

# Vliv procesních parametrů na kvalitu vstřikovaných výrobků

Karel Krejčí

---

Bakalářská práce  
2022

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Karel Krejčí**  
Osobní číslo: **A19605**  
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Informační a řídicí technologie**  
Forma studia: **Kombinovaná**  
Téma práce: **Vliv procesních parametrů na kvalitu vstříkovaných výrobků**  
Téma práce anglicky: **Influence of Process Parameters on the Quality of Injected Products**

## Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši v oblasti technologie vstříkování a kvality vstříkovaných dílů.
2. Navrhněte a vyrobte zkušební tělesa.
3. Navrhněte a proveďte jednotlivé testy.
4. Proveďte statistické vyhodnocení naměřených dat.
5. Diskutujte získané výsledky.

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

Seznam doporučené literatury:

1. ZEMAN, L. 2009. Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů. Praha: BEN.
2. DUCHÁČEK, V. Polymery-výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Praha: VŠCHT v Praze, 2006.
3. KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. Injection molding advanced troubleshooting guide. Munich: Hanser Publishers, 2018.
4. ŘEHULKA, Zdeněk. Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013.
5. KUBANOVÁ, Jana. Statistické metody pro ekonomickou a technickou praxi. Bratislava: STATIS, 2004. ISBN 80-85659-37-9.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Aleš Mizera, Ph.D.**  
Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2022**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

**doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D. v.r.**  
děkan



**prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 15. ledna 2022

**Prohlašuji, že**

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

**Prohlašuji,**

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne

Karel Krejčí v.r.  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Cílem bakalářské práce je zjištění kvality a povrchových vlastností vstřikovaných dílů z polypropylenu v závislosti na změně procesních parametrů. Procesními parametry se rozumí zejména vstřikovací rychlost, teplota taveniny a teplota formy. Z důvodu zachování kvality vstřikovaných výrobků je potřeba znát, jaký vliv mají procesní parametry na kvalitu vstřikovaných výrobků. Následné získané výsledky jsme zpracovali pomocí programů Matlab a Microsoft Excel a provedli jsme podrobnou analýzu dat s automatickým vyhodnocením výsledků.

Vstřikovací stroj, vstřikování plastů, vstřikovací cyklus, měření nanotvrdosti, matlab.

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deal is to determine the quality and surface properties of injection molded polypropylene parts, depending on the change of process parameters. Process parameters include, in particular, injection speed, melt temperature and mold temperature. In order to maintain the quality of injected products, it is necessary to know what effect the process parameters have on the quality of injected products. We processed the results using Matlab and Microsoft Excel and performed a detailed data analysis with automatic evaluation of the results.

Injection moulding machine, injection moulding, injection cycle, nanohardness test, matlab.

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Aleši Mizerovi, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení, které mi po celou dobu tvorby bakalářské práce poskytoval. Také bych rád poděkoval své rodině za podporu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ</b> .....	<b>11</b>
1.1 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	11
1.1.1 Vstřikovací jednotka .....	12
1.1.2 Uzavírací jednotka .....	13
1.2 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS .....	14
1.3 TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY VSTŘIKOVÁNÍ.....	15
1.3.1 Teplota taveniny.....	15
1.3.2 Teplota formy.....	16
1.3.3 Vstřikovací tlak .....	17
1.3.4 Dotlak.....	17
1.3.5 Doba vstříku.....	17
1.3.6 Doba dotlaku .....	17
1.3.7 Doba ochlazování.....	18
1.3.8 Polštář.....	18
<b>2 VADY VSTŘIKOVANÝCH VÝROBKŮ A JEJICH ODSTRANĚNÍ</b> .....	<b>19</b>
2.1 ZJEVNÉ VADY .....	19
2.1.1 Stříbřité pruhy .....	19
2.1.2 Rozdíly v lesku.....	20
2.1.3 Nedotečený kus .....	21
2.1.4 Deformace výstříku.....	22
2.1.5 Spáleniny.....	22
2.2 SKRYTÉ VADY .....	24
2.2.1 Bubliny .....	24
2.2.2 Vakuové bubliny – lunkry.....	26
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>28</b>
<b>3 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI</b> .....	<b>29</b>
<b>4 POPIS ZKUŠEBNÍCH TĚLES A JEJICH VÝROBY</b> .....	<b>30</b>
4.1 POUŽITÝ MATERIÁL.....	30
4.2 POPIS VÝROBY.....	31
<b>5 JEDNOTLIVÉ TESTY A JEJICH VYHODNOCENÍ</b> .....	<b>35</b>
5.1 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI .....	35
5.1.1 Druhy indentorů .....	37
5.1.2 Faktory ovlivňující přesnost měření.....	38
5.2 MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU .....	39
Parametry drsnosti.....	40
5.3 MĚŘENÍ POMOCÍ NANOINDENTORU .....	40

5.4	STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ DAT .....	42
5.5	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT Z INDENTAČNÍ ZKOUŠKY .....	43
5.5.1	Vybraná data při zatížení 500mN .....	50
5.5.2	Vybraná data při zatížení 300mN .....	52
5.5.3	Vybraná data při zatížení 100mN .....	53
5.5.4	Vybraná data při zatížení 50mN .....	54
5.6	NAMĚŘENÁ DATA Z KONTOFOKÁLNÍHO MIKROSKOPU .....	55
5.6.1	Vyhodnocení snímků .....	55
5.7	GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ DAT Z INDENTAČNÍCH ZKOUŠEK .....	57
5.7.1	Seskupení výrobků podle vstřikovacích parametrů a porovnání jejich indentační tvrdosti .....	60
5.7.2	Seskupení výrobků podle vstřikovacích parametrů a porovnání jejich indentační hloubky .....	62
5.8	DISKUZE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ .....	62
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>68</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>70</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>71</b>



## ÚVOD

Vstřikovací technologie jsou nedílnou součástí našeho světa. Mezi nejvíce využívaný polymer v současné době patří polypropylen. Díky vstřikování je možné vyrábět relativně složité díly ve velkém množství. Při vstřikování je důležité minimalizovat náklady a co nejvíce zefektivnit výrobu. Při výrobě dílů, které by neprošly kvalitativním testem se nám výroba značně prodražuje. Z tohoto důvodu je potřeba nastavit parametry vstřikovacího procesu tak, aby výsledný produkt splňoval požadovaná kritéria. Tato technologie je stále velmi perspektivní, zvláště z důvodu hojného využití v automobilovém, elektronickém a dalších oblastech průmyslu. V těchto odvětvích je tato technologie výhodná z toho důvodu, že je možné celý proces zautomatizovat a výstupem je již hotový výrobek. Je důležité udržet kvalitu takto vyráběných dílů.

V této bakalářské práci se budeme zabývat vlivem vstřikovacích parametrů na jejich výslednou kvalitu. Tato práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Cílem teoretické části je zpracování literární rešerše v oblasti technologie vstřikování a probrání vad na vstřikovaných výrobcích a jejich eliminací. Záměrem praktické části pak bude navržení a výroba zkušebních těles která budeme vyrábět s rozdílnými vstřikovacími parametry. Tyto výrobky pak porovnáme na základě jejich vlastností a tyto získané výsledky budeme podrobně analyzovat pomocí programů Matlab a Excel. Po automatickém zpracování dat, na těchto datech provedeme grafické zpracování, které nám pomůže lépe zobrazit získaná data.

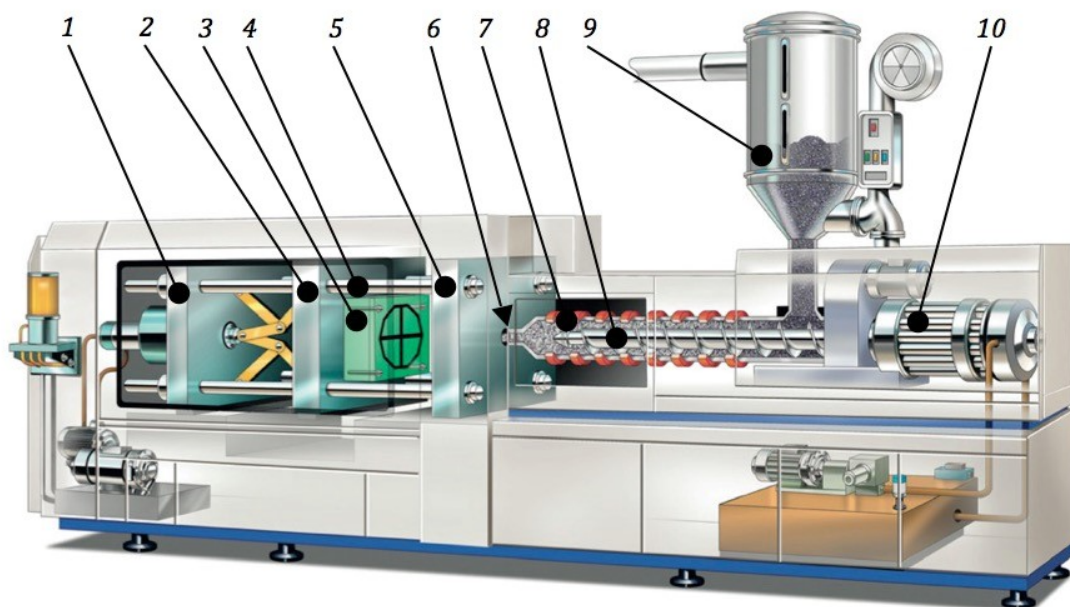
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování plastů je univerzální a důležitý způsob zpracování plastů. Tento proces je vhodný pro hromadnou výrobu plastových součástek nejrůznějších velikostí a tvarů s vysokou přesností. Jde o cyklický proces, při kterém se granulát nejprve roztaví. Dále je tavenina dopravena pomocí šnekového ústrojí do vstřikovací formy. Při vstříknutí tavenina vyplní veškerý volný prostor formy, čímž se získá požadovaný tvar produktu. Po ztuhnutí se forma otevře a součástka může být vyjmuta. Tento proces se následně cyklicky opakuje.

