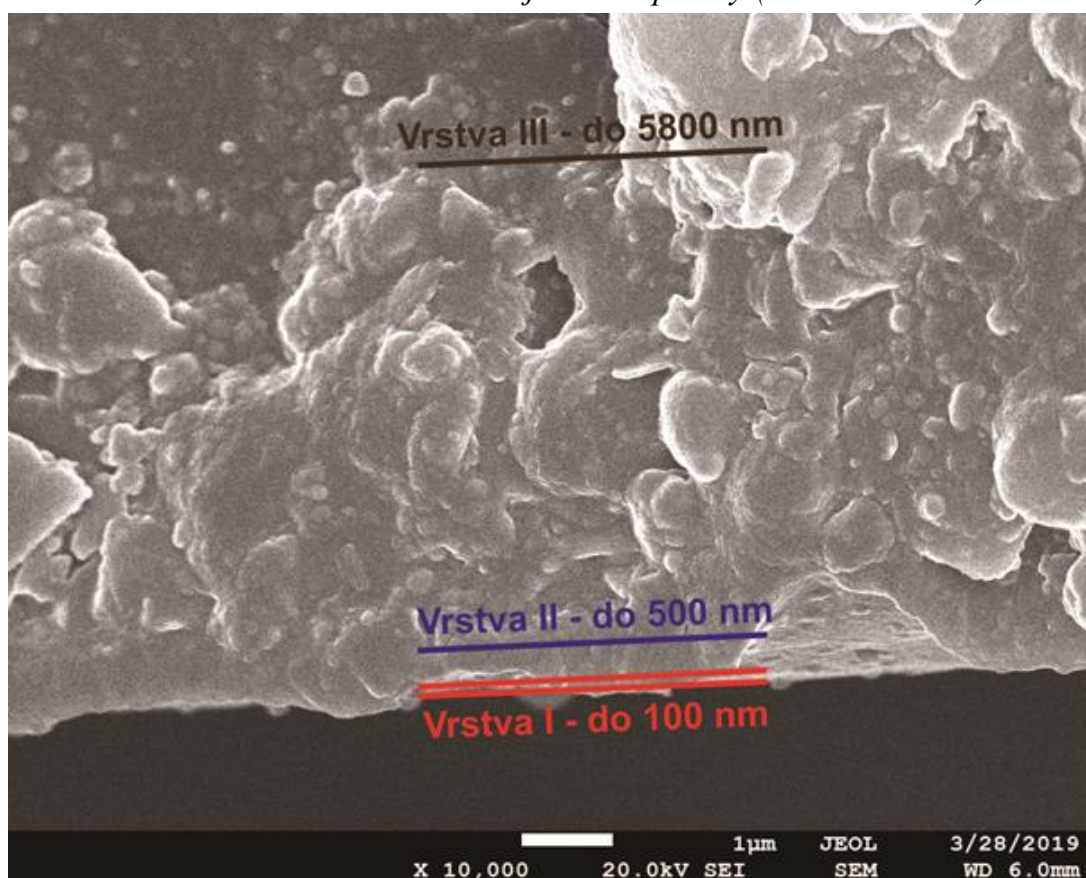
Obr. 7.22: PC – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 300\text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 100\text{ }^\circ\text{C}$.



Obr. 7.23: PC – Okraj lomové plochy (zvětšeno 1000x).



Obr. 7.24: PC – Okraj lomové plochy (zvětšeno 5000x).



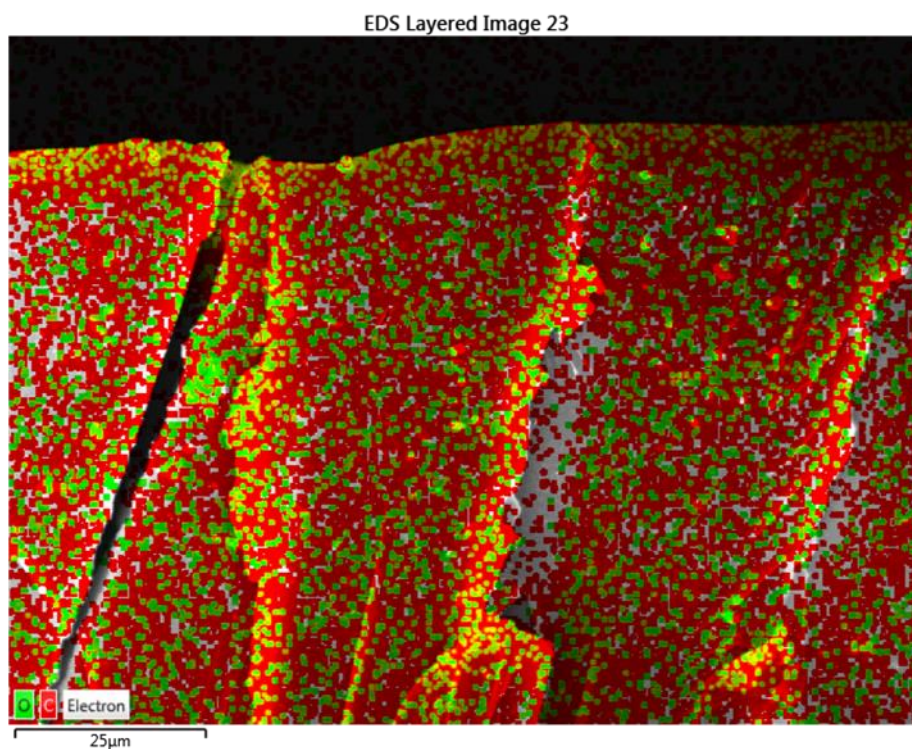
Obr. 7.25: PC – Okraj lomové plochy (zvětšeno 10000x).

Dále byl k hodnocení povrchových vlastností použit rastrovací elektronový mikroskop s energiově disperzním analyzátozem (SEM/EDS) od společnosti JEOL. Mikroskop pracuje s tenkým svazkem elektronů, který postupně dopadá na povrch zkušební tělesa. Při interakci elektronů s povrchem vzniká mnoho druhů záření. Tato záření jsou detekována a převáděna na různé typy obrazů, které přináší informace o zkoumaném povrchu. Nejčastěji je vyhodnocován obraz sekundárních elektronů, které přináší informaci o morfologii povrchu, zpětně odražené elektrony určují topografii povrchu. SEM dokáže pracovat pouze s vodivými povrchy, u polymerů, které jsou zpravidla nevodivé je potřeba povrchy upravovat napařováním zlata či palladia, aby docházelo k odvodu elektrostatického náboje, který vzniká při dopadu primárních elektronů. Dodatečným zařízením SEM je vlnově disperzní analyzátor (EDS), který slouží k analýze složení povrchové vrstvy. Prvková analýza je prováděna na základě charakteristického rentgenového záření, které jednotlivé prvky vyzařují.

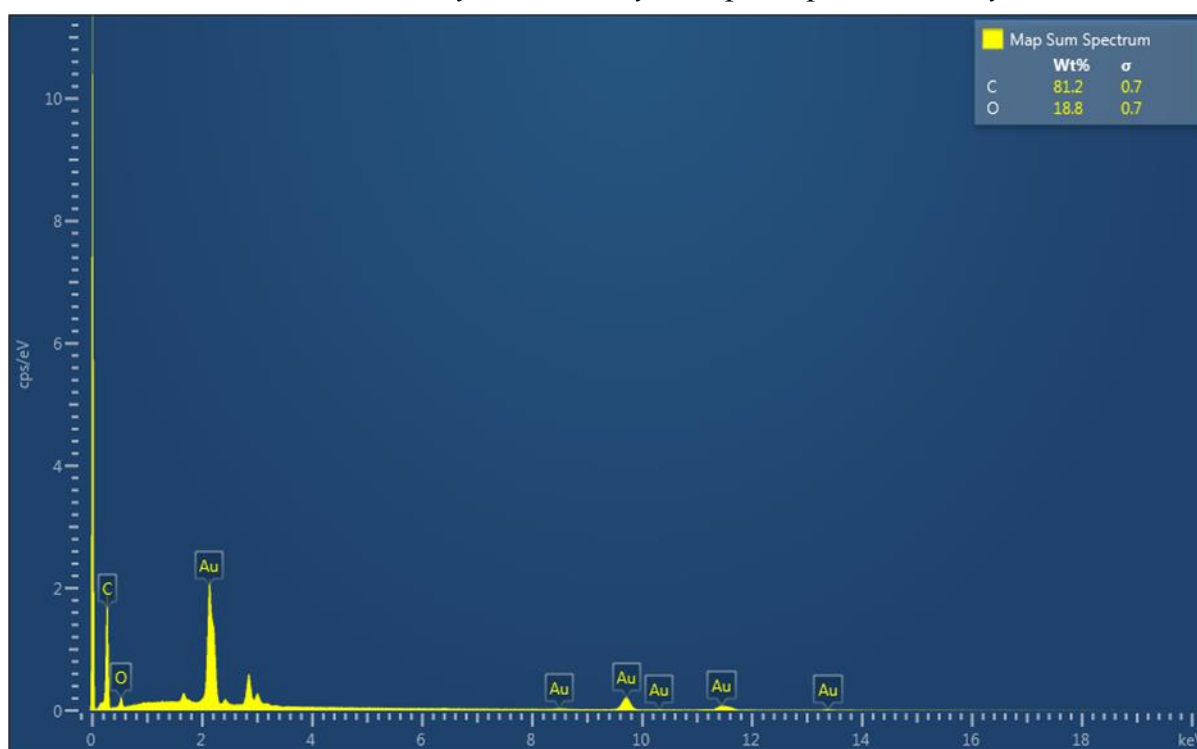
Tab. 7.10: PC - Závislost obsahu kyslíku v povrchové vrstvě na teplotě taveniny

Teplota taveniny [°C]	Obsah kyslíku na povrchu [hm. %]	Obsah kyslíku v povrchové vrstvě lomu [hm. %]
280	16,1 $\delta = 1,4$	18,8 $\delta = 0,7$
290	16,4 $\delta = 1,1$	17,8 $\delta = 0,4$
300	17,3 $\delta = 1,8$	17,2 $\delta = 0,4$

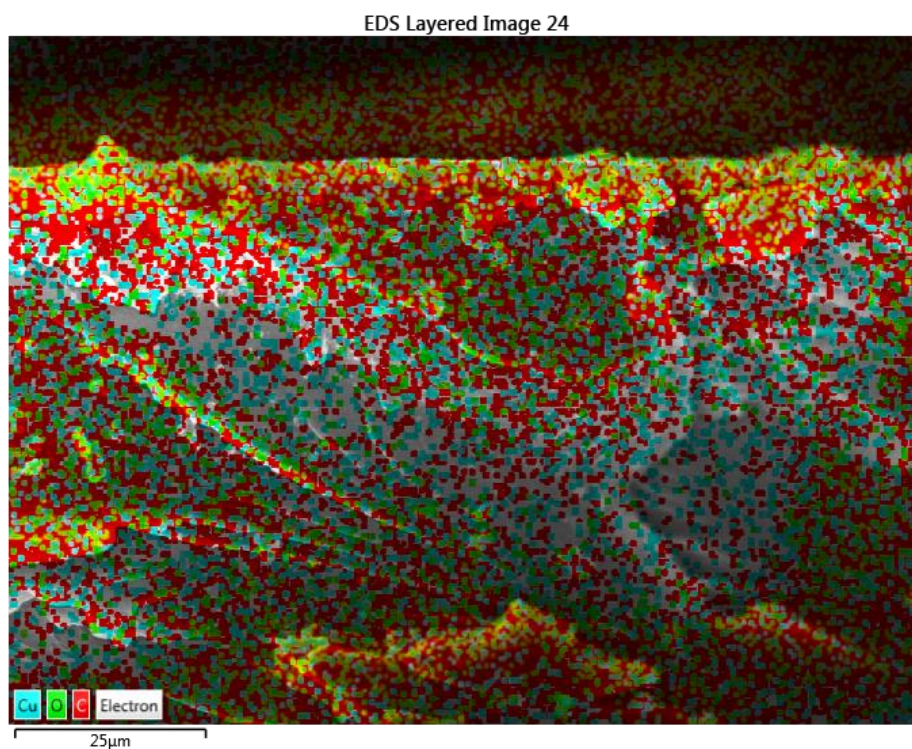
Výsledky vyhodnocení obsahu kyslíku v povrchové vrstvě lomu a na povrchu zkušebních těles (místa měření nano-tvrlosti) pomocí EDS analýzy v elektronovém mikroskopu jsou znázorněny v Tab. 7.10. Tloušťka hodnocené vrstvy na lomové ploše od povrchu je cca 75 μm . Z výsledků vyplývá, že u povrchové vrstvy dochází ke zvyšování obsahu kyslíku s rostoucí teplotou taveniny. Oproti tomu v povrchové vrstvě lomu dochází ke snižování obsahu kyslíku s rostoucí teplotou taveniny. Nicméně u teploty taveniny došlo k naměření prakticky shodné hodnoty obsahu kyslíku (17,3 hm. %) jak v povrchové vrstvě, tak v povrchové vrstvě lomu.



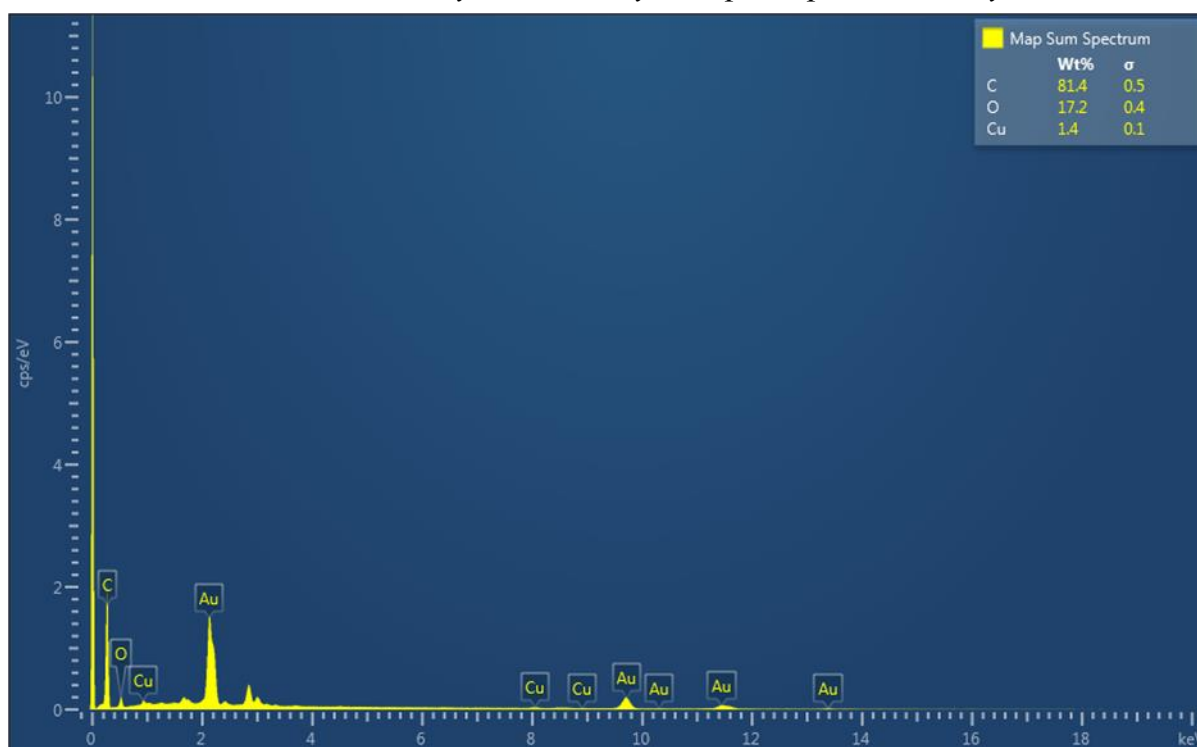
Obr. 7.26: PC – EDS analýza obsahu kyslíku pro teplotu taveniny 280 °C.



Obr. 7.27: PC – EDS analýza obsahu prvků pro teplotu taveniny 280 °C.



Obr. 7.28: PC – EDS analýza obsahu kyslíku pro teplotu taveniny 300 °C.



Obr. 7.29: PC – EDS analýza obsahu prvků pro teplotu taveniny 300 °C.

7.2 Vysokohustotní polyetylen (HDPE)

Za stejných podmínek jako v případě PC probíhalo testování tvrdosti vstřikovaných HDPE zkušebních těles. Statistické vyhodnocení naměřených dat je zobrazeno v *Tab. 7.11 až Tab. 7.19*. U všech testovaných zkušebních těles je zřetelná tendence ke zvyšování tvrdosti se zvyšující se teplotou taveniny a mírným nárůstem tvrdosti se zvyšující se teplotou vstřikovací formy, přičemž tendence růstu tvrdosti je ve všech případech zachována.