## 1.1 Vstřikovací stroj

Je známo, že vstřikovacích strojů je velké množství ovšem všechny tyto stroje pracují na stejných základech. Vstřikovací stroj se skládá ze dvou základních částí. O plastifikaci a vstřikování se stará vstřikovací jednotka, zatímco o pohyb formy se stará uzavírací jednotka. Uzavírací jednotka má na starosti otevírání a zavírání formy. Také se stará o to, aby forma byla uzavřena během celého procesu velmi pevně, protože během vstřikování je uvnitř formy vyvíjen vysoký tlak. [1] [2]



Obrázek 1 Vstřikovací stroj [3]

1 – uzavírací jednotka, 2 – pohyblivá upínací deska vstřikovacího stroje, 3 – pohyblivá část vstřikovací formy, 4 – vodící sloupky vstřikovacího stroje, 5 – pevná upínací deska vstřikovacího stroje, 6 – tryska vstřikovacího stroje, 7 – tavicí komora, 8 – šnek, 9 – násypka pro granulát, 10 – pohonná jednotka šneku

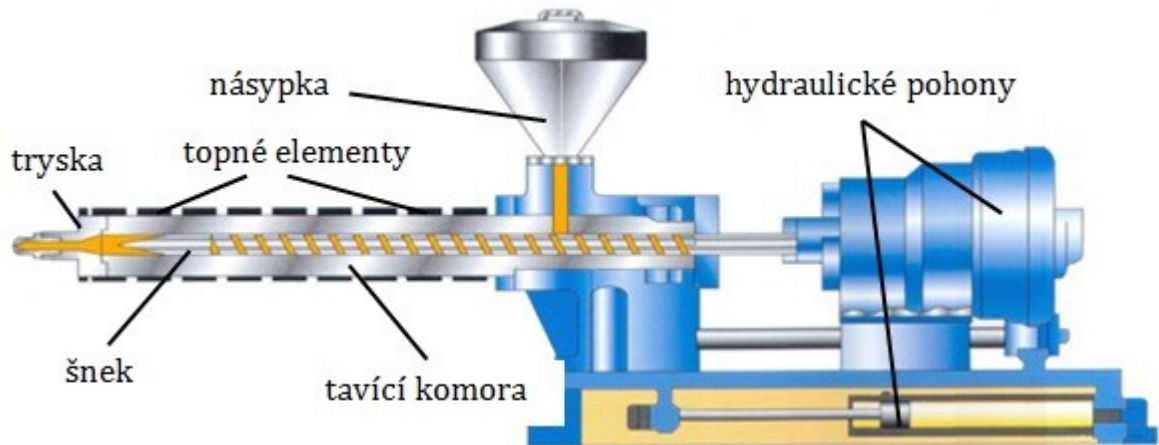
### 1.1.1 Vstříkovací jednotka

Samotná vstříkovací jednotka se skládá z mnoha částí. Nejdůležitější částí je tavící komora, kterou můžeme nazvat srdcem vstříkovací jednotky. Je vytvořena z dlouhé kruhové trubice, která se obvykle vyrábí z běžné oceli. Vnitřní stěna tavící komory je tvořena z tvrdé vysoce kvalitní oceli, která dokáže odolat abrazivním vlastnostem vstříkovacího procesu. Vnější strana tavící komory je obalena topnými elementy, které jsou elektricky aktivovány a jsou rozmístěny po celé délce tavící komory. Často bývají topná tělesa rozdělena do několika jednotlivých zón v závislosti vzdálenosti od trysky, díky čemuž lze dosahovat požadované teploty na konkrétním místě. Každou tuto část ovládá samostatná řídicí jednotka, která na základě informací z teplotního čidla zapíná a vypíná topné těleso. [4] [5]

V horní části se nachází násypka. V této části je uchovávaný materiál, nejčastěji v podobě granulátu předtím, než se dostane do tavící komory. Násypka je ve tvaru trychtýře pro zjednodušení dávkování granulátu díky gravitaci. Obvykle je násypka navržena tak, aby v ní mohla být uložena zásoba materiálu přibližně na dvě hodiny. [4] [2]

Další důležitou částí je šnek, který se nachází uvnitř tavící komory. Jeho hlavní funkce je dodávat materiál z násypky k trysce. Další práce, kterou šnek vykonává je míchání a homogenizování vstříkovací směsi. Samotný šnek můžeme rozdělit do tří částí. První část se nazývá plnicí část a vyskytuje se přímo pod násypkou. Šnek v této části má nejhlubší závit pro co nejvhodnější odebrání nového materiálu. Následuje tavící část, kde se nám hloubka závitu šneku zmenšuje a se vzrůstajícím třením mezi materiálem vzniká teplo, které taví dopravovaný materiál. V důsledku stlačování materiálu je z něj také vytlačován vzduch, a tím nám vzniká kompaktní směs. V poslední části jde nejvíce o to, aby se směs správně promíchala a také, aby se zde ustálila teplota celé směsi před samotným vstříkáním do formy. [4] [5]

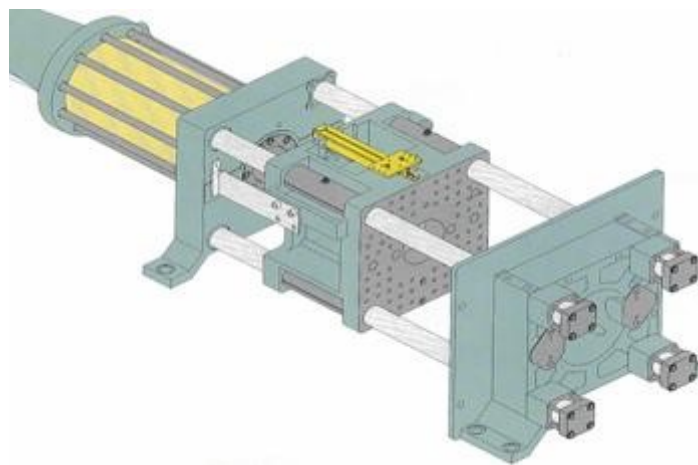
Poslední částí je tryska, která slouží hlavně k přesnému dosednutí vstříkovací jednotky do formy. Tryska je pevně přichycena k přední části vstříkovací jednotky. Po najetí trysky je zde vytvořena přítlačná síla, která zamezuje průniku taveniny mezi tryskou a vtokovou vložkou formy. Uvnitř trysky je veden otvor, který se směrem ke špičce rozšiřuje, aby bylo dosaženo volného toku taveniny bez tlakových ztrát. [5] [2]



Obrázek 2 Vstřikovací jednotka [5]

### 1.1.2 Uzavírací jednotka

Uzávěrací jednotka má na starosti uzavírání a otevírání formy. Při uzavření je důležité, aby jednotka udržela formu zavřenou a zabránila tím úniku taveniny mimo formu. Rozlišujeme zde dvě síly. Přisouvací sílu  $F_p$  a sílu uzavírací  $F_u$ . U moderních vstřikovacích strojů je možné tyto síly naprogramovat. [6]



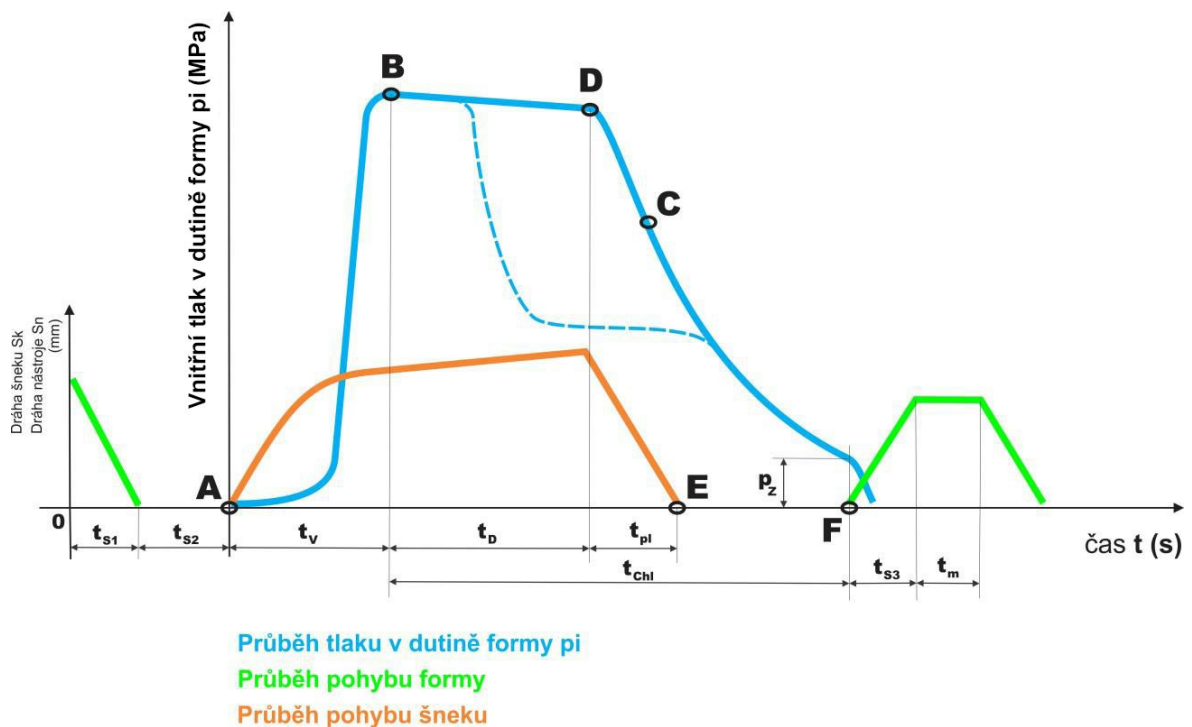
Obrázek 3 Schéma uzavírací jednotky [6]

Uzávěrací jednotka je složena z těchto hlavních částí: opěrné desky pevně spojené s ložem stroje, pohyblivé desky, upínací desky, vedení pro pohyblivou desku a z udržovacího a přidržovacího mechanismu. Na pohyblivé desky je upnuta pohyblivá část formy a na upínací desky je upnuta nepohyblivá část formy s otvorem pro trysku vstřikovací jednotky. Vedení pro pohyblivou desku musí zajistit přesné dosedání formy a rovnoběžnost obou dosedacích ploch formy. U malých vstřikovacích strojů stačí použití dvou vodících tyčí, u větších je optimální použít více těchto tyčí. Vodící tyče jsou během procesu namáhány

vstřikovacími tlaky. Z tohoto důvodu je důležitá jejich kontrola, zda nedochází k deformaci, jež může vést až k praskání tyčí. [5] [6] [2]

## 1.2 Vstřikovací cyklus

Celý cyklus lze rozdělit do čtyř samostatných procesů. Všechny části tohoto procesu jsou relativně krátké a celý proces vstřikování obvykle zabere přibližně od 2 sekund do 2 minut. Celý cyklus začíná uzavřením vstřikovací formy pomocí uzavírací jednotky. Pro co nejefektivnější práci je důležité, aby se forma zavírala co nejrychleji, ale zároveň aby se při dosedání nepoškodila. Moderní stroje to mají implementované tak, že při počátku zavírání se forma zavírá velkou rychlostí a těsně před dosednutím zpomalí a plynule se uzavře. Podobné je to i u následného otevírání kdy se opět forma ze začátku pohybuje vysokou rychlostí a těsně před dosednutím na doraz zpomalí tak, aby vyhazovač vyhodil výrobek a zároveň jej při tom nepoškodil. [3]



Obrázek 4 Průběh vstřikovacího cyklu [3]

Následuje fáze, kdy se granulát dostává do tavicí komory, kde je následně roztaven do taveniny. Po dosažení homogenní směsi může být tavenina vstříknuta do formy. Vstřikování probíhá tak, že se šnek začne pohybovat po axiální ose a začne plnit formu roztavenou hmotou. Tento časový úsek je v příloženém obrázku (Obr. 4) označen jako  $t_v$ . Toto plnění je ukončeno, když je zaplněno přibližně 95–99 % objemu formy. Při naplnění formy roztavenou hmotou vzroste tlak na maximální hodnotu, viz bod B v obrázku (Obr. 4). Tato

hodnota se může pohybovat od 35 MPa do 140 MPa. Při proniknutí roztavené hmoty do formy začíná hmota okamžitě chladnout a tuhnout. Během tuhnutí přebírá hmota tvar z formy, a tím vzniká výsledný výrobek. Během chládnutí může docházet k jemnému smršťování materiálu. [3]

Proto, aby se nevytvořily propadliny je důležité, dotlačovat taveninu do formy a udržovat dotlak. Toto udržování tlaku můžeme vidět na obrázku (Obr.4) v časovém úseku  $t_D$ . Dotlak může být izobarický, kdy se snažíme dodržet konstantní tlak uvnitř formy anebo může být izochorický, kdy se snažíme uvnitř formy dodržet konstantní objem. Samotná doba chládnutí zabírá nejvíce času z celého cyklu. Poslední fází je vyjmutí výrobku z formy. Toho je docíleno pomocí pohybu formy a dorazu v podobě vyhazovače, který výrobek vysune. [3]

### 1.3 Technologické parametry vstřikování

Technologických parametrů vstřikování je velmi mnoho z tohoto důvodu se zde budeme zabývat pouze nejdůležitějšími a nastavitelnými parametry. Jelikož při nastavení jednoho parametru dochází k ovlivnění i ostatních parametrů, nelze s jistotou říci, jak správně nastavit vstřikovací stroj. Tyto parametry je nutné vždy nastavit pro konkrétní vstřikovací stroj a následnou optimalizaci těchto parametrů. Nejdůležitější parametry můžeme pro zjednodušení rozdělit do čtyř kategorií. Nejvýznamnější je teplota, následuje tlak, čas a vzdálenost. Je důležité nezapomenout, že jednotlivé parametry spolu úzce souvisí a změna jednoho parametru může ovlivnit ostatní parametry. [4] [7]

#### 1.3.1 Teplota taveniny

Teplota taveniny se odvíjí od typu použitého materiálu. Granulát se začíná ohřívat v tavicí komoře kousek od vstupu z násypky, aby se netavil předčasně a neucpal tak násypku. Ohřívání tavicí komory zajišťují topné elementy, které jsou rozděleny do tří hlavních částí: zadní část, střední část a přední část. Z násypky se granulát dostane do zadní části tavicí komory, kde teplo začne natavovat tavený materiál. Odtud je materiál dopravován pomocí šneku do střední části, kde je teplota vyšší oproti zadní zóně. Odtud je tavenina dopravována do přední části kde se teplota opět zvýší. Rozdíly v teplotách mezi přední a zadní částí mohou být až cca 30 °C. Nejčastěji se používá nastavení, kde v zadní části je nižší teplota než v přední části, tak aby se granulát plynule roztavil. Opačné nastavení, kde teplota v zadní části je vyšší než teplota v přední části, se používá pouze pokud je potřeba během krátké

doby cyklu ohřát velké množství materiálu. Nejvíce energie, kterou potřebuje tavenina k roztavení, je získávána z pohybu šneku. To může být mezi 60 % až 85 %. [4] [7]

Zvyšování teploty taveniny má za následek spoustu vlastností, jako mohou být například snížení viskozity taveniny, zmenšení tlakových ztrát v dutině formy, aj. [7]

### 1.3.2 Teplota formy

Teplota formy musí být nastavena tak, aby to odpovídalo požadované teplotě jednotlivých materiálů. Teplota formy zásadně ovlivňuje výslednou kvalitu dílu a délku jednotlivých cyklů. Forma je připojena k okruhu, který kontroluje teplotu. Okruh obvykle používá vodu jako temperační médium. Voda cirkuluje okruhem, a buď ohřívá formu nebo z ní odvádí teplo v závislosti na probíhajícím cyklu. Je důležité, aby kanály byly ve formě správně navrženy, tak aby působily na celou formu jako celek a nedocházelo tak k místům s vyšším rozdílem teplot. Tyto rozdíly by mohly způsobovat různé místní smrštění, různou krystalinitu, další deformace a povrchové vady. Teplota formy je měřena přímo z jejího povrchu často na několika místech a tato teplota je následně zprůměrována. Pokud je forma správně navržena, tak teplota média na vstupu a na výstupu by neměla být rozdílnější než 5–8 °C. [4] [7]