Při nejnižším aplikovaném zatížení (0,5 – 10 mN) docházelo k velmi mírnému nárůstu tvrdosti (cca 3-5 %), viz *Obr. 7.30 až Obr. 7.33*, při zvyšující se teplotě taveniny a zvyšující se teplotě formy. Tato tendence je velmi dobře patrná i z *Obr. 7.34 až Obr. 7.39*. *Obr. 7.43 až Obr. 7.46*, znázorňují vzájemný vztah mezi tvrdostí a hloubkou průniku, kde je patrná relativně velmi malá změna tvrdosti se změnou hloubky vtisku. K významné změně tvrdosti (cca 20 %) došlo při aplikaci zatížení 50 mN, kde se hloubka vtisku pohybovala do 10 μm (*Obr. 7.34 a Obr. 7.40 až Obr. 7.42*). Další zvyšování indentační síly přineslo zvětšení hloubky vtisku, ale tvrdost se měnila s hloubkou vtisku jen nepatrně (*Obr. 7.35 až Obr. 7.39*). Obdobný průběh tvrdostí byl zaznamenán u všech teplot taveniny i formy (*Obr. 7.43 až Obr. 7.51*).

Z mikroskopických snímků je možno identifikovat dvě vrstvy. Vrstva I má tloušťku cca 1 μm (*Obr. 7.52 až Obr. 7.54*). Z hlediska měření tvrdosti odpovídá zatížení indentoru v rozsahu 0,5 – 1 mN. Tloušťka uvedené vrstvy je v rozsahu možností měření dostupnými tvrdoměry, v konkrétním případě ultranano tvrdoměr. Tvrdost HV vrstvy I je v rozsahu 2,7 – 3,0. Tvrdost vrstvy II se pohybuje v rozsahu 3,5 – 3,8 a tvrdost „substrátu“ zůstává v podstatě stejná při každém zvoleném zatížení indentoru, což je v souladu s naměřenou hloubkou indentace.

Tab. 7.11: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (HDPE), vstřikovací teplota 200 °C, teplota formy 40 °C.

n = 10	X	m	s	U_A	min	max
HV_{0,00005} [-]	2,7	2,7	0,0	0,0	2,7	2,8
h_{max 0,00005} [nm]	907	918	31	10	864	952
HV_{0,000075} [-]	2,8	2,7	0,1	0,0	2,7	3,0
h_{max 0,000075} [nm]	1092	1099	39	12	1045	1138
HV_{0,0001} [-]	2,8	2,7	0,2	0,1	2,7	3,1
h_{max 0,0001} [nm]	1308	1324	45	14	1233	1356
HV_{0,001} [-]	2,8	2,8	0,1	0,0	2,7	3,0
h_{max 0,001} [nm]	4144	4142	86	27	4033	4292
HV_{0,005} [-]	3,5	3,5	0,1	0,0	3,5	3,7
h_{max 0,005} [nm]	7793	7952	260	82	7364	8020
HV_{0,01} [-]	3,6	3,5	0,1	0,0	3,4	3,7
h_{max 0,01} [nm]	11466	11475	100	32	11299	11591
HV_{0,025} [-]	3,7	3,7	0,0	0,0	3,6	3,7
h_{max 0,025} [nm]	18098	18101	133	42	17881	18248
HV_{0,05} [-]	3,6	3,6	0,1	0,0	3,5	3,8
h_{max 0,05} [nm]	26186	26318	440	139	25584	26790
HV_{0,1} [-]	3,7	3,8	0,1	0,0	3,6	3,8
h_{max 0,1} [nm]	37579	37787	442	140	36717	37951
HV_{0,5} [-]	3,7	3,6	0,1	0,0	3,5	3,9
h_{max 0,5} [nm]	81623	81206	810	256	80896	83088

Tab. 7.12: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (HDPE), vstřikovací teplota 200 °C, teplota formy 50 °C.

n = 10	X	m	s	U_A	min	max
HV 0,00005 [-]	2,9	2,9	0,1	0,0	2,7	3,0
h_{max} 0,00005 [nm]	863	873	26	8	827	893
HV 0,000075 [-]	3,0	3,0	0,1	0,0	2,9	3,2
h_{max} 0,000075 [nm]	1004	1028	40	13	955	1051
HV 0,0001 [-]	3,0	3,0	0,1	0,0	2,9	3,1
h_{max} 0,0001 [nm]	1172	1170	35	11	1126	1233
HV 0,001 [-]	3,1	3,0	0,1	0,0	3,0	3,3
h_{max} 0,001 [nm]	3672	3674	85	27	3520	3779
HV 0,005 [-]	3,6	3,6	0,1	0,0	3,6	3,7
h_{max} 0,005 [nm]	7989	8048	141	45	7760	8161
HV 0,01 [-]	3,7	3,6	0,1	0,0	3,5	3,8
h_{max} 0,01 [nm]	11506	11459	84	27	11419	11638
HV 0,025 [-]	3,7	3,7	0,1	0,0	3,5	3,8
h_{max} 0,025 [nm]	18175	18293	268	85	17643	18344
HV 0,05 [-]	3,7	3,7	0,1	0,0	3,5	3,8
h_{max} 0,05 [nm]	25507	25416	334	106	25066	26002
HV 0,1 [-]	3,7	3,7	0,1	0,0	3,6	3,9
h_{max} 0,1 [nm]	37435	37360	1118	354	36116	39392
HV 0,5 [-]	3,8	3,7	0,1	0,0	3,7	3,9
h_{max} 0,5 [nm]	80049	79324	1145	362	79064	81922

Tab. 7.13: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (HDPE), vstřikovací teplota 200 °C, teplota formy 60 °C.

n = 10	X	m	s	U_A	min	max
HV 0,00005 [-]	3,0	3,0	0,1	0,0	2,9	3,1
h_{max} 0,00005 [nm]	824	803	47	15	783	913
HV 0,000075 [-]	3,1	3,1	0,1	0,0	2,9	3,2
h_{max} 0,000075 [nm]	1054	1063	55	17	967	1137
HV 0,0001 [-]	3,2	3,2	0,1	0,0	3,0	3,3
h_{max} 0,0001 [nm]	1293	1209	164	52	1187	1619
HV 0,001 [-]	3,2	3,2	0,1	0,0	3,0	3,3
h_{max} 0,001 [nm]	3731	3706	110	35	3606	3904
HV 0,005 [-]	3,8	3,8	0,1	0,0	3,7	4,0
h_{max} 0,005 [nm]	7875	7924	92	29	7761	7988
HV 0,01 [-]	3,9	3,9	0,1	0,0	3,7	4,1
h_{max} 0,01 [nm]	11265	11270	370	117	10637	11764
HV 0,025 [-]	3,9	3,8	0,1	0,0	3,7	4,1
h_{max} 0,025 [nm]	18039	18082	122	38	17825	18187
HV 0,05 [-]	3,9	4,0	0,1	0,0	3,7	4,1
h_{max} 0,05 [nm]	25556	25397	325	103	25248	26143
HV 0,1 [-]	3,9	4,0	0,1	0,0	3,7	4,0
h_{max} 0,1 [nm]	37163	37347	542	171	36519	37758
HV 0,5 [-]	3,9	3,9	0,1	0,0	3,7	4,1
h_{max} 0,5 [nm]	81116	81035	950	300	80029	82665

Tab. 7.14: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (HDPE), vstřikovací teplota 225 °C, teplota formy 40 °C.

n = 10	X	m	s	U_A	min	max
HV_{0,00005} [-]	2,8	2,8	0,1	0,0	2,7	2,9
h_{max 0,00005} [nm]	838	838	11	3	826	857
HV_{0,000075} [-]	2,9	3,0	0,1	0,0	2,8	3,0
h_{max 0,000075} [nm]	1052	1055	34	11	997	1101
HV_{0,0001} [-]	2,9	3,0	0,1	0,0	2,8	3,1
h_{max 0,0001} [nm]	1242	1255	26	8	1204	1271
HV_{0,001} [-]	3,0	2,9	0,1	0,0	2,8	3,1
h_{max 0,001} [nm]	3819	3824	119	38	3649	3974
HV_{0,005} [-]	3,7	3,7	0,1	0,0	3,6	3,8
h_{max 0,005} [nm]	7841	7861	41	13	7763	7874
HV_{0,01} [-]	3,7	3,6	0,1	0,0	3,5	3,9
h_{max 0,01} [nm]	11269	11257	92	29	11169	11416
HV_{0,025} [-]	3,8	3,8	0,1	0,0	3,6	3,9
h_{max 0,025} [nm]	17836	17843	177	56	17609	18125
HV_{0,05} [-]	3,8	3,7	0,1	0,0	3,7	3,9
h_{max 0,05} [nm]	24041	23853	394	124	23760	24817
HV_{0,1} [-]	3,8	3,8	0,1	0,0	3,7	3,9
h_{max 0,1} [nm]	35741	35846	268	85	35264	36056
HV_{0,5} [-]	3,8	3,8	0,1	0,0	3,7	3,9
h_{max 0,5} [nm]	79535	79714	1015	321	78001	81016

Tab. 7.15: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (HDPE), vstřikovací teplota 225 °C, teplota formy 50 °C.

n = 10	X	m	s	U_A	min	max
HV_{0,00005} [-]	3,0	2,9	0,1	0,0	2,9	3,2
h_{max 0,00005} [nm]	854	854	21	7	816	876
HV_{0,000075} [-]	3,1	3,1	0,1	0,0	3,0	3,2
h_{max 0,000075} [nm]	1100	1092	49	15	1040	1166
HV_{0,0001} [-]	3,1	3,1	0,1	0,0	2,9	3,2
h_{max 0,0001} [nm]	1221	1249	71	23	1103	1288
HV_{0,001} [-]	3,1	3,1	0,2	0,1	2,9	3,4
h_{max 0,001} [nm]	3853	3871	105	33	3672	3997
HV_{0,005} [-]	3,8	3,8	0,1	0,0	3,6	3,9
h_{max 0,005} [nm]	7599	7570	99	31	7504	7785
HV_{0,01} [-]	3,7	3,7	0,1	0,0	3,7	3,8
h_{max 0,01} [nm]	11142	11113	183	58	10880	11392
HV_{0,025} [-]	3,8	3,8	0,1	0,0	3,6	4,0
h_{max 0,025} [nm]	17569	17620	295	93	17021	17911
HV_{0,05} [-]	3,8	3,7	0,1	0,0	3,5	3,9
h_{max 0,05} [nm]	24967	25079	622	197	23860	25781
HV_{0,1} [-]	3,9	3,9	0,1	0,0	3,7	4,1
h_{max 0,1} [nm]	36464	36658	453	143	35869	37000
HV_{0,5} [-]	3,8	3,9	0,1	0,0	3,7	3,9
h_{max 0,5} [nm]	81404	81411	1084	343	79622	83024

Tab. 7.16: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (HDPE), vstřikovací teplota 225 °C, teplota formy 60 °C.

n = 10	X	m	s	U_A	min	max
HV_{0,00005} [-]	3,1	3,2	0,1	0,0	3,0	3,3
h_{max 0,00005} [nm]	689	690	59	19	614	759
HV_{0,000075} [-]	3,3	3,3	0,2	0,1	3,0	3,5
h_{max 0,000075} [nm]	900	902	116	37	712	1029
HV_{0,0001} [-]	3,2	3,2	0,2	0,1	3,0	3,5
h_{max 0,0001} [nm]	1159	1157	37	12	1112	1202
HV_{0,001} [-]	3,3	3,2	0,1	0,0	3,2	3,4
h_{max 0,001} [nm]	3717	3725	63	20	3639	3795
HV_{0,005} [-]	3,9	3,9	0,1	0,0	3,8	4,0
h_{max 0,005} [nm]	7614	7609	58	18	7539	7717
HV_{0,01} [-]	4,0	4,0	0,1	0,0	3,8	4,2
h_{max 0,01} [nm]	10877	10911	75	24	10736	10942
HV_{0,025} [-]	4,0	4,0	0,2	0,1	3,8	4,2
h_{max 0,025} [nm]	17408	17374	98	31	17281	17544
HV_{0,05} [-]	4,0	4,1	0,1	0,0	3,7	4,2
h_{max 0,05} [nm]	24899	24881	622	197	24226	26011
HV_{0,1} [-]	4,0	4,0	0,1	0,0	3,9	4,2
h_{max 0,1} [nm]	36166	36150	649	205	35409	37274
HV_{0,5} [-]	4,0	3,9	0,1	0,0	3,9	4,2
h_{max 0,5} [nm]	80169	79765	1177	372	78429	81608

Tab. 7.17: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (HDPE), vstřikovací teplota 250 °C, teplota formy 40 °C.

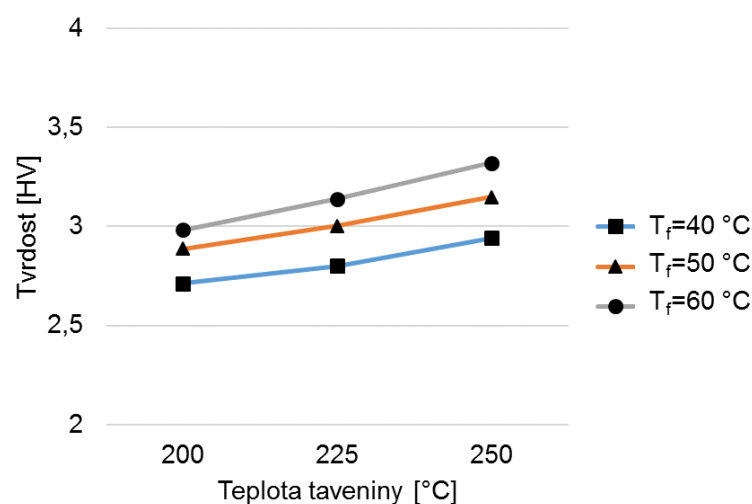
n = 10	X	m	s	U_A	min	max
HV_{0,00005} [-]	2,9	3,0	0,1	0,0	2,8	3,1
h_{max 0,00005} [nm]	862	873	46	14	775	905
HV_{0,000075} [-]	3,0	3,0	0,1	0,0	2,9	3,2
h_{max 0,000075} [nm]	1088	1095	39	12	1027	1146
HV_{0,0001} [-]	3,0	3,1	0,1	0,0	2,9	3,2
h_{max 0,0001} [nm]	1227	1221	13	4	1214	1249
HV_{0,001} [-]	3,0	3,0	0,1	0,0	2,9	3,1
h_{max 0,001} [nm]	3877	3876	53	17	3796	3958
HV_{0,005} [-]	3,8	3,8	0,1	0,0	3,7	3,9
h_{max 0,005} [nm]	7332	7410	257	81	6975	7621
HV_{0,01} [-]	3,8	3,8	0,1	0,0	3,8	3,9
h_{max 0,01} [nm]	10811	10779	133	42	10619	10988
HV_{0,025} [-]	3,8	3,8	0,1	0,0	3,8	3,9
h_{max 0,025} [nm]	17412	17398	88	28	17295	17525
HV_{0,05} [-]	3,9	3,9	0,1	0,0	3,7	4,0
h_{max 0,05} [nm]	24808	25015	697	220	23530	25641
HV_{0,1} [-]	3,9	3,9	0,1	0,0	3,9	4,1
h_{max 0,1} [nm]	36222	36360	623	197	35161	37063
HV_{0,5} [-]	3,9	3,9	0,1	0,0	3,7	4,0
h_{max 0,5} [nm]	82442	82634	1217	385	80968	84439

Tab. 7.18: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (HDPE), vstřikovací teplota 250 °C, teplota formy 50 °C.