Tabulka 1 Požadované teploty pro vybrané plasty [3]

Termoplast	Teplota taveniny [°C]	Teplota formy [°C]
HDPE	180–280	30–60
LDPE	170–270	20–60
PP	180–280	20–90
PA 6	240–280	40–100
PA 6.6	260–300	60–100
PBT	230–270	30–90
POM	180–230	40–120
ABS	190–270	50–80
PS	170–270	20–80
PC	270–320	85–120
PMMA	200–260	30–80
SAN	200–270	50–80
PVC	190–220	20–70



Zvyšování teploty formy má opět vliv na některé důležité vlastnosti, ať už vlastnosti taveniny nebo výsledného výrobku. Zvýšení teploty formy má za následek například zvýšení výrobních smrštění, zvýšení odolnosti proti tepelné deformaci, zvýšení tuhosti, zvýšení povrchové tvrdosti a odolnosti proti otěru, aj. [7]

### 1.3.3 Vstřikovací tlak

Vstřikovací tlak má za úkol naplnit formu taveninou. Vstřikovací tlak vzniká axiálním pohybem šneku. Vstřikovací tlak by měl být nastaven na nejvyšší praktickou hodnotu tak, aby se forma zaplnila v co nejkratším čase. Nastavení vstřikovacího tlaku závisí na typu plastu, ze kterého se vstřikuje, na viskozitě, průtoku plastu, teplotě taveniny a formy. Během procesu vstřikování jsou tryska a forma namáhány, z tohoto důvodu je vhodné najít nejnižší možný tlak pro použití při zachování kvality výrobků. [4] [7]

### 1.3.4 Dotlak

Po skončení vstřikovací fáze se přepne vstřikovací tlak na dotlak. Dotlak má z hlediska kvality vstřikovaných výrobků největší vliv na přesnost tvaru a rozměru. Jeho úkolem je, aby během chládnutí výrobku nedošlo ke smrštění a byly dodrženy požadované rozměry. Velikost dotlaku musí být stanovena tak, aby během tuhnutí tavenina byla schopna vyplnit všechny propadliny, nerovnosti a všechny tvary formy včetně dezénů. [4] [7]

### 1.3.5 Doba vstřiku

Doba vstřiku závisí na rychlosti axiálního pohybu šneku. Pohyb šneku může být konstantní po celou dobu pohybu nebo se rychlost pohybu může nastavit v závislosti na poloze šneku. Vstřikovací rychlost má výrazný vliv na postup taveniny ve formě. Při nízké rychlosti vstřikování může docházet k tzv. studenému toku. K němu dochází při ochlazení čela taveniny a vzniku spojových čar na výstřiku. [4] [7]

### 1.3.6 Doba dotlaku

Doba dotlaku ukazuje, jak dlouho bude šnek tlačít na taveninu po tom, co jsme jej vstříkli do formy. Tento tlak je vyvíjen až do doby, než zatuhne vtokový kanál. Ideální dobu dotlaku lze jednoduše nastavit pomocí vážení výsledného výrobku a porovnávání hmotností jednotlivých výstřiků. Při postupném prodlužování doby dotlaku lze vidět nárůst hmotnosti výrobku. Ideální doba je pak taková, kde se přestane hmotnost výrobku měnit. Toto maximum nastává při zamrznutí ústí vtoku. [4] [7]

### 1.3.7 Doba ochlazování

Je nutné rozdělit dva jednotlivé pojmy. Doba ochlazování je definována jako součet doby dotlaku a doby chlazení. Doba chlazení se definuje jako doba, kdy zamrznou vtokové kanály a končí v okamžiku, kdy se začne otevírat forma. Doba chlazení je potřeba pouze pro dostatečné ztuhnutí výrobku, tak aby během jeho vyhazování z formy nevznikl otisk z vyhazovače nebo nedošlo k nějakému jinému poškození výrobku. [4] [7]

### 1.3.8 Polštář

Polštářem nazýváme materiál, který zůstane v tavicí komoře po skončení dotlakové fáze. Obecně se uvádí, že velikost polštáře by měla být v rozsahu 5 až 10 % jedné dávky. Pokud by velikost polštáře nebyla dostatečná nemusel by šnek působit dostatečným tlakem během dotlaku a výrobek by se nám mohl poškodit. Pokud by naopak polštář byl příliš velký, mohlo by to mít za následek tuhnutí taveniny v něm a následně by to mohlo ucpat trysku, což by částečně omezilo nebo úplně zastavilo její průchod. Některé vstříkovací stroje dovedou změřit velikost polštáře a v případě, že nebude velikost odpovídat vyhrazeným hranicím, tak během příštího vstříku upraví velikost dávky. [4] [7]

## 2 VADY VSTŘIKOVANÝCH VÝROBKŮ A JEJICH ODSTRANĚNÍ

Během vstřikovacího procesu mohou na výrobku vzniknout různé vady. Tyto defekty můžeme rozdělit do dvou skupin. Může se jednat o zjevné vady nebo o skryté vady. K určení příčiny jednotlivých vad je potřeba provést důkladnou analýzu. Příčinu můžeme hledat v jedné ze základních kategorií nebo jejich kombinací, které nám pomůžou problém vyřešit. Tyto kategorie se skládají z:

- chybného nastavení vstřikovacího procesu
- chyby formy
- chyby vstřikovacího stroje
- chyby vstřikovaného materiálu

Během vyšetřování jde o to najít klíčovou příčinu a následně eliminovat vstřikování vadných dílů. Toto vyšetřování je často založeno na zkušenostech obsluhy stroje, případně jejich jednotlivých poznámek. [7] [8] [9]

### 2.1 Zjevné vady

Zjevné vady lze zjistit během vizuální kontroly a následným porovnáním s referenčním výstřikem.

#### 2.1.1 Stříbřité pruhy

Stříbřité pruhy zařazujeme do povrchových vad. Vznikají při prasknutí vzduchové bublinky a následném rozprsknutí ve směru proudící taveniny. [10]

- **Chybné nastavení vstřikovacího procesu**

Při špatném nastavení vysoušení granulátu či při nedostatečném vysoušení granulátu se vlhkost může dostat až do výsledného výrobku. Pro odstranění tohoto problému je vhodné dodržet postup pro vysoušení granulátu, který udává výrobce. [8] [10]

- **Chyby formy**

Pokud se stříbřité pruhy vyskytují často na jednom místě výsledných výrobků, tak by se mohlo jednat o chybu kterou způsobuje forma. Často se tato chyba vyskytuje nedaleko od povrchu, kde je problém na formě. Nejčastěji jsou tyto pruhy způsobeny nedostatečným odvodem vzduchu z formy přes odvzdušňovací kanálky. Také může být problém v rozměru

vtokové soustavy. Pro vyřešení tohoto problému je potřeba zvětšit průměr vtokové soustavy. [7] [10]

- **Chyby vstřikovacího stroje**

Nesprávný chod stroje a jeho systému pro nastavování teploty může vést k degradaci materiálu. K této degradaci dochází v případech, kdy je teplota taveniny příliš nízká i příliš vysoká. Při této degradaci dochází k následnému úniku plynů z granulátu, a to pak může způsobit stříbřité pruhy. [7] [8]

- **Chyby materiálu**

Tyto pruhy mohou vznikat u materiálu který obsahuje málo vnitřního maziva. Jako řešení této příčiny se nabízí reklamovat granulát nebo přidat aditiva. Pokud je materiál příliš vlhký, může to též způsobovat tyto problémy. Je dobré zvýšit dobu sušení. Je zde také možná kontaminace materiálu, která může způsobit pruhy. Touto kontaminací může být například hlína, kousky kartonu, aj. Každá z těchto kontaminací může způsobit stříbřité pruhy. Je vhodné pokusit se této kontaminaci předejít pomocí pečlivé manipulace s granulátem. [7] [8] [9]

### 2.1.2 Rozdíly v lesku

Rozdíly v lesku na výsledném výrobku vedou k vyloučení daného kusu. Často se vyskytují v místech dále od vtoku, kde nemá takový vliv dotlaková fáze. [10]

- **Chybné nastavení vstřikovacího procesu**

Nejčastější chybou procesu bývá nízká hodnota dotlaku. Při nízké hodnotě dotlaku se plast nedostatečně vtiskne do stěny formy a nedostane správnou texturu jako má forma. Dále může mít vliv také teplota formy. Forma s nižší teplotou má za následek, že je výsledný produkt méně lesklý. Naopak zvýšení teploty formy pomůže tavenině přilnout k povrchu formy a lépe jej zkopírovat. [8] [10]

- **Chyby formy**

Největší vliv na lesk výsledného produktu má kvalita zpracování samotné formy. Pokud forma bude správně vyleštěná, měl by i výsledný produkt být lesklý. Je dobré prozkoumat kvalitu zpracování formy a případně ji nechat přešetřit pro dosažení stejného lesku ve všech místech. Může také nastat případ, kdy se začne materiál postupně nachytávat na stěnu formy. V tomto případě je dobré formu řádně očistit. [8] [10]

- **Chyby materiálu**

Některé materiály jsou lesklejší než ostatní. Někteří výrobci dodávají granulát ve dvou variantách pro vysoký a nízký lesk. Je dobré být opatrný při použití materiálu pro nízký lesk s formou která bude vyleštěná. Tato kombinace by mohla způsobit kosmetické povrchové vady a nepravidelný vzhled. [8]

### 2.1.3 Nedotečený kus

Nedotečený kus vzniká, když tavenina nevyplní celý objem formy a vznikne tak prázdné místo bez materiálu.