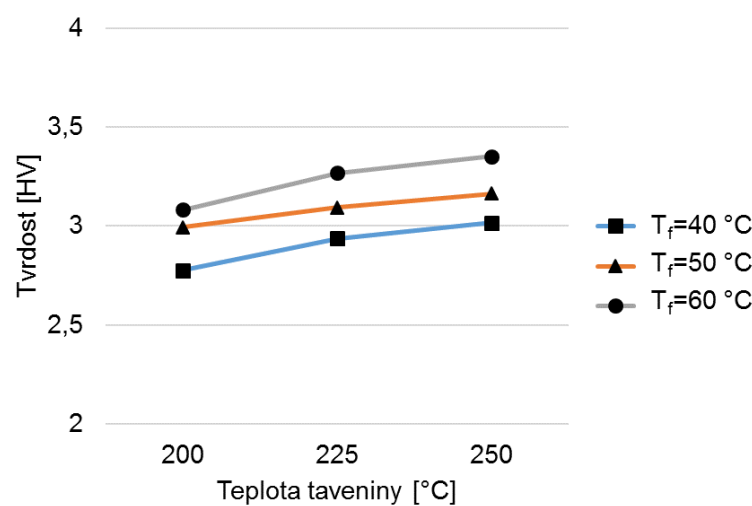
n = 10	X	m	s	U_A	min	max
HV_{0,00005} [-]	3,1	3,1	0,2	0,1	2,9	3,4
h_{max 0,00005} [nm]	847	863	38	12	796	892
HV_{0,000075} [-]	3,2	3,2	0,1	0,0	3,0	3,3
h_{max 0,000075} [nm]	1059	1067	14	5	1032	1072
HV_{0,0001} [-]	3,2	3,2	0,2	0,0	3,1	3,5
h_{max 0,0001} [nm]	1183	1184	28	9	1154	1233
HV_{0,001} [-]	3,3	3,2	0,2	0,1	3,0	3,6
h_{max 0,001} [nm]	3677	3758	180	57	3335	3852
HV_{0,005} [-]	3,9	3,8	0,4	0,1	3,7	4,7
h_{max 0,005} [nm]	7569	7717	398	126	6791	7913
HV_{0,01} [-]	3,9	3,8	0,2	0,1	3,7	4,1
h_{max 0,01} [nm]	10856	10982	502	159	9907	11393
HV_{0,025} [-]	3,9	3,9	0,2	0,1	3,7	4,2
h_{max 0,025} [nm]	17930	17889	199	63	17692	18202
HV_{0,05} [-]	3,9	3,9	0,1	0,0	3,8	4,1
h_{max 0,05} [nm]	23983	24012	439	139	23229	24603
HV_{0,1} [-]	4,0	4,0	0,1	0,0	3,9	4,1
h_{max 0,1} [nm]	36125	36161	986	312	34435	37375
HV_{0,5} [-]	4,0	4,0	0,1	0,0	3,9	4,2
h_{max 0,5} [nm]	81589	81572	1566	495	79160	83884

Tab. 7.19: Statistické vyhodnocení naměřených hodnot (HDPE), vstřikovací teplota 250 °C, teplota formy 60 °C.

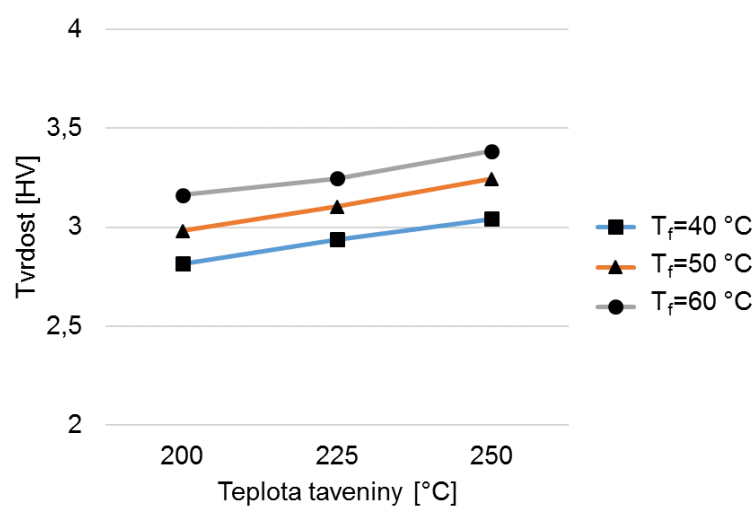
n = 10	X	m	s	U_A	min	max
HV_{0,00005} [-]	3,3	3,4	0,2	0,1	3,0	3,6
h_{max 0,00005} [nm]	792	792	26	8	750	824
HV_{0,000075} [-]	3,4	3,3	0,2	0,1	3,0	3,7
h_{max 0,000075} [nm]	1002	1006	9	3	989	1012
HV_{0,0001} [-]	3,4	3,5	0,2	0,1	3,1	3,7
h_{max 0,0001} [nm]	1169	1166	45	14	1103	1243
HV_{0,001} [-]	3,4	3,3	0,1	0,0	3,2	3,6
h_{max 0,001} [nm]	3792	3777	63	20	3728	3903
HV_{0,005} [-]	4,0	4,1	0,1	0,0	3,9	4,1
h_{max 0,005} [nm]	7368	7349	38	12	7337	7439
HV_{0,01} [-]	4,1	4,1	0,1	0,0	4,0	4,2
h_{max 0,01} [nm]	10315	10290	97	31	10226	10491
HV_{0,025} [-]	4,1	4,0	0,2	0,0	3,9	4,3
h_{max 0,025} [nm]	17146	17148	62	20	17042	17214
HV_{0,05} [-]	4,1	4,0	0,1	0,0	4,0	4,3
h_{max 0,05} [nm]	24948	25158	470	149	24011	25225
HV_{0,1} [-]	4,1	4,1	0,1	0,0	4,0	4,2
h_{max 0,1} [nm]	37598	37841	501	158	36676	38086
HV_{0,5} [-]	4,1	4,1	0,1	0,0	4,0	4,3
h_{max 0,5} [nm]	83354	80829	5361	1695	80253	94066



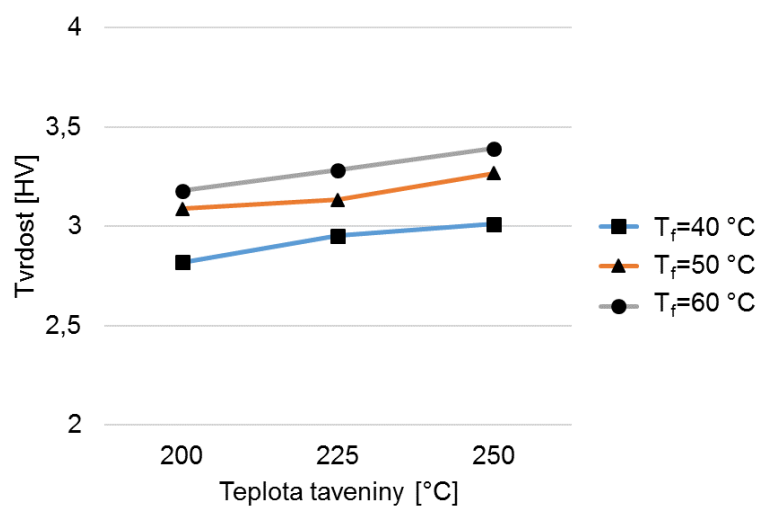
Obr. 7.30: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 0,5 mN.



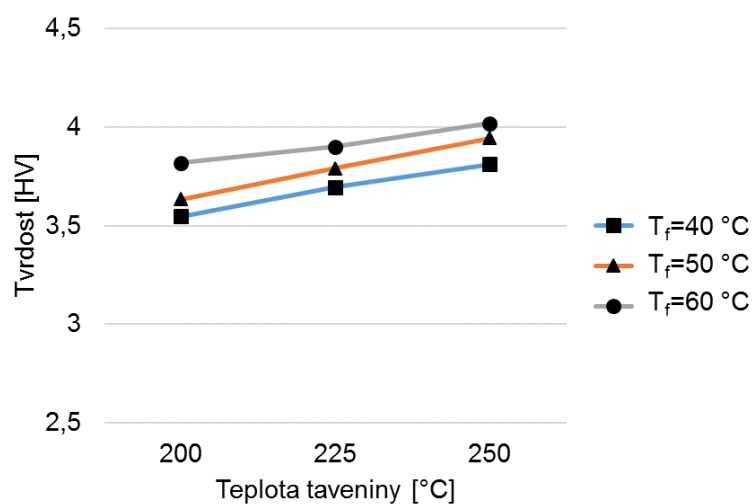
Obr. 7.31: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 0,75 mN.



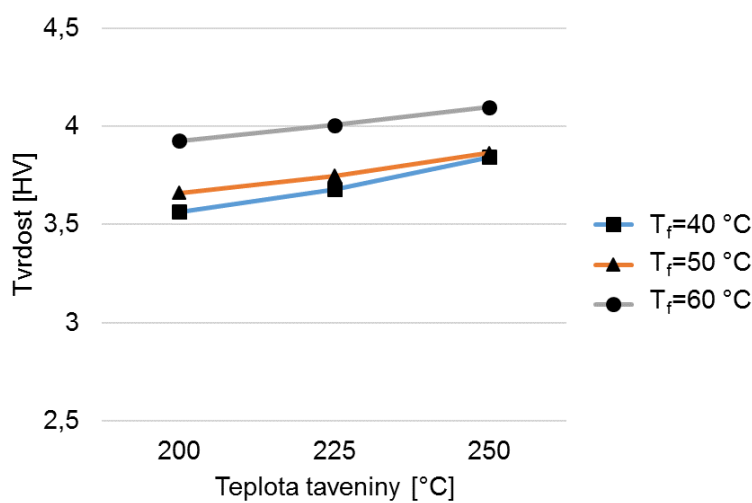
Obr. 7.32: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 1 mN.



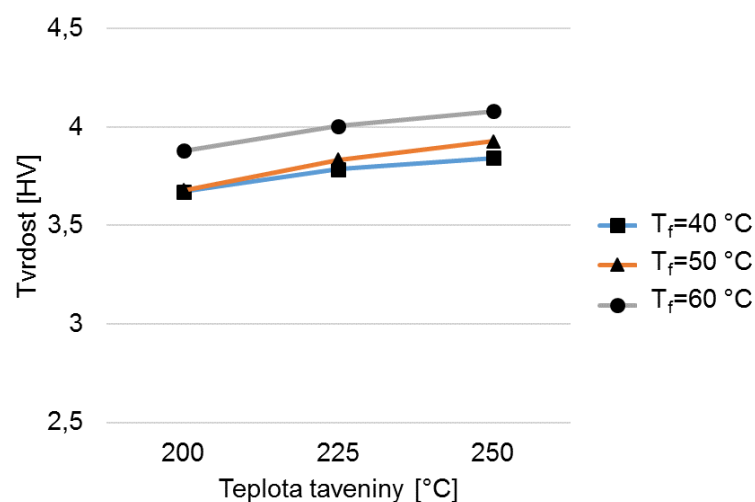
Obr. 7.33: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 10 mN.



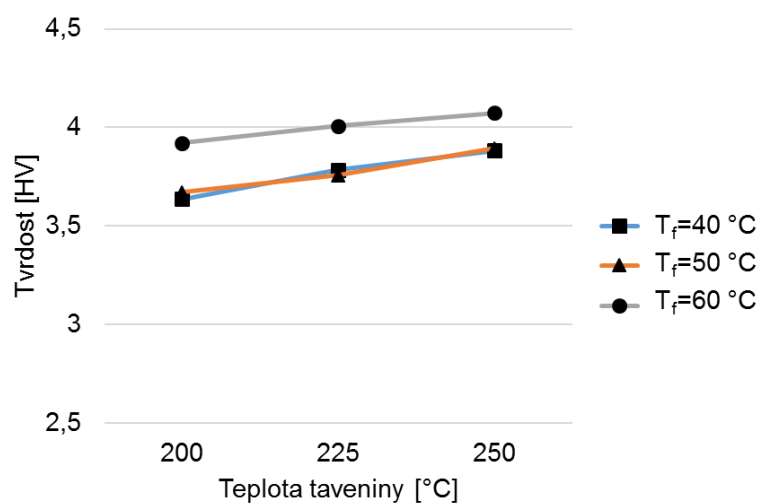
Obr. 7.34: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 50 mN.



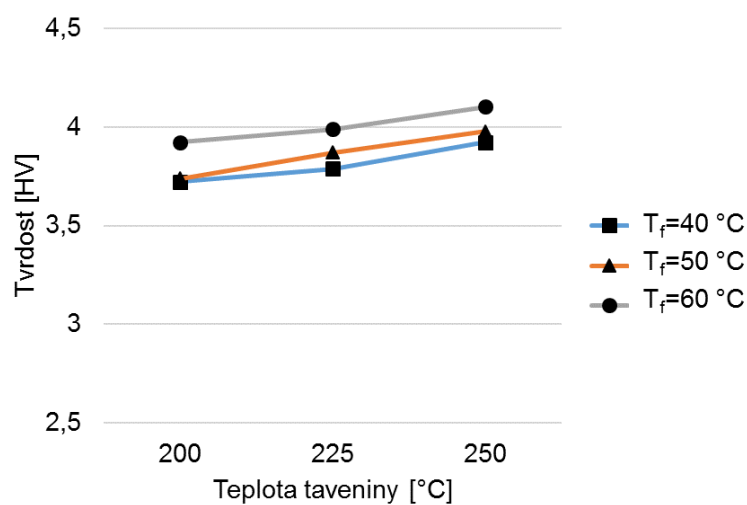
Obr. 7.35: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 100 mN.



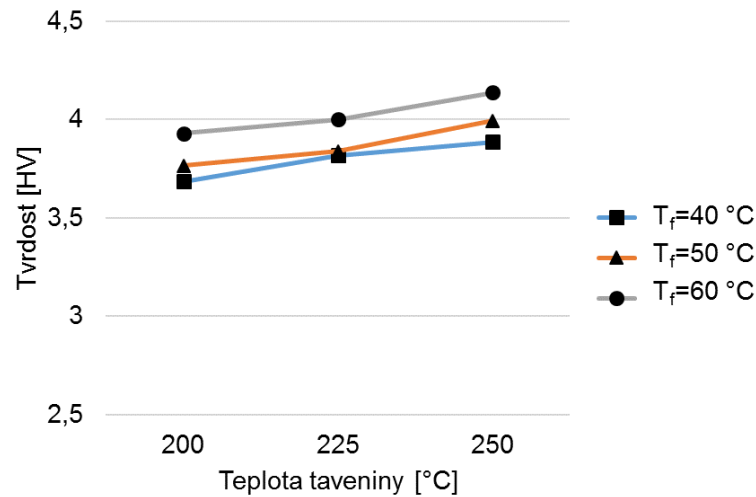
Obr. 7.36: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 250 mN.



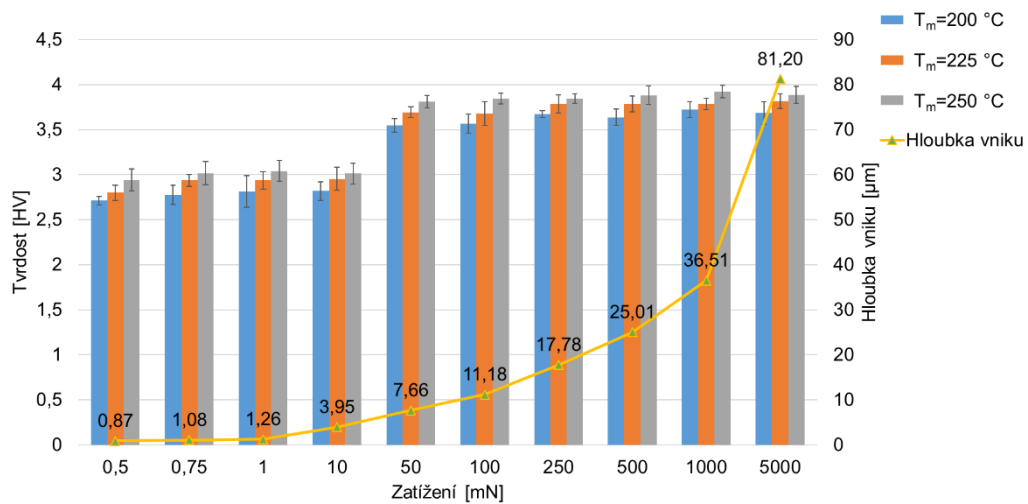
Obr. 7.37: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 500 mN.



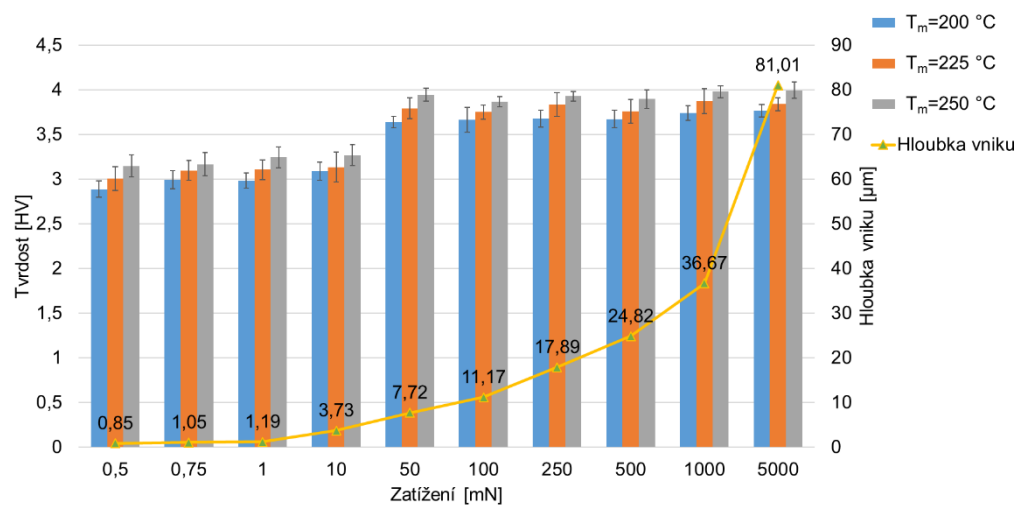
Obr. 7.38: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 1000 mN.



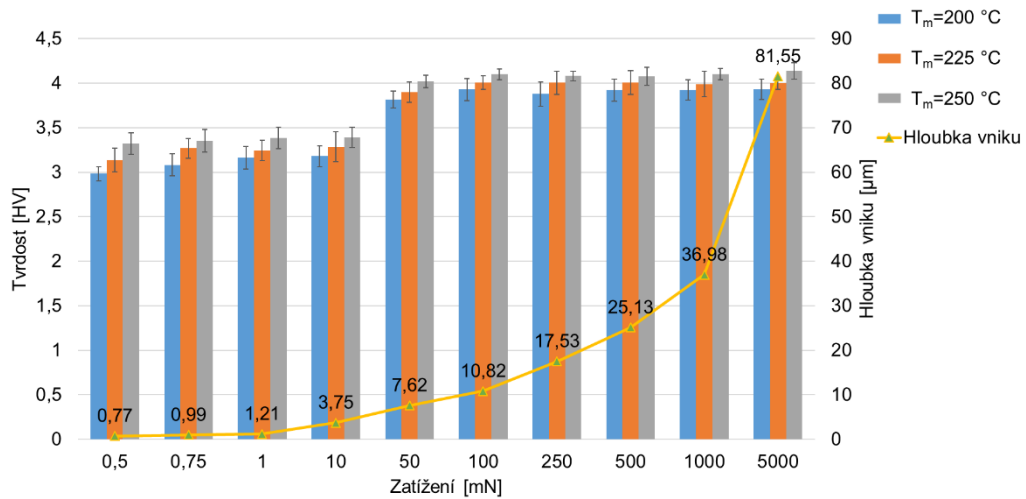
Obr. 7.39: HDPE – Závislost tvrdosti na teplotě taveniny a formy (T_f) při zatížení 5000 mN.



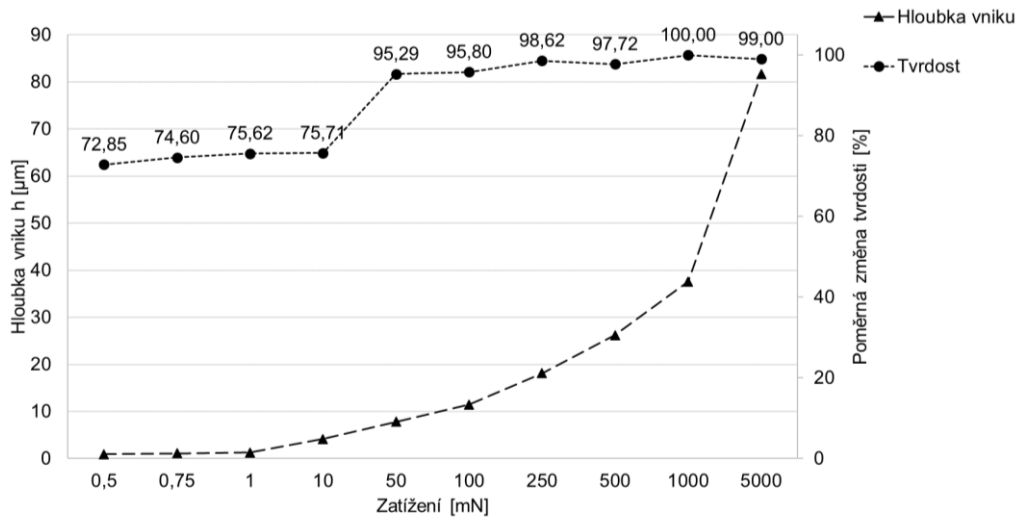
Obr. 7.40: HDPE – Závislost tvrdosti a hloubky vniku na zatížení při třech teplotách taveniny (T_m) a teplotě formy $T_f = 40$ °C.



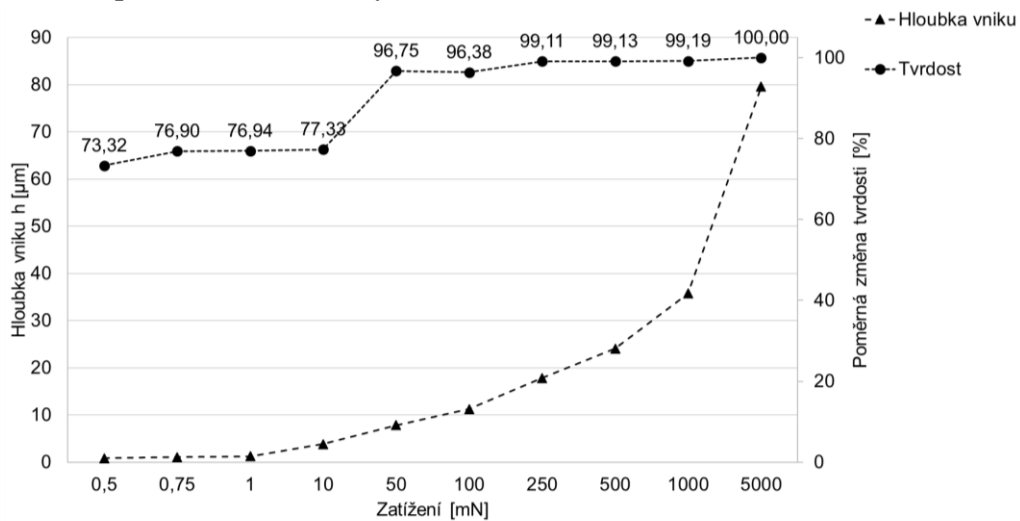
Obr. 7.41: HDPE – Závislost tvrdosti a hloubky vniku na zatížení při třech teplotách taveniny (T_m) a teplotě formy $T_f = 50$ °C.



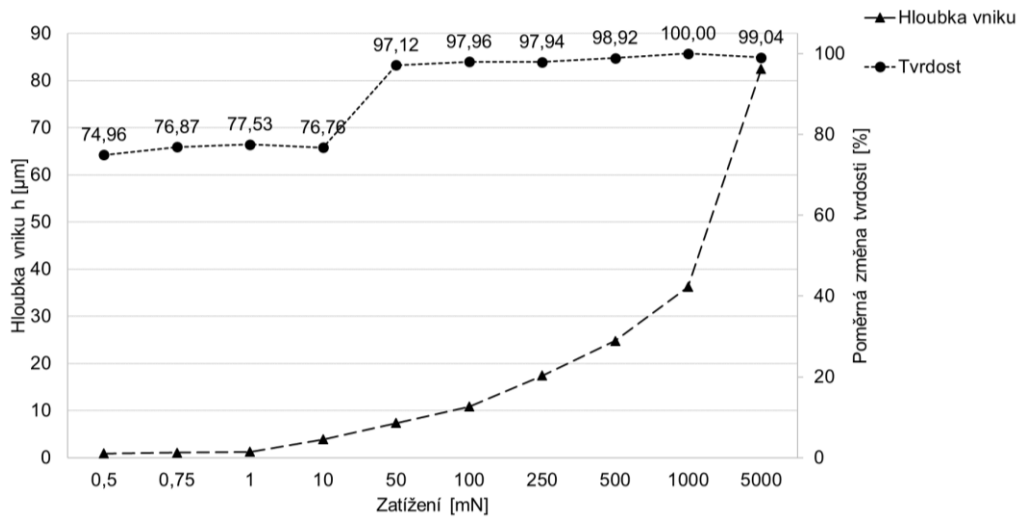
Obr. 7.42: HDPE – Závislost tvrdosti a hloubky vniku na zatížení při třech teplotách taveniny (T_m) a teplotě formy $T_f = 60\text{ °C}$.



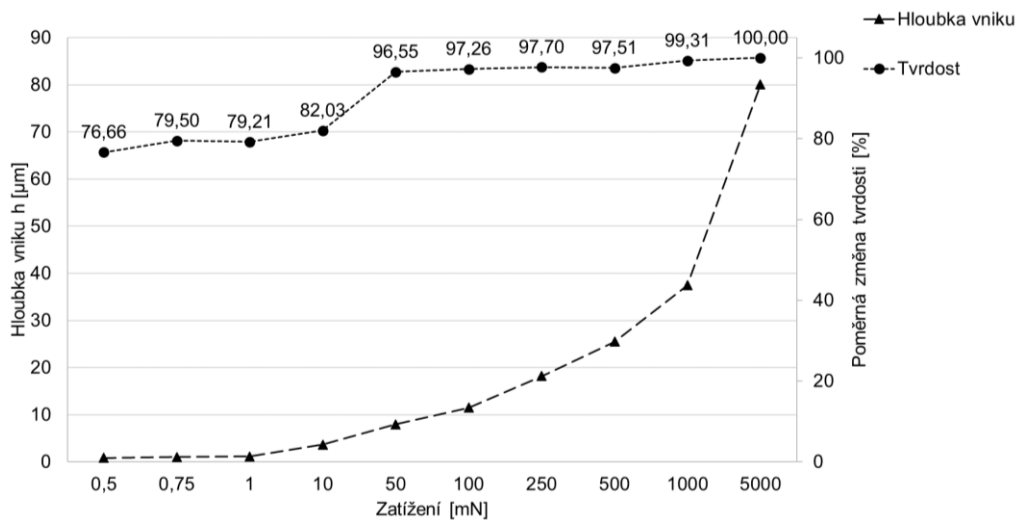
Obr. 7.43: HDPE – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 200\text{ °C}$, $T_f = 40\text{ °C}$.



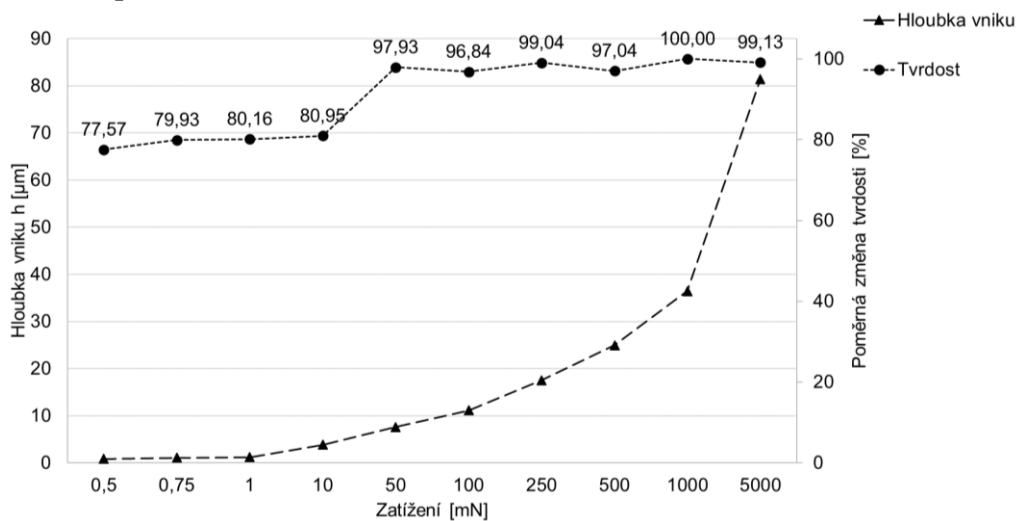
Obr. 7.44: HDPE – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 225\text{ °C}$, $T_f = 40\text{ °C}$.



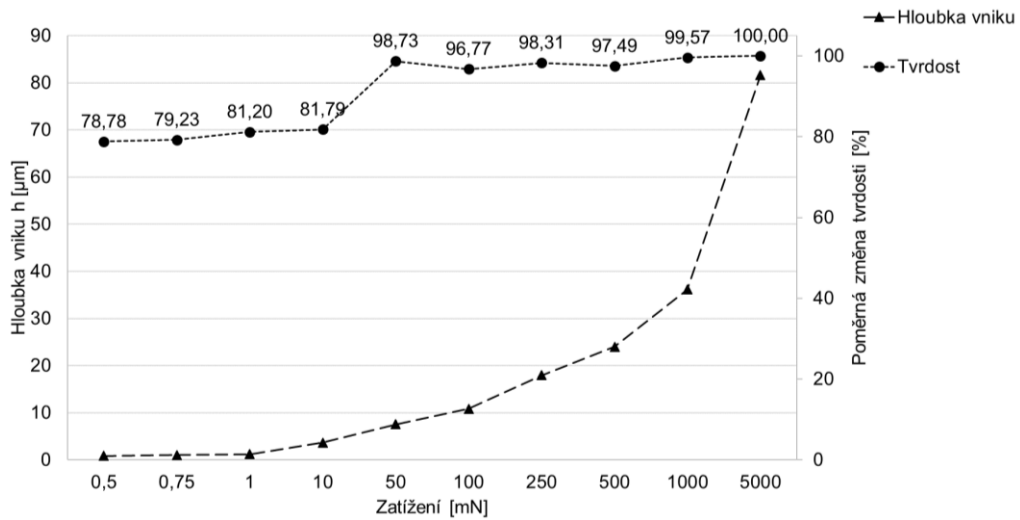
Obr. 7.45: HDPE – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.



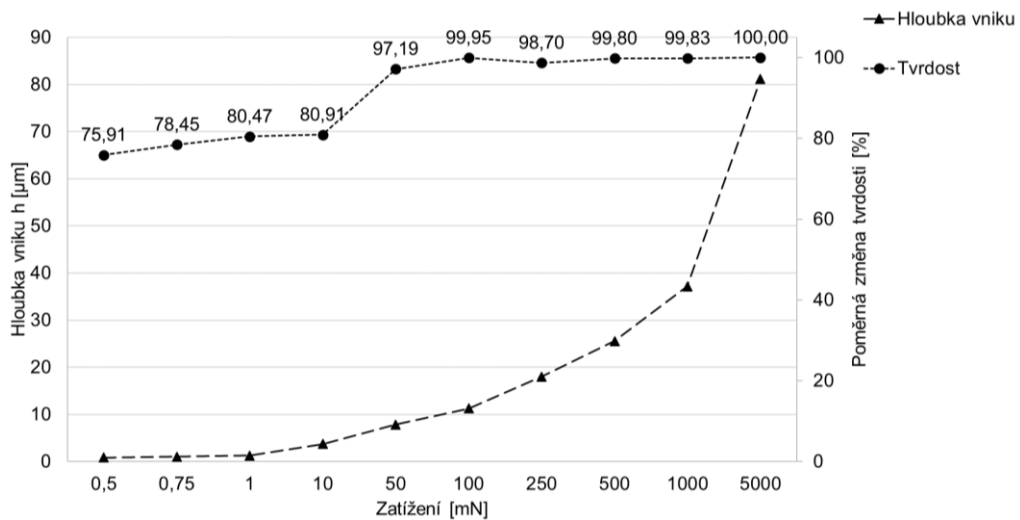
Obr. 7.46: HDPE – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 50 \text{ }^\circ\text{C}$.



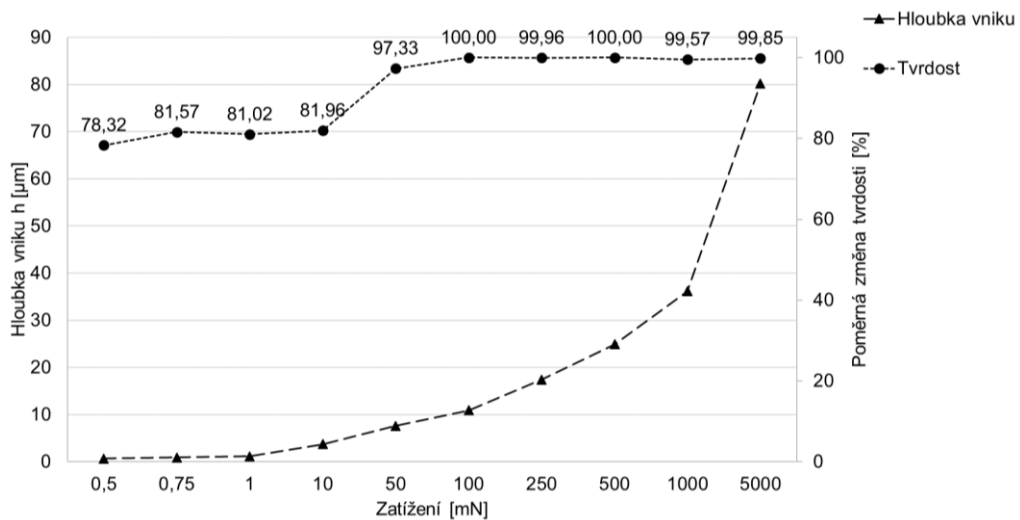
Obr. 7.47: HDPE – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 225 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 50 \text{ }^\circ\text{C}$.