- **Chybné nastavení vstřikovacího procesu**

Při špatném nastavení množství vstřikované taveniny do formy nám snadno vznikne nedotečený kus. Během plnicí fáze by se měla forma naplnit z 95–98 %. Pro vyřešení je vhodné ověřit si množství vstřikovaného materiálu a případně změnit nastavení. Další možností může být nízká vstřikovací rychlost a vstřikovací tlak. Z tohoto důvodu se tavenina nedostane do všech částí formy. Může k tomu též docházet při předčasném přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak. Velký vliv má také teplota formy a teplota taveniny. Zvýšením teploty taveniny se snižuje její viskozita. Nízká teplota formy může způsobit ztuhnutí taveniny a další materiál se již nedostane do tohoto místa. [8] [10] [9]

- **Chyby formy**

U formy může být problém s jejím odvzdušněním. Může se stát, že forma zůstane částečně vyplněna vzduchem a nedostane se tam tavenina. Jako další příčinou může být ve špatném umístění vtokového ústí. Na toto pomůže zvětšit vtokové ústí, případně vtokové kanály. [6] [7]

- **Chyby vstřikovacího stroje**

Nedotečený kus může způsobit netěsnící zpětný uzávěr šneku. Prací tohoto šneku je, aby tavenina netekla zpět během vstřikování. Jako řešení se nabízí šnek vyčistit nebo vyměnit. Případně tento problém může vznikat z důvodu nedostatečného plastikačního výkonu. V tomto případě je nutné přejít na větší průměr šneku. [7] [8] [10]

- **Chyby materiálu**

Materiálovou příčinou se nabízí vysoká viskozita. Je vhodné použít materiál s vyšším indexem toku taveniny. [7] [8]

### 2.1.4 Deformace výstřiku

Deformací výstřiku rozumíme změny tvarů a rozměrů oproti výkresu. Klíčová příčina se u těchto deformací těžko identifikuje, protože tyto deformace mohou vznikat z mnoha různých důvodů. Nejčastější příčinou je nerovnoměrné smrštění u výsledného produktu. Toto nerovnoměrné smrštění může být způsobeno mnoha důvody, jako je nerovnoměrný tlak v dutině, nerovnoměrné chlazení formy nebo rozdílná orientace, ke které dochází zejména u semikrystalických materiálů. [8] [10] [9]

- **Chybné nastavení vstřikovacího procesu**

Důležitým faktorem ve spojení s defekty je teplota tepelné deformace (HDT). Pokud je dosaženo teploty vyšší než HDT pro vstřikovaný materiál, výsledný produkt neudrží svůj tvar při zatížení. Vyhazování výsledného výrobku z formy ještě před klesnutím pod tuto kritickou hodnotu může způsobit jeho deformaci. Je důležité správně nastavit chlazení formy tak, aby zvládala odvádět teplo z materiálu. Další možností je neponechání výrobku dostatek času pro zchladnutí uvnitř dutiny formy a jeho předčasného vyhození z formy. [7] [8] [10]

- **Chyby formy**

Při vyhazování výrobku z formy se nám může stát, že se výrobek přichytí na stěně formy. Toto přilepení může způsobit to, že vyhazovače při pokusu o vyhození výrobek částečně deformují. [8]

Další důležitou částí je funkční chlazení formy. Během vstřikování forma odvádí teplo ze vstříknuté taveniny, a tím ji ochlazuje. Je důležité, aby forma měla správně navržené chlazení, které odpovídá velikosti vstřikovaného výrobku.

- **Chyby materiálu**

Největší vliv na deformaci výrobku má typ materiálu. Největší rozdíl ve smrštění je mezi amorfními a semikrystalickými polymery. Semikrystalické termoplasty mohou vytvářet krystalickou strukturu. Podíl této krystalické složky může být až 80 %. Zvyšování této krystalické složky způsobuje zvětšení finálního smrštění. [8] [11]

### 2.1.5 Spáleniny

Spáleniny vznikají v důsledku uvíznutí vzduchu ve formě a následného vznícení plastu vlivem vysokého tlaku. Jedná se o lokální místa na výsledném výrobku, která jsou na první pohled černá a vypadají jako saze. [7] [8] [9]

- **Chybné nastavení vstřikovacího procesu**

Pokud máme během vstřikování nastavenou příliš vysokou vstřikovací rychlost, může se stát, že vzduch, který je ve formě před začátkem plnění, nemá dostatek času na to, aby unikl přes odvzdušňovací kanálky. Pro vyřešení tohoto problému je možnost snížit vstřikovací rychlost, což často pomůže vyřešit tento problém. Bohužel s nižší vstřikovací rychlostí se prodlouží doba jednoho cyklu. Také snížení rychlosti může mít vliv na viskozitu taveniny a případné další vady jako mohou být nedotečené kusy, nestejněměrný lesk, aj. [8]

Spáleniny mohou vznikat také z důvodu vysoké teploty taveniny. Při vysoké teplotě může vstřikovaný plast degradovat a tvořit plyny, které jsou následně vstříknuty do formy, kde zůstanou a mohou tam vznikat spáleniny. Je důležité si zkontrolovat teplotu tavicí komory a jejích jednotlivých zón. Ani správné nastavení nám nemusí zaručit to, že při rozměňování granulátu nevzniká přebytečné teplo, které by nám mohlo degradovat materiál. Je vhodné si zkontrolovat, zdali jsou všechna topná tělesa správně namontována tak, aby obepínala tavicí komoru. [8] [9]

- **Chyby formy**

Nejčastější klíčovou příčinou u spálenin bývá zašpinění odvzdušňovacích kanálků. Pokud nám vstřikovací cyklus probíhal v pořádku a až později začal produkovat výrobky na kterých jsou vidět spáleniny, je dobré začít vyčištěním formy a jejích odvzdušňovacích kanálků. Pokud by se zjistilo, že se forma musí čistit příliš často, bylo by vhodné ji předělat a přidat další odvzdušňovací kanálky. Při tvoření spálenin je nebezpečí, že nám forma začne časem korodovat, a to může vést k dalším problémům, jako je přichytávání výrobků, špatný vzhled a viditelná dělící čára. [8]

- **Chyby vstřikovacího stroje**

U vstřikovací jednotky může dojít k tomu, že se začne hromadit materiál v nežádoucích místech kde následně degraduje a vypouští plyny. Tyto plyny jsou přimíchávány do taveniny a vstříknuty do formy, kde přehltí odvzdušňovací kanálky. K těmto nánosům může dojít, když je vstřikovací stroj delší dobu v nečinnosti s materiálem v tavicí komoře, nebo při změně materiálu. Zároveň toto nahromadění způsobuje další problémy, jako můžou být stříbrné pruhy nebo černá místa. Je vhodné po změně materiálu nebo delší nečinnosti, vstřikovací stroj řádně pročistit. Dalším důvodem vzniku spálenin může být příliš velká dekomprese po plastikaci nebo příliš velká uzavírací síla vstřikovacího stroje. Pro vyřešení těchto příčin stačí snížit dekompresi nebo snížit uzavírací sílu. [7] [8]

- **Chyby materiálu**

Při vyšší vlhkosti materiálu může být příčinou vytvořená pára která se nedostatečně odvětrá. Tato vlhkost nejčastěji způsobuje stříbřité pruhy, ale může způsobit i spáleniny. Také je důležité si uvědomit, že některé materiály mají větší náchylnost pro vznik spálenin. Dochází k nim častěji u materiálu s nižší viskozitou taveniny a pro řešení tohoto problému je na místě použít materiál s vyšším indexem toku taveniny. K vytvoření spálenin můžou přispět i různá aditiva, která taky můžou mít vliv na rozpoznání těchto spálenin kvůli změně barvy výsledného produktu. Spáleniny budou lépe rozeznatelné na světlejších výrobcích než na tmavších, na kterých se snadno skryjí. [7] [8]

## **2.2 Skryté vady**

Na skryté vady většinou během vizuální kontroly nepřijdeme, ale mohou mít následný vliv na vlastnosti výsledných výrobků.

### **2.2.1 Bubliny**

Bubliny řadíme do skrytých vad, které vznikají tím, že se plyn zachytí v tavenině a dostane se do formy současně s taveninou. Také mohou vzniknout místa podobná bublinám tím, že se během smrštění plastu se vytvoří prázdné místo, kde je vakuum. Pro nejjednodušší zjištění, jestli se jedná o bublinu vyplněnou plynem anebo bublinu, kterou tvoří vakuum je dobré místo pomalu zahřát pomocí horkovzdušné pistole a pokud se jedná o bublinu tvořenou plynem, tak materiál začne bobtnat z toho důvodu, že se roztahuje plyn uvnitř stěny. V případě, že by se jednalo o vakuovou bublinu, materiál okolo se zhroutlí a ukáže se propadlina. [8]

- **Chybné nastavení vstřikovacího procesu**

U chybného nastavení vstřikovacího procesu je několik možností, které mohou být příčinou vzniku bublin. Jedná se o vysokou teplotu taveniny, nastavená nízká hodnota zpětného tlaku nebo vysoká dekomprese. [8] [9]

Vysoká teplota taveniny může vést k přehřátí vstřikovaného plastu a jeho částečné degradaci. Při této degradaci můžou vznikat plyny, které následně vytvoří bubliny v tavenině a jsou následně vstříknuty do dutiny formy. Při odstraňování tohoto problému je nejvýhodnější ověřit si nastavenou teplotu taveniny a porovnat ji s doporučenou teplotou udávanou výrobcem. Mezi dalšími kroky, které je potřeba projít během řešení problému, je kontrola teploty tavící komory případně zjistit, jestli se některá ze zón nepřehřívá. Je důležité



nezapomenout zkontrolovat také zpětný tlak. Zpětný tlak ovlivňuje dobu plastifikace ale také v případě, že by byl příliš vysoký, tak by mohl způsobit degradaci plastu. Obvykle v případě špatného nastavení vstřikovacího procesu a následného přehřívání plastu toto přehřátí vede ještě k dalším kosmetickým vadám, jako mohou být spáleniny nebo hnědé pruhy. [8] [9]

Nastavení nízké hodnoty zpětného tlaku může způsobovat to, že se dávka taveniny správně nezhuští a tím pádem se v ní mohou objevit vzduchové kapsy které, následně mohou způsobit bubliny ve výsledném výrobku. Běžné nastavení zpětného tlaku pro většinu plastů je mezi 1000–2500 psi. [8]

- **Chyby formy**

Nejběžnější závadou na formě, která by mohla vést k tvoření bublin je špatná konstrukce odvodu vzduchu. Zbytečný vzduch ve formě, který není správně odveden může, způsobit bubliny. Prvotní krok, jak tuto závadu řešit, je zkontrolování čistoty odvodu vzduchu kanálků. Vyskytuje se zde také riziko, že jsou kanálky příliš malé, a tím pádem nedostatečné. Další možností je nevhodné umístění vtoků. [7] [8]

Další poruchou může být prasklina ve formě. Pokud je tato prasklina mezi dutinou formy a chlazením formy, mohou se kapky vody během vstřikování odpařit a vytvořit bubliny ve výrobcích. Tyto praskliny bývají často způsobeny špatným návrhem formy, kde jsou ostré rohy vysokou zátěží a následně prasknou. Také pokud je vodní okruh příliš blízko povrchu formy, tak tenká stěna může lehce prasknout. [8]

Poslední příčina, která by vedla k vytvoření bublin ve spojení s formou je Venturiho efekt. Venturiho efekt lze pozorovat, když proudící tekutina prochází přes zúžení. Ve zúženém prostoru musí tekutina proudit rychleji nežli v místech s širším průřezem, jelikož musí být zachována rovnice kontinuity. V místě zúžení následně klesne tlak oproti místu s širším průřezem. Kvůli tomuto poklesu tlaku je možné, že při plnění formy taveninou se nasaje vzduch z některých míst formy. Tato místa mohou být třeba mezery mezi vyhazovači nebo formou, či nepřesným dosednutím vstřikovací trysky. Pokud by to bylo způsobeno přisáváním vzduchu, tak by se bubliny nacházely po proudu taveniny. Při řešení této příčiny je zapotřebí hlubší prozkoumání a nalezení klíčové příčiny. [8]

- **Chyby vstřikovacího stroje**

Jako chybu u vstřikovacího stroje můžeme označit prasklinu chlazení v plnicí části, která se nachází pod násypkou. Touto prasklinou se může do granulátu dostávat voda, která se následně v tavící komoře změní na páru a po vstříknutí způsobí bubliny. Pro vyšetření této

závady je potřeba vyprázdnit tavicí komoru, oddělat násypku a následně vizuálně zkontrolovat stav plnicí části tavicí komory. Další příčinou by mohl být nesprávný tvar šneku, případně mrtvé kouty a netěsnosti ve vstřikovací jednotce. [7] [8]

- **Chyby materiálu**

Příčina, která by mohla vést ke vzniku bublin je vlhkost granulátu. Pokud je granulát příliš vlhký, tak se v tavicí komoře tato vlhkost změní na vodní páru, která následně udělá bubliny. Při řešení tohoto problému je důležité zvolit účinný způsob sušení, případně využití sušící násypky. [7] [8]

Mezi další defekt můžeme zařadit kontaminaci materiálu. Ke kontaminaci dochází v případě, že se nám smísí dva různé materiály. Nejčastěji jde o kontaminaci materiálu s vyšší teplotou tání materiálem s nižší teplotou tání. Jelikož vstřikovací proces bude nastaven na teplotu odpovídající materiálu s vyšší teplotou tání, tak v průběhu míchání granulátu v tavicí komoře dojde k jeho degradaci a vytvoření plynů. [8]

### 2.2.2 Vakuové bubliny – lunkry

Vakuové bubliny jsou uzavřená prázdná místa ve finálním výrobku. Vznikají tak, že tavenina chladne blíže u stěny formy, a tím se vytvoří pevný obal. Vnitřní část této dutiny chladne pomaleji a během tohoto tuhnutí se tavenina smršťuje. Nakonec se materiál rozestoupí a vytvoří dutinu. Tyto vady lze vizuálně zaznamenat pouze u průhledných plastů, u neprůhledných se musí provést řez nebo případně je prohlédnout pomocí ultrazvuku. Častěji se vyskytují v tlustých částech stěny. [8] [10]

- **Chybné nastavení vstřikovacího procesu**

Při nahřátí plastu se zvýší vzdálenost jednotlivých molekul v důsledku vyšší energie. Během jeho následného tuhnutí se molekuly přibližují, a tím se plast uvnitř dutiny formy smršťuje. Toto smrštění může způsobit vakuové bubliny. Nejdůležitějším vstřikovacím parametrem pro tvorbu lunkrů je dotlak. Dotlak má přímý vliv na smrštění výsledného výrobku. Je vhodné si zkontrolovat hodnotu dotlaku a porovnat jej s doporučením od výrobce. V případě správného nastavení ještě může přijít v úvahu dotlak zvýšit. Tímto navýšením docílíme toho, že nebudeme mít výrobky s vakuovými bublinami, ale výsledné výrobky budou mohutnější tím, jak budou přeplněné což, může mít vliv na jejich fyzikální vlastnosti. Je dobré zvážit potenciální negativní vlastnosti zvýšení dotlaku a podle toho se rozhodnout. [8] [10]

Vyšší teplota taveniny vede k prodloužení doby chládnutí a může nastat situace, kdy tavenina na stranách dutiny formy ztuhne rychleji, zatímco vnitřek zůstává tekutý. Po ztuhnutí prostřední části a jejím smrštění mohou vznikat vakuové bubliny. Pro vyřešení se hodí ověřit si nastavené parametry teploty taveniny a porovnat je s doporučenou teplotou. [8] [10]

- **Chyby formy**

Chybou formy bývá nejčastěji špatně navržená vtoková soustava. Její dráhy jsou příliš dlouhé. Řešením těchto chyb je zvětšit ústí vtoku a vtokové kanálky či případně navýšit jejich počet. [7] [10]

Dále je možná nesprávná funkce chlazení formy. Pokud některé části formy nejsou dostatečně ochlazovány, vznikají nepoměry v teplotách výrobku v celé formě. Toto zvýšení teploty v některých částech formy zvyšuje i následné smrštění, což může mít za následek vytvoření vakuových bublin. Jako řešení se nabízí zkontrolovat si, zdali chlazení formy funguje správně, případně se zaměřit na horká místa během vstřikování a následně zde zvýšit chlazení. [8] [10]

- **Chyby vstřikovacího stroje**

Chybami u vstřikovacího stroje může být jeho nízký plastifikační výkon, netěsnící zpětný uzávěr šneku nebo že tavenina zamrzne na trysce. K vyřešení je nutné vyčistit zpětný uzávěr šneku nebo jej vyměnit. Dalším řešením je zvýšení plastifikačního výkonu a kontrola vytápění na trysce. [7]

- **Chyby materiálu**

Vakuové bubliny mají tendenci vznikat u materiálů s vysokou viskozitou. Pro vyřešení této příčiny je vhodné použít typ materiálu s vyšším indexem toku taveniny. [7]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

### 3 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je zjištění vlivu procesních parametrů vstřikování na kvalitu vstřikovaných výrobků. Pro tuto práci jsme nastavovali různé rychlosti vstřikování, různé teploty formy a teploty taveniny. Jednotlivé testy jsme prováděli pomocí nanoindentoru a kontofokálního mikroskopu.