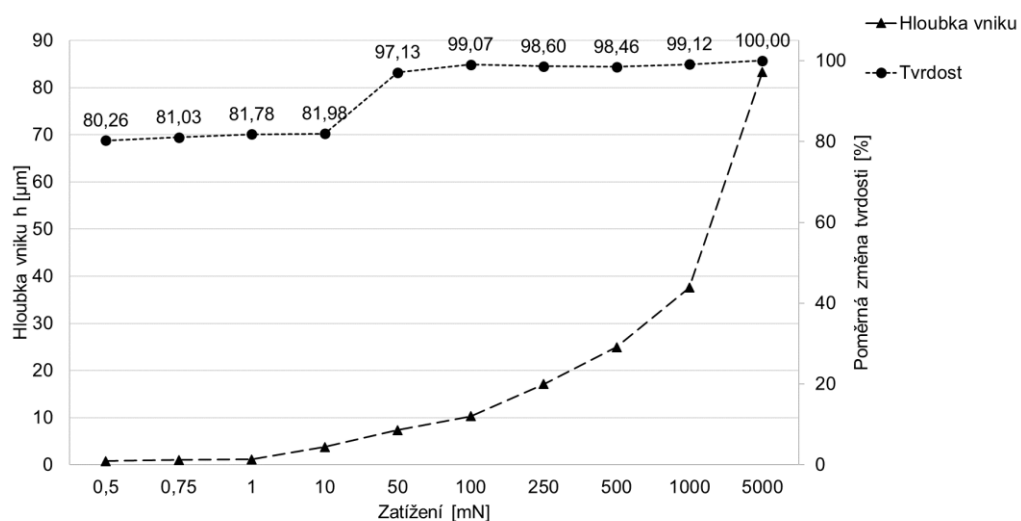
Obr. 7.48: HDPE – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 250\text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 50\text{ }^\circ\text{C}$.



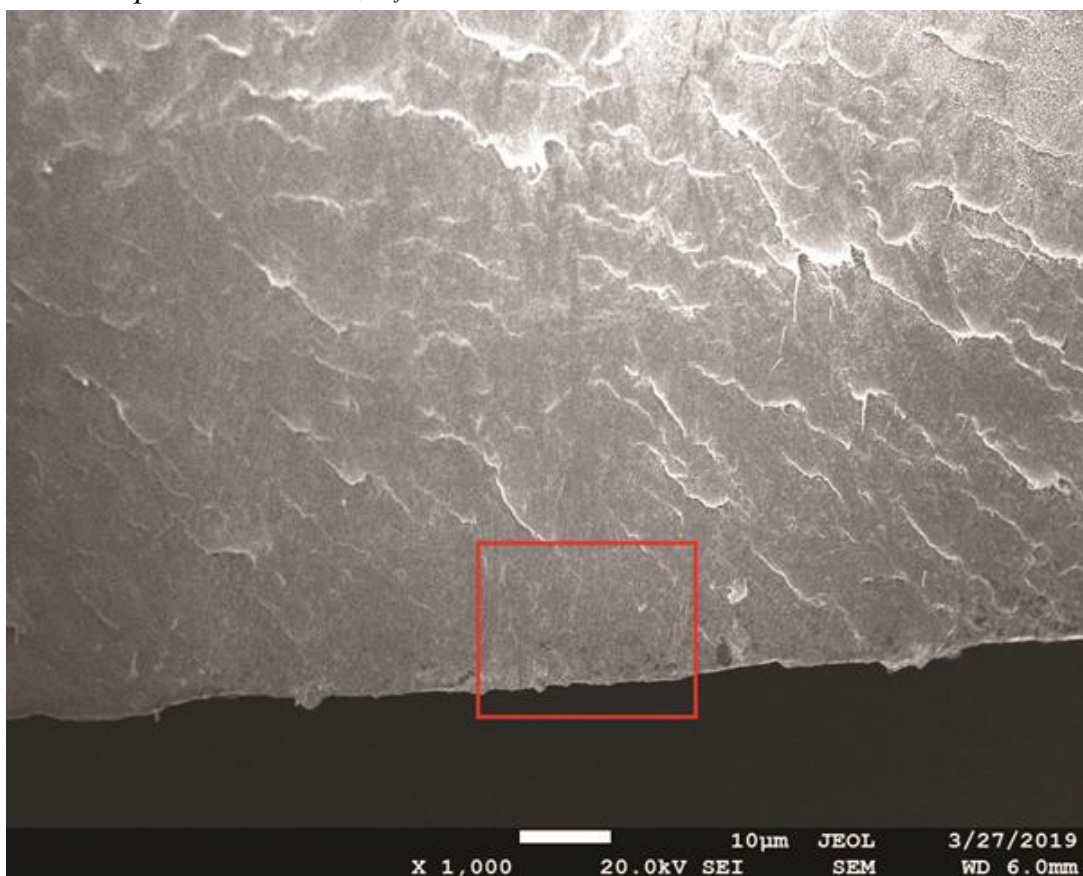
Obr. 7.49: HDPE – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 200\text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 60\text{ }^\circ\text{C}$.



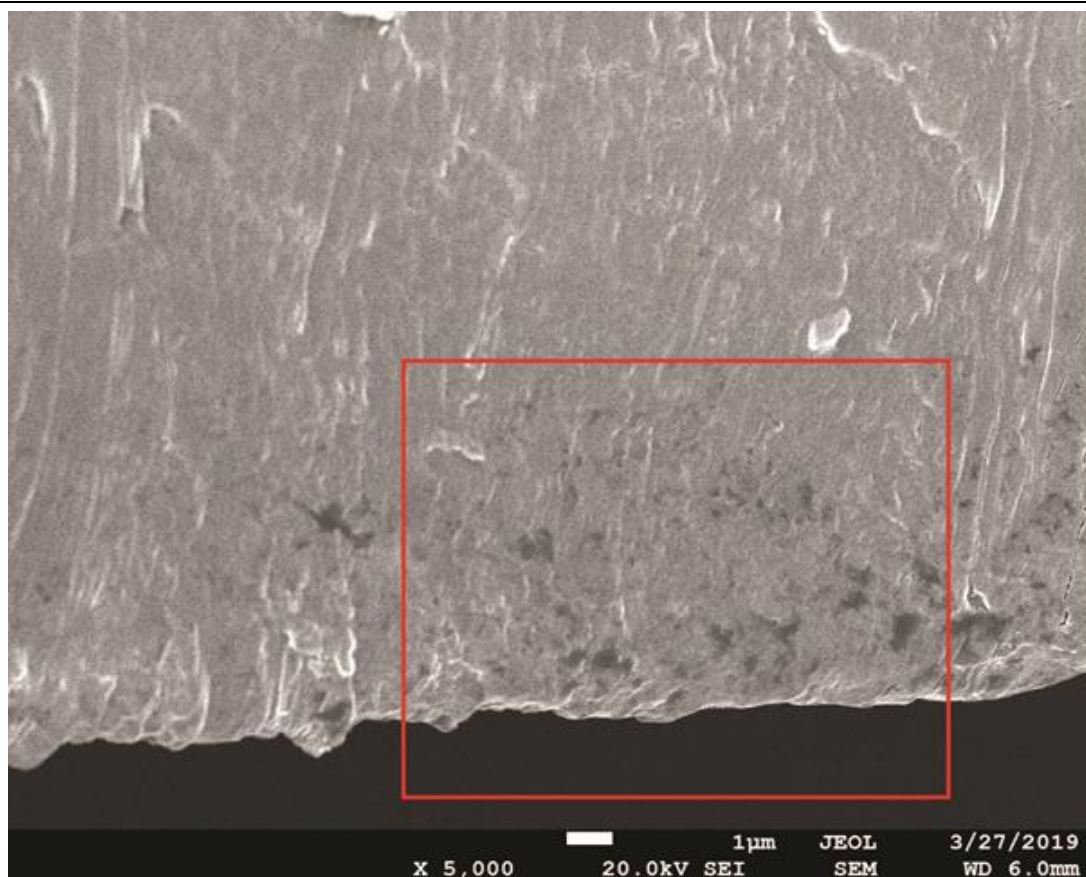
Obr. 7.50: HDPE – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 225\text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 60\text{ }^\circ\text{C}$.



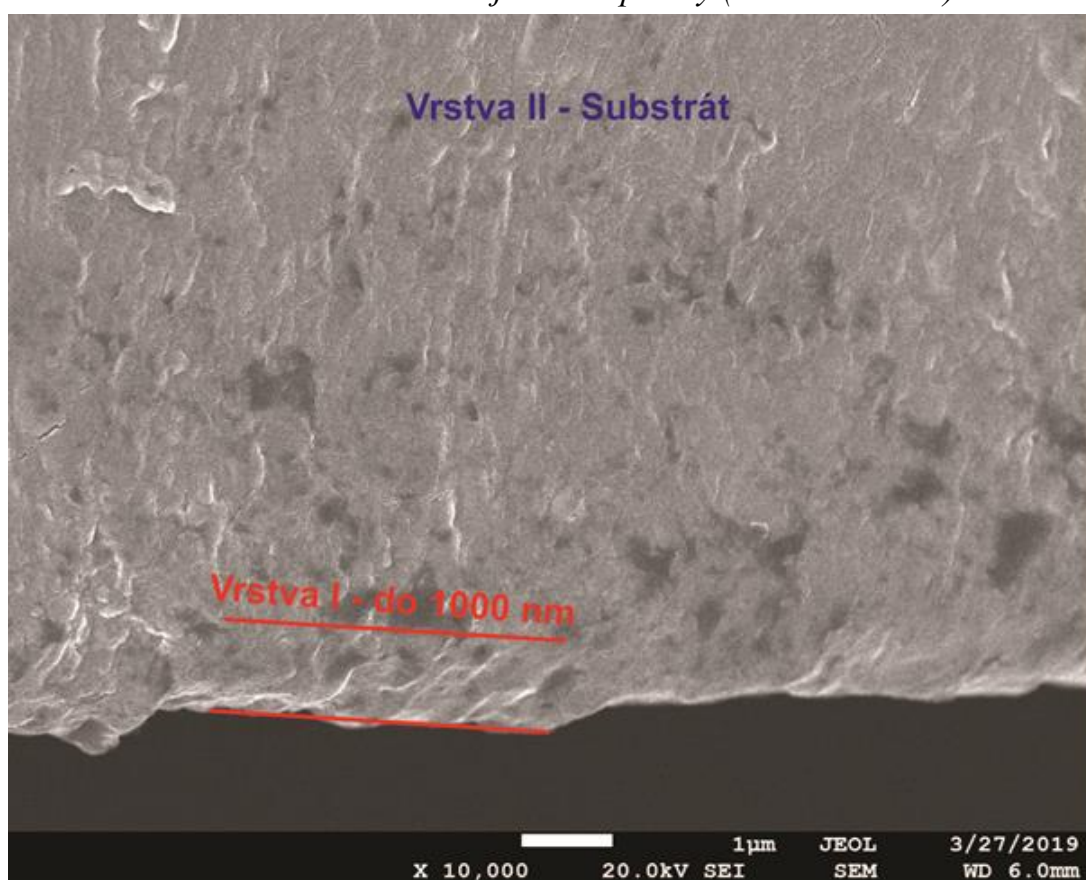
Obr. 7.51: HDPE – Procentuální změna tvrdosti v závislosti na hloubce vniku a zatížení při $T_m = 250\text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 60\text{ }^\circ\text{C}$.



Obr. 7.52: HDPE – Okraj lomové plochy (zvětšeno 1000x).



Obr. 7.53: HDPE – Okraj lomové plochy (zvětšeno 5000x).

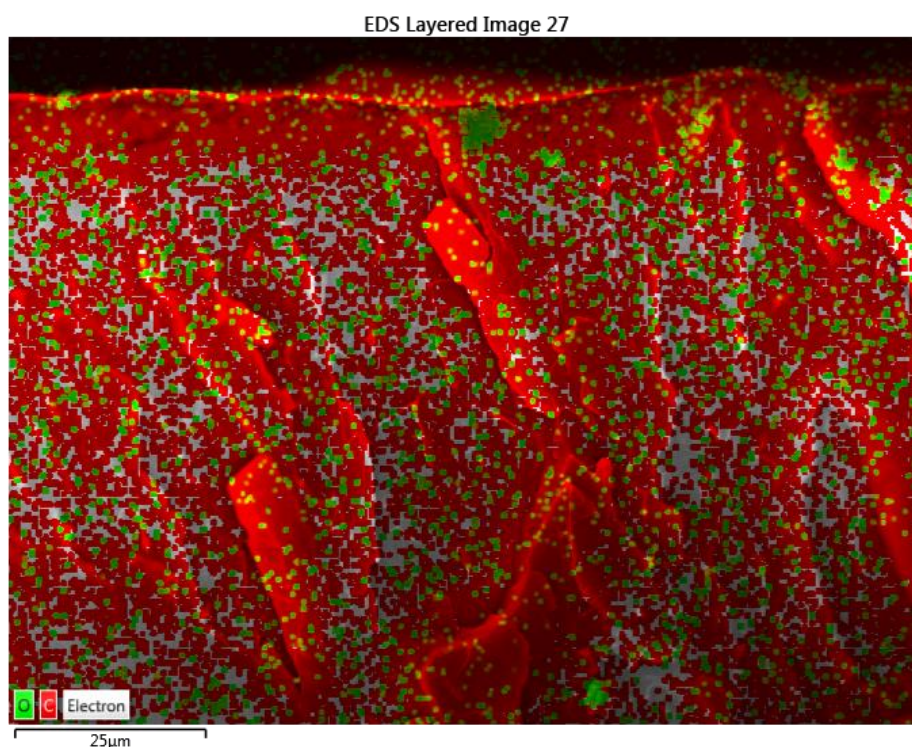


Obr. 7.54: HDPE – Okraj lomové plochy (zvětšeno 10000x).

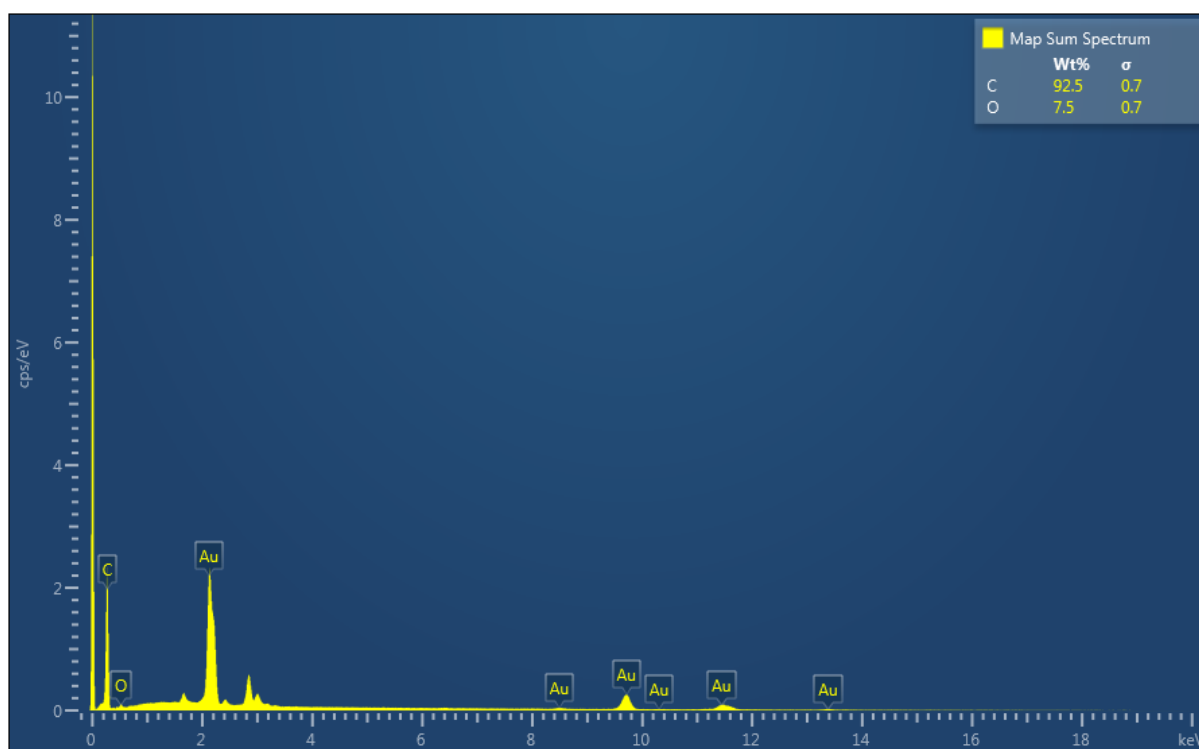
Stejně jako u PC byl k hodnocení povrchových vlastností použit rastrovací elektronový mikroskop s energiově disperzním analyzátozem (SEM/EDS) od společnosti JEOL. Výsledky vyhodnocení obsahu kyslíku v povrchové vrstvě lomu a na povrchu zkušebních těles (místa měření nano-tvrdomosti) pomoci EDS analýzy v elektronovém mikroskopu jsou znázorněny v *Tab. 7.20*. Tloušťka hodnocené vrstvy na lomové ploše od povrchu je cca 75 μm . Z výsledků vyplývá, že u povrchové vrstvy i u povrchové vrstvy lomu dochází ke snižování obsahu kyslíku s rostoucí teplotou taveniny. Oproti tomu v povrchové vrstvě lomu dochází ke snižování obsahu kyslíku s rostoucí teplotou taveniny. Při teplotě taveniny 250 $^{\circ}\text{C}$ došlo téměř k dvoj násobnému zvýšení obsahu kyslíku v povrchové vrstvě oproti povrchové vrstvě lomu (podpovrchové vrstvě). Což může způsobovat větší citlivost HDPE k termooxidační degradaci.