Postup při řešení:

- **Příprava zkušebních těles**
  - Výběr vhodného materiálu pro vstřikování
  - Navržení jednotlivých těles
  - Výroba zkušebních těles
- **Návrh a provedení jednotlivých testů**
  - Měření tvrdosti metodou DSI
  - Naskenování vzorků pomocí kontofokálního mikroskopu
  - Změření drsnosti povrchu pomocí mikroskopu
- **Statistické vyhodnocení naměřených dat**
  - Zpracování dat z nanoindentoru pomocí matlabu
  - Převod dat do jednotlivých tabulek a jejich vyhodnocení
- **Diskuze získaných výsledků**

## 4 POPIS ZKUŠEBNÍCH TĚLES A JEJICH VÝROBY

### 4.1 Použitý materiál

Polypropylen je semikrystalický termoplast. Polypropylenů, které jsou používány pro vstřikování může být mnoho. Těchto druhů PP je mnohem více než ostatních druhů plastů. Podle využití může jít o PP, který je odolný proti vysokým nebo nízkým teplotám. Také je zde různá pevnost a elasticita. Polypropyleny mají široké využití používají se pro balení v potravinářství, balení oblečení, případně jako tvrdé obaly na CD a DVD, palety a mnoho dalšího. [12] [13]

V této práci je použit pro vstřikování polypropylen Mosten TB 002 od firmy Unipetrol. PP mosten je termoplast, který je při pokojové teplotě tuhý. Má vysoký stupeň krystalinity, vysokou teplotní odolnost a je odolný proti většině chemických látek. [14]

Tabulka 2 Materiálové vlastnosti Mosten TB 002 [14]

Parametr	Jednotka	Norma	Hodnota
<b>Reologické vlastnosti</b>			
Index toku taveniny (230 °C/2,16 kg)	g/10 min	ISO 1133–1	2
Výrobní smrštění podélně	%	ISO 294–3,4	1,95
Výrobní smrštění napříč			2,08
<b>Mechanické vlastnosti</b>			
Modul pružnosti v ohybu	MPa	ISO 178	1700
Modul pružnosti v tahu	MPa	ISO 527–1,2	1600
Napětí na mezi kluzu	MPa		35
Prodloužení na mezi kluzu	%		9
Celková tažnost	%		200
Vrubová houževnatost Charpy 23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179–1	6,5
<b>Teplotní vlastnosti</b>			
Teplota tání (DSC)	°C	ISO 11357–1, 3	168–172
Teplota měknutí dle Vicata (VST)	°C	ISO 306	155
HDT (1,8 MPa)	°C	ISO 75–1,2	55
<b>Tvrdość Shore D</b>			
Tvrdość Shore D	–	ISO 868	66

Tabulka 3 Podmínky pro zpracování [14]

Parametr	Jednotka	Doporučená hodnota
Teplota taveniny	200–260	°C
Dloužící poměr	1:6–1:12	–
Délka šneku	$\geq 25 d^*$	–

\*Průměr šneku

## 4.2 Popis výroby

Pro výrobu zkušebních výrobků byl použit vstřikovací stroj, který vyrábí firma Arburg. Konkrétně jde o stroj s označením Allrounder 470 C Golden Edition.



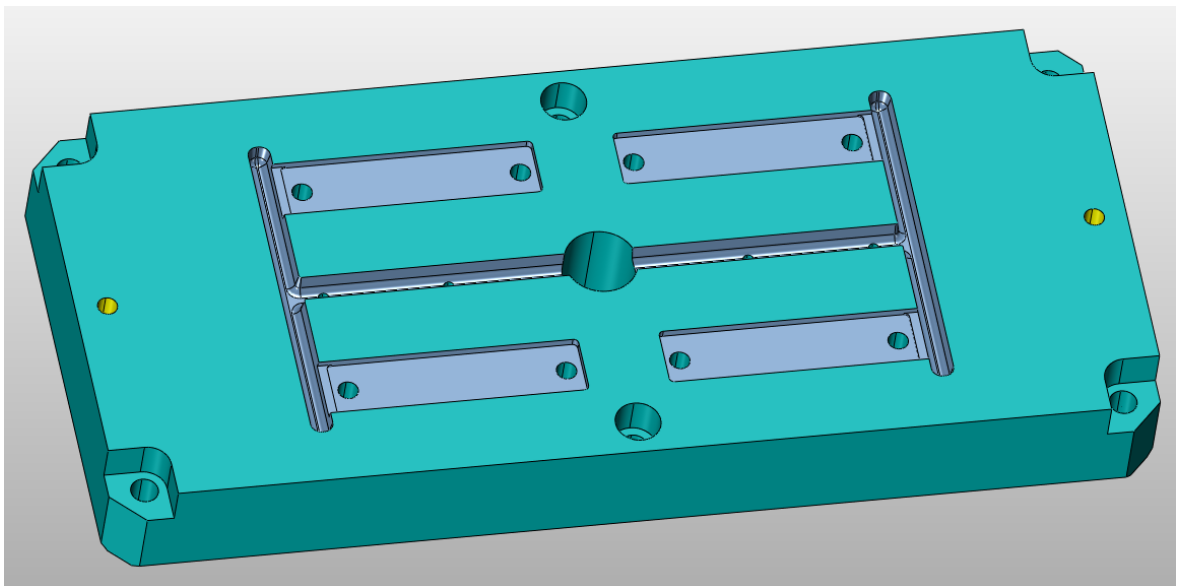
Obrázek 5 Vstřikovací stroj Allrounder 470 C Golden [15]

Tabulka 4 Technické údaje vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 470C  
1500–400 GE [16]

Typ stroje	Allrounder 470C 1500 – 400 GE	
<b>Uzavírací jednotka</b>		
Uzavírací síla	1500	max. kN
Otevírací síla	350	max. kN
Otevření	500	max. mm
Vzdálenost mezi vodícími sloupy	470 x 470	mm
Velikost upínací desky (šířka × výška)	650 x 650	mm
Vyhazovací síla	40	max kN
Zdvih vyhazovače	175	max. mm

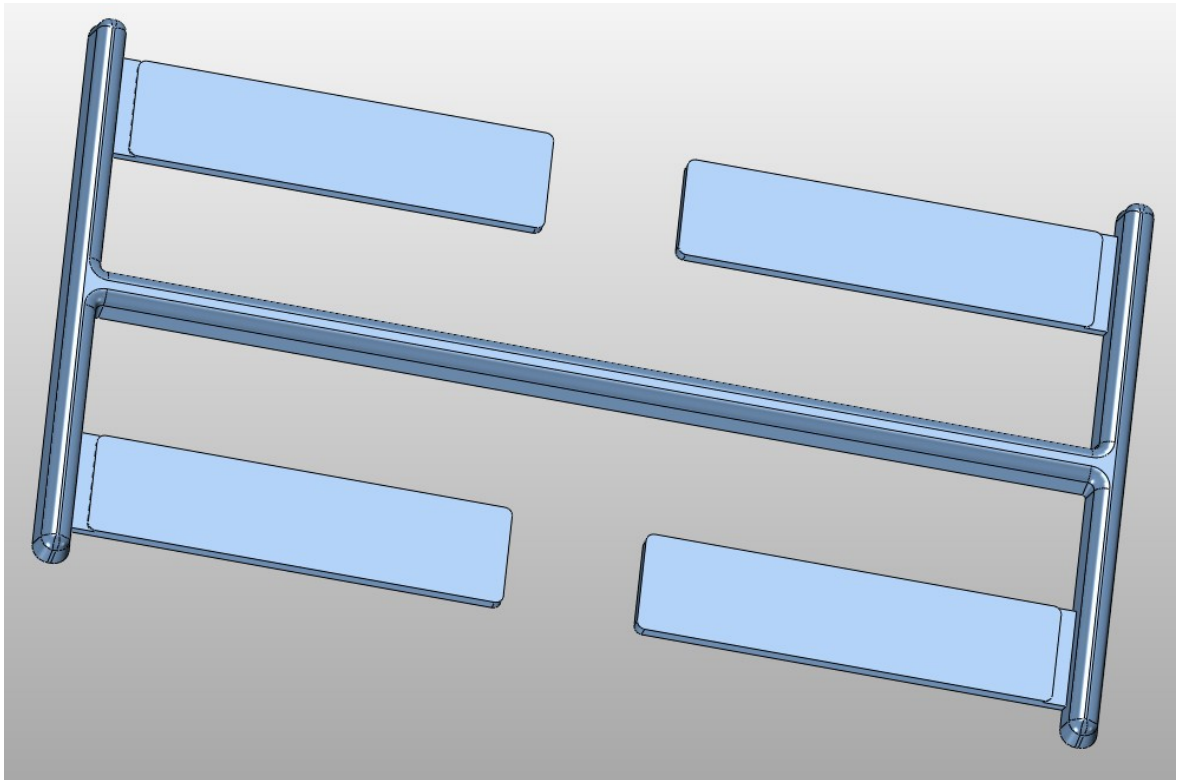
<b>Vstřikovací jednotka</b>		
Průměr šneku	40	mm
Poměr šneku	20	L/D
Zdvih šneku	160	max. mm
Objem dávky	201	max. cm <sup>3</sup>
Vstřikovací tlak	2000	max. bar
Dotlak	2000	max. bar
Vstřikovací rychlost (objemová)	168	max cm <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>
Krouticí moment šneku	550	max. Nm
Přítlačná síla trysky	60	max. kN
Objem násypky	50	l
<b>Připojení a obsluha</b>		
Hmotnost stroje, bez oleje	4850	kg
Množství oleje	235	l
Výkon čerpadla	18,5	kW
Celkový příkon stroje	30	kW