Tab. 7.20: HDPE - Závislost obsahu kyslíku v povrchové vrstvě na teplotě taveniny.

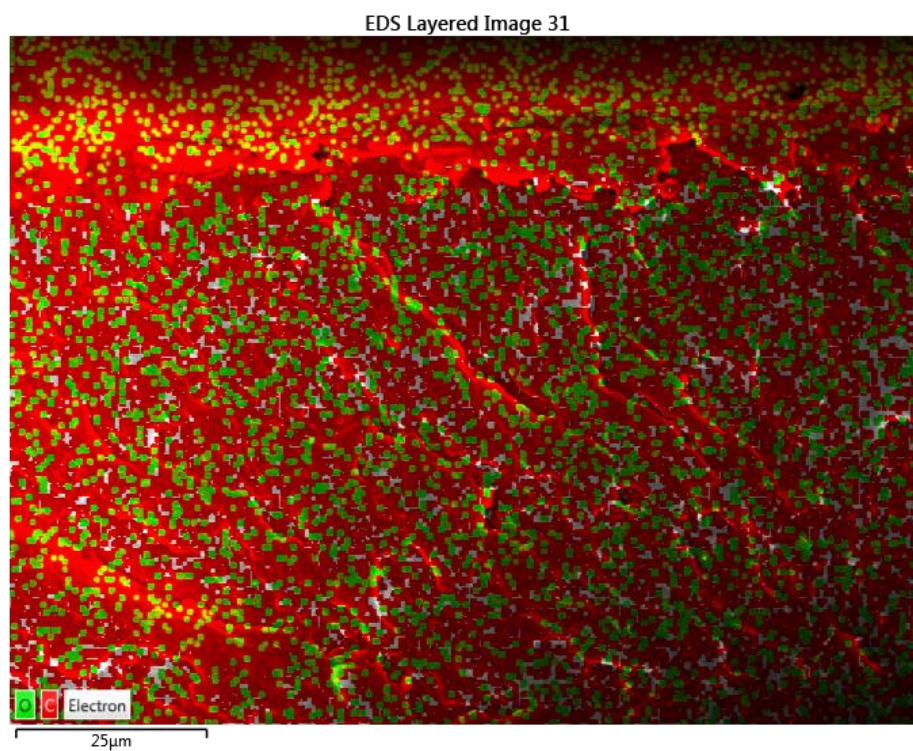
Teplota taveniny [$^{\circ}\text{C}$]	Obsah kyslíku na povrchu [hm. %]	Obsah kyslíku v povrchové vrstvě lomu [hm. %]
200	8,4 $\delta = 1,4$	7,5 $\delta = 0,7$
225	6,6 $\delta = 1,1$	6,7 $\delta = 0,8$
250	3,6 $\delta = 0,6$	1,8 $\delta = 0,6$



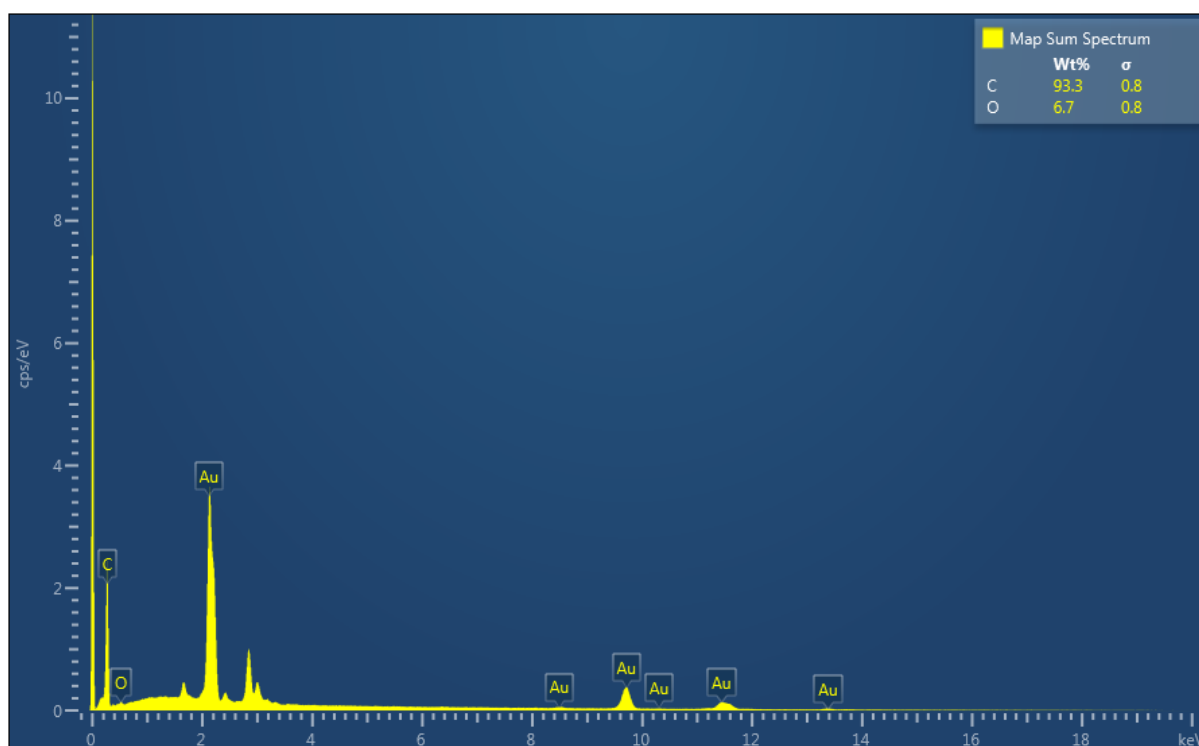
Obr. 7.55: HDPE – EDS analýza obsahu kyslíku pro teplotu taveniny 200 $^{\circ}\text{C}$.



Obr. 7.56: HDPE – EDS analýza obsahu prvků pro teplotu taveniny 200 °C.



Obr. 7.57: HDPE – EDS analýza obsahu kyslíku pro teplotu taveniny 250 °C.



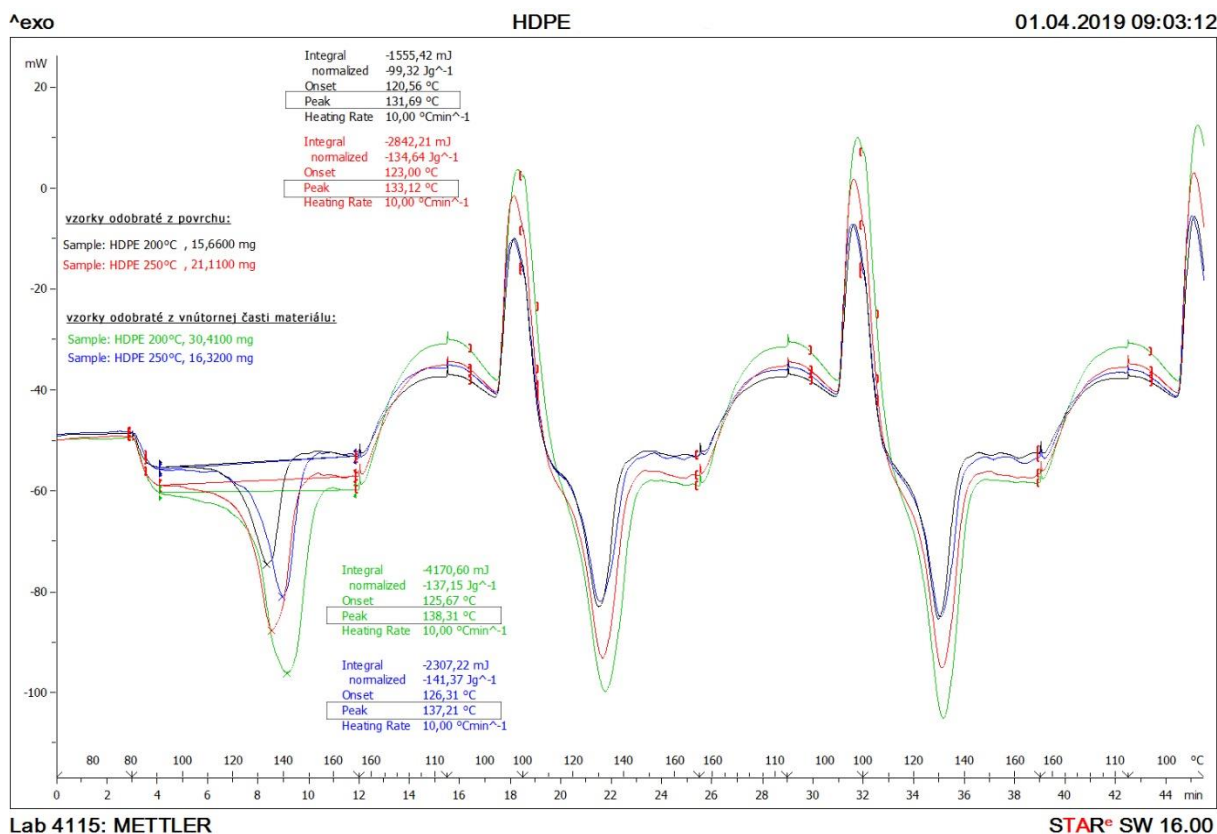
Obr. 7.58: HDPE – EDS analýza obsahu prvků pro teplotu taveniny 250 °C.

Diferenční skenovací kalorimetrie byla použita k hodnocení povrchové a vnitřní vrstvy zkušebních těles z HDPE. U PC nebyly zaznamenány žádné změny, kvůli vnitřní neuspořádané struktuře (amorfní struktura). Výsledky z DSC měření povrchové vrstvy (mikrotomové řezy) a vnitřní vrstvy zkušebních těles jsou zobrazeny v Tab. 7.21.

Z výsledků měření DSC zkušebních těles HDPE s rozdílnou teplotou taveniny vyplývá, že povrchová vrstva vykazuje nižší teplotu tavení krystalitů a současně i nižší normalizované teplo tavení krystalitů než podpovrchové vrstvy a současně s nárůstem teploty taveniny dochází k zvyšování teploty tavení a normalizovaného tepla tavení krystalitů v povrchové vrstvě (mikrotomové řezy z povrchu zkušebního tělesa). To znamená, že proces krystalizace je rozdílný při různých teplotách taveniny a charakter vytvořených krystalitů je zřejmě jiný, což se projevilo i ve změně tvrdosti povrchové vrstvy.

Tab. 7.21: HDPE - Závislost obsahu kyslíku v povrchové vrstvě na teplotě taveniny.

HDPE	Max. teploty tavení, °C	Max. teploty tavení, °C	Normalizované teplo tavení krystalitů, J/g	Normalizované teplo tavení krystalitů, J/g
Teplota, °C	Povrchová vrstva tělesa	Vnitřní vrstva tělesa	Povrchová vrstva tělesa	Vnitřní vrstva tělesa
200	131,69	138,31	99,32	137,15
250	133,12	137,21	134,64	141,37



Obr. 7.59: HDPE – Příklad záznamu z měření DSC.

7.3 Diskuze výsledků

Byla vyhodnocována změna vlastností povrchové vrstvy vstříkovaných výrobků/zkušebních těles z PC a HDPE. K posouzení změn mechanických vlastností byla využita metoda měření tvrdosti při použití škály hodnot zatížení indentoru od 0,5 mN do 5 N. Zároveň byla měřena hloubka vtisku k posouzení velikosti/tloušťky ovlivněné vrstvy. Existence ovlivněné vrstvy a její tloušťky byla zároveň identifikována na snímcích z elektronového mikroskopu a byl vyhodnocován obsah kyslíku na povrchu zkušebních těles.

Z výsledků měření vyplývá, že povrch vstříkovaného zkušební tělesa z PC má vyšší tvrdost než vlastní polymer. Z naměřených hodnot lze vyvozovat, že u výrobků z PC zhotovených technologií vstříkování dochází k ovlivnění tvrdosti povrchové vrstvy, přičemž ovlivněná vrstva sahá až do hloubky cca 5 μm . Mikroskopicky byly identifikovány tři vrstvy pod povrchem výrobku. Nejtenčí vrstva dosahuje tloušťky řádově v desítkách nanometrů. Tvrdost této vrstvy nebylo možné experimentálně zjistit. Ačkoliv pracoviště disponuje velmi přesnými přístroji (ultrananotvrdoměr), nebylo možno tvrdost této vrstvy objektivně posoudit. Další vrstva zasahuje do hloubky řádově stovek nanometrů a její tvrdost byla změřena. Naměřené hodnoty prezentované v grafické podobě průměrných hodnot tvrdosti vykazují relativně snadno identifikovatelnou tendenci poklesu tvrdosti s teplotou taveniny vstříkovaného PC, přičemž tato tendence je zachována pro všechny testované teploty formy. Poslední identifikovaná vrstva dosa-

huje hloubky řádově v tisících nanometrů a byl u ní zaznamenán výrazný pokles tvrdosti.

Při zkoumání vstříkovaných výrobků z HDPE je možno z mikroskopických snímků identifikovat dvě vrstvy. Vrstva I má tloušťku cca 1 μm . Z hlediska měření tvrdosti odpovídá zatížení indentoru v rozsahu 0,5 – 1 mN. Tloušťka uvedené vrstvy je v rozsahu možností měření dostupnými tvrdoměry, v konkrétním případě ultranano tvrdoměr. Tvrdost HV vrstvy I je v rozsahu 2,7 – 3,0. Je patrná relativně velmi malá změna tvrdosti se změnou hloubky vtisku. K významné změně tvrdosti (cca o 20 %) došlo při aplikaci zatížení 50 mN, kdy se hloubka vtisku pohybovala do 10 μm . Tvrdost vrstvy II (substrátu) se pohybuje v rozsahu 3,5 – 3,8 HV. Po této skokové změně tvrdosti přisuzované druhé identifikované vrstvě, se tvrdost nemění. Tvrdost „substrátu“ zůstává v podstatě stejná při všech použitých zatíženích indentoru, bez ohledu na hloubce indentace. Obdobný průběh tvrdostí byl zaznamenán u všech teplot taveniny i formy.

Z vyhodnocení obsahu kyslíku v povrchové vrstvě zkoumaných zkušebních těles vyplývá, že povrchová vrstva obsahuje vyšší procento kyslíku než podpovrchové vrstvy a současně s nárůstem teploty dochází ke snižování obsahu kyslíku jak povrchové vrstvě, tak na lomech. Tato změna je podstatně výraznější u HDPE, který je citlivější na termooxidační degradaci v porovnání s PC.

Z výsledků DSC kalorimetrie těles z HDPE s rozdílnou teplotou vyplývá, že povrchová vrstva vykazuje nižší teplotu tání krystalitů a současně i nižší normalizované teplo tání krystalitů než podpovrchové vrstvy. Současně dochází se zvyšováním teploty ke zvyšování teploty tání a normalizovaného tepla tání krystalitů v povrchové vrstvě. Z toho vyplývá, že proces krystalizace je při různých teplotách rozdílný a zřejmě je i jiný charakter vytvořených krystalitů, což velmi dobře koreluje se změnami nanotvrdosti.

8 PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Výsledky realizované studie přinesly nové poznatky o chování polymerů při zpracování technologií vstřikování. Zároveň ukázaly, že je možné rozsah těchto změn dostupnými metodami, mezi které patří i metoda Instrumentované zkoušky tvrdosti, poměrně spolehlivě identifikovat. Jedná se o vysoce přesnou metodu měření tvrdosti umožňující zároveň přesnou detekci hloubky indentace. Významným přínosem pro další bádání v této oblasti je taky ověření významu pečlivé přípravy povrchů zkoumaných materiálů. Potvrdilo se, že způsob přípravy zkušebních těles hraje velmi významnou roli s přímým dopadem na výsledky měření a možnosti jejich intepretace. Dále se potvrdil velký význam skenovací mikroskopie pro vizuální identifikaci jednotlivých vrstev lišících se vzájemně svou strukturou.

Význam práce pro praxi spočívá zejména v možnosti definovat vliv procesních parametrů na mechanické vlastnosti povrchové vrstvy vstřikovaných výrobků. Bylo prokázáno, že zejména u amorfních polymerů dochází ke zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy v porovnání s tvrdostí základního polymeru. Nové poznání v této oblasti umožní hlubší pochopení mechanického chování a rozšíření použitelnosti polymerů do dalších oblastí.

9 ZÁVĚR

Předložená práce se zabývá vlivem procesních parametrů na mechanické vlastnosti povrchových vrstev vstřikovaných výrobků. Byl posuzován vliv procesních parametrů (teploty taveniny a teploty formy) u výrobků z amorfního polymeru (PC) a semikrystalického polymeru (HDPE). Pro posuzování mechanického chování a hloubky ovlivněné vrstvy bylo využito zejména měření tvrdosti a mikroskopie. Ze získaných výsledků vyplývá, že:

- sledované procesní parametry vstřikovacího procesu ovlivňují mechanické chování povrchové vrstvy testovaných polymerů;
- použité metody zkoumání umožnily identifikovat rozdílné vrstvy pod povrchem výrobku, lišících se tvrdostí a strukturou;
- u amorfního polymeru (PC) byla naměřena nejvyšší tvrdost ve vrstvě nejbliže povrchu, s větší hloubkou tvrdost klesala;
- u semikrystalického polymeru (HDPE) byla ve vrstvě nejbliže povrchu naměřena nejnižší tvrdost. S větší hloubkou tvrdost roste;
- uvedené tendence se projevovaly při všech teplotách taveniny i formy.

Z hlediska detailnějšího popisu studované problematiky a možnosti zobecnění získaných výsledků by bylo vhodné na uvedené problematice i nadále pracovat.

LITERATURA

- [1] KULKARNI, S. *Robust process development and scientific molding: theory and practice*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2010. ISBN 978-3-446-42275-9.
- [2] ZINET, Matthieu et al. Thermophysical characterisation and crystallization kinetics of semi-crystalline polymers. *Journal of Modern Physics*. 2013, vol. 4, pp. 28-37. ISSN 2153-1196.
- [3] KUZMANOVIĆ, Maja et al. The Effect of Injection Molding Temperature on the Morphology and Mechanical Properties of PP/PET Blends and Microfibrillar Composites. *Polymers*. 2016, vol. 8, iss. 10, pp. 1-16. ISSN 2073-4360.
- [4] RAJAKUMAR, P.R. et al. Mechanical, thermal and morphological behaviours of polybutylene terephthalate/polycarbonate blend nanocomposites. *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy*. 2013, vol. 9, pp. 15-36. ISSN 2299-3843.
- [5] HNATKOVA, E. and DVORAK, Z. Effect of the skin-core morphology on the mechanical properties of injection-moulded parts. *Materials and technology*. 2016, vol. 50, iss. 2, pp. 195-198. ISSN 1580-2949.
- [6] MATHUROSEMONTRI, Suchalinee et al. The Effect of Injection Speed on Morphology and Mechanical Properties of Polyoxymethylene/Poly(Lactic Acid) Blends. *Energy Procedia*. 2014, vol. 56, pp. 57-64. ISSN 1876-6102.
- [7] BAI, Shibing and WANG Qi. Effect of injection speed on phase morphology, crystallization behavior, and mechanical properties of polyoxymethylene/poly(ethylene oxide) crystalline/crystalline blend in injection processing. *Polymer Engineering and Science*. 2012, vol. 52, iss. 9, pp. 1938-1944. ISSN 1548-2634.
- [8] LIPAROTI, Sara et al. Mechanical Properties Distribution within Polypropylene Injection Molded Samples: Effect of Mold Temperature under Uneven Thermal Conditions. *Polymers*. 2017, vol. 9, iss. 11, pp. 1-18. ISSN 2073-4360.
- [9] RAOS, P. and STOJSIC, J. Influence of Injection Moulding Parameters on Tensile Strength of In-jection Moulded Part. *Technical University of Košice: Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*. 2014, vol. 13, pp. 1-3. ISSN 1339-2972.

- [10] CERMAK, Roman et. al. Injection-moulded α - and β -polypropylenes: I. Structure vs. processing parameters. *European Polymer Journal*. 2005, vol. 41, iss. 8, pp. 1838-1845. ISSN 0014-3057.
- [11] CERMAK, Roman et. al. Injection-moulded α - and β -polypropylenes: II. Tensile properties vs. processing parameters. *European Polymer Journal*. 2006, vol. 42, iss. 9, pp. 2185-2191. ISSN 0014-3057.
- [12] SAHIN, Senol and YAYLA Pasa. Effects of processing parameters on the mechanical properties of polypropylene random copolymer. *Polymer Testing*. 2005, vol. 24, pp. 1012-1021. ISSN 0142-9418.
- [13] RAHIMI, Mohammad et al. Effect of reprocessing on shrinkage and mechanical properties of ABS and investigating the proper blend of virgin and recycled ABS in injection molding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014, vol. 214, iss. 11, pp. 2359-2365. ISSN 0924-0136.
- [14] NAGAOKA, T. et. al. Effect of molding parameters on the properties of PP/PP sandwich injection moldings. *Polymer Testing*. 2005, vol. 24, pp. 1062-1070. ISSN 0142-9418.
- [15] FETECAU, Catalin. et. al. Influence of injection molding parameters on mechanical properties of low density polyethylene filled with multiwalled carbon nanotubes. *Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE 2011, November 11-17, 2011, Denver, Colorado, USA*.
- [16] LEYVA-PORRAS, C. et al. Effect of molding parameters on Young's modulus of an injection molded low-density polyethylene (LDPE). *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2013, vol. 52, iss. 16, pp. 5666-5671. ISSN 0888-5885.
- [17] STANEK, Michal et al. Optimization of injection molding process. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*. 2011, vol. 5, iss. 5, pp. 413-421. ISSN 1998-0159.
- [18] STANEK, Michal et al. SW and HW optimization of injection molding process. *International Journal of Mechanics*. 2014, vol. 8, pp. 85-92. ISSN 1998-4448.
- [19] OZCELIK, Babur. Optimization of injection parameters for mechanical properties of specimens with weld line of polypropylene using Taguchi method. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2011, vol. 38, pp. 1067-1072. ISSN 0735-1933.
- [20] KC, B. et. al. Sisal-glass fiber hybrid biocomposite: Optimization of injection molding parameters using Taguchi method for reducing shrinkage. *Composites: Part A*. 2016, vol. 83, pp. 152-159. ISSN 1359-835X.

- [21] MEHAT, N.M. and KAMARUDDIN, S. Optimization of mechanical properties of recycled plastic products via optimal processing parameters using the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, vol. 211, pp. 1989-1994. ISSN 0924-0136.
- [22] OZCELIK, Babur et. al. Influence of injection parameters and mold materials on mechanical properties of ABS in plastic injection molding. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2010, vol. 37, pp. 1359-1365. ISSN 0735-1933.
- [23] ZHU, Jie et. al. Tensile strength and optimization of injection molding processing parameters using the Taguchi method. *The international Journal of Modern Engineering*. 2004, vol. 4, pp. 1-10. ISSN 2249-6645.
- [24] SANDA, Stepan et. al. Gate effect on quality of injected part. *Chemicke Listy*. 2011, vol. 105, pp. 301-303. ISSN 1213-7103.
- [25] Tosello, G. et. al. Characterization and analysis of weld lines on micro-injection moulded parts using atomic force microscopy (AFM). *Wear*. 2009, vol. 266, pp. 534-538. ISSN 0043-1648.
- [26] STANEK, Michal et. al. Influence of surface roughness on fluidity of thermoplastics materials. *Chemicke Listy*. 2009, vol. 103, pp. 91-95. ISSN 1213-7103.
- [27] ZHU, Wei et. al. Investigation into mechanical and microstructural properties of polypropylene manufactured by selective laser sintering in comparison with injection molding counterparts. *Materials and Design*. 2015, vol. 82, pp. 37-45. ISSN 0264-1275.
- [28] ARAI, S. et. al. Comparison of crystallization characteristics and mechanical properties of poly(butylene terephthalate) processed by laser sintering and injection molding. *Materials and Design*. 2017, vol. 113, pp. 214-222. ISSN 0264-1275.
- [29] MANAS, David et al. Microhardness of electron beam irradiated polycarbonate. *International Journal of Mechanics*. 2013, vol. 7, iss. 4, pp. 526-533. ISSN 1998-4448.
- [30] OVSİK, Martin et al. Microhardness of PA6 influenced by beta low irradiation doses. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*. 2012, vol. 6, iss. 6, pp. 575-583. ISSN 1998-0159.
- [31] KRATKY, Petr et al. Nanohardness of electron beam irradiated polyamide 11. *International Journal of Mechanics*. 2014, vol. 8 pp. 37-44. ISSN 1998-4448.

- [32] FIALA, Tomas et al. Effect of high beta irradiation on mechanical properties of surface layer of injection moulded low density polyethylene (LDPE). *MM Science Journal*. 2016, vol. 2016 pp. 1-6. ISSN 1805-0476.
- [33] LORENZO, V., MARCO C., GOMEZ M. A. a GOMEZ J. G.. Influence of composition and molecular weights on the microhardness of poly(ethylene oxide)-isotactic poly(methyl methacrylate) blends. *Journal of Materials Science Letters*. 1990, 9(9), 1011-1013. DOI: 10.1007/BF00727861. ISSN 0261-8028. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/BF00727861>>
- [34] EVANS, B. L. The microhardness of injection moulded polystyrene and polyethylene. *Journal of Materials Science*. 1989, 24(1), 173-182. DOI: 10.1007/BF00660950. ISSN 0022-2461. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/BF00660950>>
- [35] CALLEJA, F. J. Baltá, BARANOWSKA, J., RUEDA, D. R. a BAYER, R. K.. Correlation of microhardness and morphology in injection-moulded poly(ethylene terephthalate). *Journal of Materials Science* [online]. 1993, 28(22), 6074-6080 [cit. 2019-05-04]. DOI: 10.1007/BF00365024. ISSN 0022-2461. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/BF00365024>>
- [36] UCHIYAMA, T., SUYAMA, M., ALAM, M.M., ASANO, T., HENNING, S., FLORES, A., CALLEJA, F.J. Baltá, MINA, M.F., Layer structure formation in oriented poly(ethylene terephthalate) relating to micromechanical properties, *Polymer*, Volume 48, Issue 2, 2007, Pages 542-555, ISSN 0032-3861, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.11.030>.
- [37] BOYANOVA, M., CALLEJA, F. J. Baltá, FAKIROV, S., KUEHNERT, I. a MENNIG, G.. Influence of processing conditions on the weld line in doubly injection-molded glassy polycarbonate and polystyrene: Microindentation hardness study. *Advances in Polymer Technology* [online]. 2005, 24(1), 14-20 [cit. 2019-05-04]. DOI: 10.1002/adv.20028. ISSN 0730-6679. Dostupné z: <<http://doi.wiley.com/10.1002/adv.20028>>
- [38] RUEDA, D. R., CALLEJA, F. J. Baltá a R. K. BAYER. Influence of processing conditions on the structure and surface microhardness of injection-moulded polyethylene. *Journal of Materials Science* [online]. 1981, 16(12), 3371-3380 [cit. 2019-05-04]. DOI: 10.1007/BF00586299. ISSN 0022-2461. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF00586299>
- [39] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha: VŠCHT Praha, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [40] STOKLASA, Karel. *Makromolekulární chemie I*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2005.

- [41] PROKOPOVÁ, Irena: Makromolekulární chemie. 2nd ed. Praha: VŠCHT Praha, 2007. P. 041. ISBN 978-80-7080-662-3. Dostupné online z: <<https://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/publikace?isid=7080-662-3>>
- [42] Technologie II: Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti [online]. 2008 [cit.2019-01-16]. Dostupné online z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm#012.
- [43] OSSWALD, Tim A. and MENGES, Georg. (2012). Material Science of Polymers for Engineers (3rd Edition). Hanser Publishers. Dostupné online z: <<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMSPEE002/material-science-polymers/material-science-polymers>>
- [44] Hodnocení nadmolekulární struktury plastů [online]. 2008 [cit. 2019-01-16]. Dostupné online z: <<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech/Morfologie.pdf>>
- [45] OSSWALD, Tim A. International plastics handbook: the resource for plastics engineers. [1st ed.]. Cincinnati: Hanser, c2006. ISBN 1-56990-399-9.
- [46] FIALA, Tomáš. Návrh zařízení na oddělování vtoku. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 81 s. Dostupné také z: <<http://hdl.handle.net/10563/11705>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.>
- [47] FIALA, Tomáš. Problematika výroby elektrotechnické součástky. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2012, 97 s., 7 s. příloh. Dostupné také z: <<http://hdl.handle.net/10563/22214>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.>
- [48] KRATOCHVÍL, Bohumil, ŠVORČÍK, Václav a VOJTĚCH, Dalibor. Úvod do studia materiálů. Praha: VŠCHT, 2005. ISBN 978-80-7080-568-8.
- [49] MICHAELI, Walter. Training in injection molding: a text-and workbook. 2nd ed. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, c2001. ISBN 1-56990-302-6.
- [50] HARPER, Charles A. a Edward M. PETRIE. Plastics materials and processes: a concise encyclopedia. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2003. ISBN 0-471-45603-9.
- [51] BRYCE, Douglas M. Plastic injection molding: mold design and construction fundamentals. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, 1998. ISBN 0-87263-495-7.
- [52] REES, Herbert. Understanding injection mold design. Cincinnati, OH: Hanser Gardner Publications, 2001, xii, 115 p. ISBN 15-699-0311-5.

- [53] Part and mold design: thermoplastics [online]. 2000 [cit. 10.04.2019]. Dostupné online z:
https://www.academia.edu/6392393/A_Design_Guide_Part_and_Mold_Design_Engineering_Polymers
- [54] RŮŽIČKA, Karel, POSPÍŠIL, Ladislav a BOBOVSKÝ, Jaroslav. Směrnice pro konstrukci vstřikovacích forem I. Zlín: VÚGPT, 1979.
- [55] JÍLEK, Bohumil. Výroba vstřikovací formy. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2009. str. 83.
- [56] GASTROW, Hans, E. LINDNER a P. UNGER. Injection molds: 130 proven designs. 3rd ed. / edited by Edmund Lindner and Peter Unger. Cincinnati: Hanser/Gardner [distributor], 2002. ISBN 1-56990-316-6.
- [57] BOBČÍK, Ladislav. Formy pro zpracování plastů I. díl: Vstřikování termoplastů. 2. Brno: Uniplast Brno, 1999.
- [58] ŠANDA, Štěpán. *Konstrukce forem-přednáška*. Zlín, 2008.
- [59] MAŇAS, Miroslav a HELŠTÝN, Josef. Výrobní stroje a zařízení : Gumárenské a plastikářské stroje II. Brno : Editační středisko VUT Brno, 1987. ISBN 80-214-0213-X.
- [60] ARBURG. *Plastic technology course 1. Lossburg, 1997.*
- [61] Arburg [online]. 1999 [cit. 20.2.2012]. Dostupné z:
<http://www.arburg.com/com/COM/en/products/machines/standard/allrounder_golden_edition/clamping_unit.jsp>
- [62] STOKLASA, Karel. Zpracovatelské inženýrství - 1: Základy plastikářské a gumárenské technologie. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007. 107 s.
- [63] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu I. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [64] OVSÍK, Martin. Výzkum možností nových metod měření tvrdosti polymerů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 179 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/25609>
- [65] CSN EN ISO 14577-1 Kovové materiály-Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů-Část 1: Zkušební metoda, Říjen 2002. 31 s.
- [66] ČTVRTLÍK, R. Fyzikální vlastnosti tenkých vrstev. Olomouc, 2012. 145 s. Dizertační práce. Univerzita Palackého v Olomouci.
- [67] SHIGLEY, Joseph Edward. Standard handbook of machine design. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1996. ISBN 0-07-056958-4.

- [68] DUŠEK, Jiří. Tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost - čisté kovy měřené metodou DSI. Brno, 2008. 171 s. Dizertační práce. Masarykova univerzita v Brně.
- [69] TICHAVA, M.: Měření tvrdosti pryže a plastů v současném zkušebnictví: Technická zpráva VUGPT Zlín. Zlín, 1985.
- [70] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. Strojírenská technologie 1. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [71] MatNet, [online]. [cit. 2019-04-26]. Skúšky tvrdosti. Dostupné z: <<http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=531>>
- [72] BRZOBOHATÝ, T.: Současné trendy v metodách měření tvrdosti, Brno, 2010, 32s
- [73] ČSN EN ISO 6508-1 (420360) Zkouška tvrdosti dle Rockwella, Červenec 2017. 32s.
- [74] Saecanet [online]. [cit. 2019-04-27]. Online Calculation. Dostupné online z: <<https://www.saecanet.com/#function>>
- [75] VOLZ, T, R SCHWAIGER, J WANG a S M WEYGAND. Comparison of three approaches to determine the projected area in contact from finite element Berkovich nanoindentation simulations in tungsten. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [online]. 2017, 257s [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1088/1757-899X/257/1/012013. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <<http://stacks.iop.org/1757-899X/257/i=1/a=012013?>>
- [76] BLÁHOVÁ, O. Nanoindentační měření povrchových vrstev. Plzeň, 2007. 112 s. Habilitační práce na strojní fakultě Západočeské univerzity v Plzni.
- [77] DOLEŽAL, P.; PACAL, B. Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů. VUT, Brno: 2007.
- [78] ČERMÁKOVÁ, Veronika. Zkoušení materiálu instrumentovanou vnikací zkouškou. Diplomová práce, Praha: ČVUT, 2017
- [79] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1998. 10 s. Třídící znak 64 0604.
- [80] ČSN EN ISO 14577-1. *Kovové materiály - Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů - Část 1: Zkušební metoda*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Říjen 2002. 31s. Třídící znak 42 0378.
- [81] ČSN ISO 2602. *Statistická interpretace výsledků zkoušek – Odhad průměru – Konfidenční interval*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1993. 12 s. Třídící znak 01 0231.

- [82] HINDLS, Richard et al. Statistika pro ekonomy. Praha: Professional Publishing, 2007. ISBN 978-80-86946-43-6.
- [83] KUBANOVÁ, Jana. Statistické metody pro ekonomickou a technickou praxi. Bratislava: STATIS, 2004. ISBN 80-85659-37-9.

SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

Publikace evidované v databázi SCOPUS (6):

- [1] OVSÍK, Martin, **FIALA, Tomas** et al. The Influence of Process Parameters of Injection on Nano-mechanical Properties of Polypropylene. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (23rd International Conference on Manufacturing, Manufacturing 2018; Kecskemet; Hungary; 7 June 2018 through 8 June 2018)*. 2018, vol. 448, iss. 1, pp. 1-6. ISSN 1757-8981.
- [2] OVSÍK, Martin, **FIALA, Tomas** et al. Ultra-nano indentation properties of crosslinked PBT. *MATEC Web of Conferences (22nd International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers, CSCC 2018; Majorca; Spain; 14 July 2018 through 17 July 2018)*. 2018, vol. 210, pp. 1-5. ISSN 2261-236X.
- [3] SENKERIK, Vojtech, **FIALA, Tomas** et al. Influence of Mixing Recycled Polycarbonate to Charpy Impact Properties at Increased Temperature. *MATEC Web of Conferences (22nd International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers, CSCC 2018; Majorca; Spain; 14 July 2018 through 17 July 2018)*. 2018, vol. 210, pp. 1-4. ISSN 2261-236X.
- [4] **FIALA, Tomas** et al. Mechanical properties of low density polyethylene (LDPE) irradiated by low doses beta irradiation measurement by ultra nanoindentation test. *MM Science Journal*. 2018, vol. 2018, iss. 3, pp. 1937-1941. ISSN 2162-2166.
- [5] **FIALA, Tomas** et al. Effect of high beta irradiation on mechanical properties of surface layer of injection moulded low density polyethylene (LDPE). *MM Science Journal*. 2016, vol. 2016, iss. 10, pp. 1095-1099. ISSN 2162-2166.
- [6] MANAS, David, **FIALA, Tomas** et al. Evaluation of mechanical properties of surface layer injection molded polypropylene by nanoindentation test. *Key Engineering Materials*. 2016, vol. 699, pp. 86-90. ISSN 1013-9826.

CV AUTORA

Jméno a příjmení, titul: Tomáš Fiala, Ing.
Datum a místo narození: 2. srpna 1976, Strakonice
Adresa: Čejetice 59, Strakonice, 386 01,
Česká republika
Telefon: +420 774 348 511
E-mail: tomas.fiala@hotmail.com
Státní příslušnost: ČR

Vzdělání:

9/2013 – dosud UTB ve Zlíně, Fakulta technologická
doktorský studijní program: Procesní inženýrství
studijní obor: Nástroje a procesy
9/2010 – 6/2012 Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
magisterský studijní program: Procesní inženýrství
studijní obor: Výrobní inženýrství
9/2007 – 6/2010 Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
bakalářský studijní program: Procesní inženýrství
studijní obor: Technologická zařízení
9/1990 – 6/1994 Střední odborná škola elektrotechnická
Benešov
obor: Mechanik - elektronik
zaměření: Číslicová a řídicí technika

Pracovní zkušenosti:

11/2016 – dosud Jander Engineering GmbH, Kirchberg, GE
Konstruktér plastových dílů a vstřikovacích forem
09/2013 – 11/2016 MGPT spol. s r.o., Rožnov p. R.
Konstruktér plastových dílů a vstřikovacích forem
03/2011 – 08/2013 Schneider Electric, Písek
Specialista vstřikování plastů
11/2006 – 02/2011 IKEA HANIM spol. s r.o., Praha
Technik plastových výrobků
11/2003 – 10/2006 ARBURG spol. s r.o., Brno
Servisní technik vstřikovacích strojů
08/1998 – 10/2003 HiPo spol. s r.o., Radošovice
Elektrotechnik
Cizí jazyky: Angličtina – středně pokročilý (B2)
Němčina – začátečník (A1)

PŘÍLOHA PI: MATERIÁLOVÝ LIST PC



LEXAN™ RESIN ML3729

REGION EUROPE

DESCRIPTION

Excellent flow, UV stabilized, grade which contains a release agent to ensure easy processing.

TYPICAL PROPERTY VALUES

Revision 20170706

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
MECHANICAL			
Taber Abrasion, CS-17, 1 kg	10	mg/1000cy	SABIC method
Tensile Stress, yield, 50 mm/min	60	MPa	ISO 527
Tensile Stress, break, 50 mm/min	55	MPa	ISO 527
Tensile Strain, yield, 50 mm/min	6	%	ISO 527
Tensile Strain, break, 50 mm/min	70	%	ISO 527
Tensile Modulus, 1 mm/min	2300	MPa	ISO 527
Flexural Stress, yield, 2 mm/min	85	MPa	ISO 178
Flexural Modulus, 2 mm/min	2300	MPa	ISO 178
Hardness, H358/30	95	MPa	ISO 2039-1
IMPACT			
Izod Impact, unnotched 80°10°3 +23°C	NB	kJ/m ²	ISO 180/1U
Izod Impact, unnotched 80°10°3 -30°C	NB	kJ/m ²	ISO 180/1U
Izod Impact, notched 80°10°3 +23°C	55	kJ/m ²	ISO 180/1A
Izod Impact, notched 80°10°3 -30°C	11	kJ/m ²	ISO 180/1A
Charpy 23°C, V-notch Edgew 80°10°3 sp=62mm	55	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Charpy -30°C, V-notch Edgew 80°10°3 sp=62mm	11	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Charpy 23°C, Unnotch Edgew 80°10°3 sp=62mm	NB	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy -30°C, Unnotch Edgew 80°10°3 sp=62mm	NB	kJ/m ²	ISO 179/1eU
THERMAL			
Thermal Conductivity	0.2	W/m·°C	ISO 8302
CTE, 23°C to 80°C, flow	7.E-05	1/°C	ISO 11359-2
Ball Pressure Test, 125°C +/- 2°C	PASSES	-	IEC 60695-10-2
Vicat Softening Temp, Rate A/50	145	°C	ISO 306
Vicat Softening Temp, Rate B/50	139	°C	ISO 306
Vicat Softening Temp, Rate B/120	140	°C	ISO 306
HDT/Be, 0.45MPa Edgew 120°10°4 sp=100mm	133	°C	ISO 75/Be
HDT/Ae, 1.8 MPa Edgew 120°10°4 sp=100mm	121	°C	ISO 75/Ae



PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
HDT/Bf, 0.45 MPa Flatw 80*10*4 sp=64mm	130	°C	ISO 75/Bf
HDT/Af, 1.8 MPa Flatw 80*10*4 sp=64mm	120	°C	ISO 75/Af
Relative Temp Index, Elec	80	°C	UL 746B
Relative Temp Index, Mech w/impact	80	°C	UL 746B
Relative Temp Index, Mech w/o impact	80	°C	UL 746B
PHYSICAL			
Mold Shrinkage on Tensile Bar, flow (2) (5)	0.5 – 0.7	%	SABIC method
Density	1.2	g/cm ³	ISO 1183
Water Absorption, (23°C/sat)	0.35	%	ISO 62
Moisture Absorption (23°C / 50% RH)	0.15	%	ISO 62
Melt Volume Rate, MVR at 250°C/1.2 kg	6	cm ³ /10 min	ISO 1133
Melt Volume Rate, MVR at 300°C/1.2 kg	36	cm ³ /10 min	ISO 1133
OPTICAL			
Light Transmission, 2.54 mm	88 – 90	%	ASTM D 1003
Haze, 2.54 mm	< 0.8	%	ASTM D 1003
Refractive Index	1.586	-	ISO 489
ELECTRICAL			
Volume Resistivity	> 1.E+15	Ohm-cm	IEC 60093
Surface Resistivity, ROA	> 1.E+15	Ohm	IEC 60093
Dielectric Strength, in oil, 0.8 mm	35	kV/mm	IEC 60243-1
Dielectric Strength, in oil, 1.6 mm	27	kV/mm	IEC 60243-1
Dielectric Strength, in oil, 3.2 mm	17	kV/mm	IEC 60243-1
Relative Permittivity, 1 MHz	2.7	-	IEC 60250
Dissipation Factor, 50/60 Hz	0.001	-	IEC 60250
Dissipation Factor, 1 MHz	0.01	-	IEC 60250
Relative Permittivity, 50/60 Hz	2.7	-	IEC 60250
FLAME CHARACTERISTICS			
UL Recognized, 94V-2 Flame Class Rating (3)	0.75	mm	UL 94
Glow Wire Flammability Index 850°C, passes at	1	mm	IEC 60695-2-12
Oxygen Index (LOI)	25	%	ISO 4589
INJECTION MOLDING			
Drying Temperature	120	°C	
Drying Time	2 – 4	hrs	
Maximum Moisture Content	0.02	%	
Melt Temperature	280 – 300	°C	
Nozzle Temperature	270 – 290	°C	
Front - Zone 3 Temperature	280 – 300	°C	
Middle - Zone 2 Temperature	270 – 290	°C	



PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
Rear - Zone 1 Temperature	260 – 280	°C	
Hopper Temperature	60 – 80	°C	
Mold Temperature	80 – 100	°C	

DISCLAIMER

The information contained herein may include typical properties of our products or their typical performances when used in certain typical applications. Actual properties of our products, in particular when used in conjunction with any third party material(s) or for any non-typical applications, may differ from typical properties.

It is the customer's responsibility to inspect and test our product(s) in order to satisfy itself as to the suitability of the product(s) for its and its customers particular purposes. The customer is responsible for the appropriate, safe and legal use, processing and handling of all product(s) purchased from us.

Nothing herein is intended to be nor shall it constitute a warranty whatsoever, in particular, warranty of merchantability or fitness for a particular purpose.

SABIC as referred to herein means any legal entity belonging to the group of companies headed by Saudi Arabia Basic Industries Corporation.

PŘÍLOHA PII: MATERIÁLOVÝ LIST HDPE

Technical Information



DOW™ HDPE 25055E High Density Polyethylene Resin

Overview POLYETHYLENE HIGH DENSITY 25055E High Density Polyethylene Resin is a very narrow molecular weight distribution resin, developed to impart excellent mechanical properties, high gloss and high surface finishing to injection moulded parts, while providing easy processing.

Applications:

- Housewares
- Food containers
- Toys

Complies with:

- EU, No 10/2011
- U.S. FDA 21 CFR 177.1520
- Canadian HPFB (No Objection)

Consult the regulations for complete details.

Additive • Antiblock: No • Slip: No • Processing Aid: No

Physical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Density	0.955 g/cm ³	0.955 g/cm ³	ASTM D792
Melt Index			ISO 1133
190°C/2.16 kg	25 g/10 min	25 g/10 min	
190°C/5.0 kg	62 g/10 min	62 g/10 min	
Spiral Flow ^{1,2}	42.9 in	109 cm	Dow Method
Molding Shrinkage - Flow	0.021 in/in	2.1 %	ASTM D955
Environmental Stress-Cracking Resistance (ESCR)			ASTM D1693
100% AntaroX CO-630, Compression Molded	0.700 hr	0.700 hr	
Mechanical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Strength			ASTM D638
Yield, Compression Molded	3630 psi	25.0 MPa	
Break, Compression Molded	3920 psi	27.0 MPa	
Tensile Elongation			ASTM D638
Break, Compression Molded	200 %	200 %	
Flexural Modulus - 2% Secant (Compression Molded)	126000 psi	870 MPa	ASTM D790
Impact	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Impact Strength (Compression Molded)	26.2 ft-lb/in ²	55.0 kJ/m ²	ASTM D1822
Hardness	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Shore Hardness (Shore D, Compression Molded)	65	65	ISO 868
Thermal	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Vicat Softening Temperature	255 °F	124 °C	ISO 306/A

Notes

These are typical properties only and are not to be construed as specifications. Users should confirm results by their own tests.

¹ Melt Temperature: 482°F (250°C)

² 2 seconds injection

Product Stewardship

The Dow Chemical Company and its subsidiaries ("Dow") has a fundamental concern for all who make, distribute, and use its products, and for the environment in which we live. This concern is the basis for our Product Stewardship philosophy by which we assess the safety, health, and environmental information on our products and then take appropriate steps to protect employee and public health and our environment. The success of our Product Stewardship program rests with each and every individual involved with Dow products – from the initial concept and research, to manufacture, use, sale, disposal, and recycle of each product.

Customer Notice

Dow strongly encourages its customers to review both their manufacturing processes and their applications of Dow products from the standpoint of human health and environmental quality to ensure that Dow products are not used in ways for which they are not intended or tested. Dow personnel are available to answer your questions and to provide reasonable technical support. Dow product literature, including safety data sheets, should be consulted prior to use of Dow products. Current safety data sheets are available from Dow.

Medical Applications Policy

NOTICE REGARDING MEDICAL APPLICATION RESTRICTIONS: Dow will not knowingly sell or sample any product or service ("Product") into any commercial or developmental application that is intended for:

- long-term or permanent contact with internal bodily fluids or tissues. "Long-term" is contact which exceeds 72 continuous hours;
- use in cardiac prosthetic devices regardless of the length of time involved ("cardiac prosthetic devices" include, but are not limited to, pacemaker leads and devices, artificial hearts, heart valves, intra-aortic balloons and control systems, and ventricular bypass-assisted devices);
- use as a critical component in medical devices that support or sustain human life; or
- use specifically by pregnant women or in applications designed specifically to promote or interfere with human reproduction.

Dow requests that customers considering use of Dow products in medical applications notify Dow so that appropriate assessments may be conducted. Dow does not endorse or claim suitability of its products for specific medical applications. It is the responsibility of the medical device or pharmaceutical manufacturer to determine that the Dow product is safe, lawful, and technically suitable for the intended use. **DOW MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING THE SUITABILITY OF ANY DOW PRODUCT FOR USE IN MEDICAL APPLICATIONS.**

Disclaimer

NOTICE: No freedom from infringement of any patent owned by Dow or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, the Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for the Customer's use and for ensuring that the Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. Dow assumes no obligation or liability for the information in this document. **NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.**

NOTICE: If products are described as "experimental" or "developmental": (1) product specifications may not be fully determined; (2) analysis of hazards and caution in handling and use are required; (3) there is greater potential for Dow to change specifications and/or discontinue production; and (4) although Dow may from time to time provide samples of such products, Dow is not obligated to supply or otherwise commercialize such products for any use or application whatsoever.

NOTICE: This data is based on information Dow believes to be reliable, as demonstrated in controlled laboratory testing. They are offered in good faith, but without guarantee, as conditions and method of use of Dow products are beyond Dow's control. Dow recommends that the prospective user determine the suitability of these materials and suggestions before adopting them on a commercial scale.

To the best of our knowledge, the information contained herein is accurate and reliable as of the date of publication, however we do not assume any liability for the accuracy and completeness of such information.

Additional Information

North America		Europe/Middle East	+800-3694-6367
U.S. & Canada:	1-800-441-4369		+31-11567-2626
	1-989-832-1426	Italy:	+800-783-825
Mexico:	+1-800-441-4369		
Latin America		South Africa	+800-99-5078
Argentina:	+54-11-4319-0100		
Brazil:	+55-11-5188-9000		
Colombia:	+57-1-219-6000	Asia Pacific	+800-7776-7776
Mexico:	+52-55-5201-4700		+603-7965-5392

www.dowplastics.com

This document is intended for use within Asia Pacific, Europe

Published: 2000-11-30

© 2019 The Dow Chemical Company