Do vstřikovacího stroje byla nainstalována univerzální formu s vložkou na zkušební tělesa s rozměrem funkčních částí dutiny  $60 \times 15 \times 2$  mm. Funkční plocha univerzální vložky pro tyto tělesa je vyrobena ve vysokém zrcadlovém lesku z důvodu potřeby co nejlepšího povrchu pro vyhodnocení indentační tvrdosti.



Obrázek 6 Model univerzální vložky





Obrázek 7 Model zkušebního tělesa

Všechna zkušební tělesa byla vytvořena za stejných vstřikovacích podmínek dotlaku.

Dotlak: 50 mm/s  
400 bar  
15 s

Celkem byly nastaveny tři různé teploty taveniny, tři teploty formy a tři rychlosti vstřikování. Nejprve byla nastavena teplota formy na 35 °C, nastavena teplota taveniny na 200 °C a vstřikovací rychlosti 50 mm/s. Bylo provedeno několik výstřiků, kde bylo ověřeno, že nastavené hodnoty jsou v pořádku a po několika pokusných tělesech byl vystříknut výsledný výrobek, který jsme si poznačili. Po vystříknutí tohoto dílu jsme navýšili rychlost vstřikování na 100 mm/s a proces opakovali. Poslední nastavení při zachování teploty formy a taveniny bylo s rychlostí 130 mm/s. Po vystříknutí tělesa třetí různou rychlostí jsme navyšovali teplotu taveniny nejprve na 230 °C, kde jsme opět vystříkli tři vzorky s různou rychlostí vstřikování a následně na 260 °C. Po získání prvních devíti vzorků bylo potřeba zvýšit teplotu formy na 55 °C a snížit teplotu taveniny na 200 °C. Celý proces se opakuje a po získání dalších devíti vzorků jsme zvýšili teplotu formy na 75 °C a při tomto nastavení jsme získali posledních 9 vzorků. Celkem jsme vyrobili 27 zkušebních vzorků s různými parametry vstřikování.

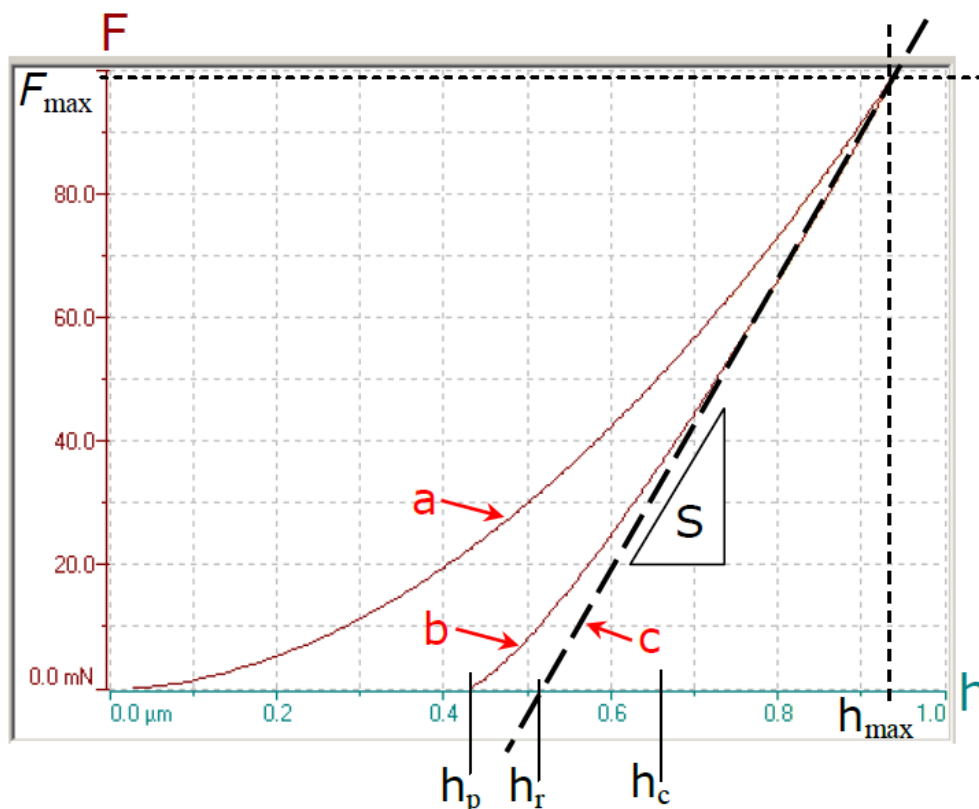
Tabulka 5 Parametry vstřikování jednotlivých těles

číslo vzorku	Teplota formy	Teplota taveniny	Vstřikovací rychlost [mm/s]
1	35 °C	200 °C	50
2			100
3			130
4		230 °C	50
5			100
6			130
7		260 °C	50
8			100
9			130
10	60 °C	200 °C	50
11			100
12			130
13		230 °C	50
14			100
15			130
16		260 °C	50
17			100
18			130
19	75 °C	200 °C	50
20			100
21			130
22		230 °C	50
23			100
24			130
25		260 °C	50
26			100
27			130

## 5 JEDNOTLIVÉ TESTY A JEJICH VYHODNOCENÍ

### 5.1 Instrumentovaná zkouška tvrdosti

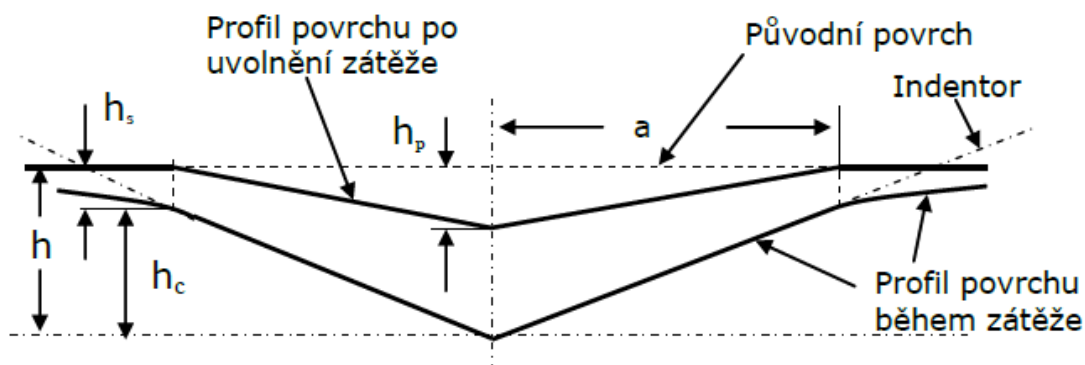
Instrumentovaná zkouška tvrdosti, obvykle známá jako nanoindentace, je další z možností, jak testovat povrchové vlastnosti materiálu na základě instrumentované zkoušky tvrdosti. Funguje na stejném principu jako klasické metody pro měření tvrdosti a to je, že vtlačuje tvrdý indentor do testovaného materiálu. Tento hrot indentoru bývá často z diamantu. Ačkoliv jsou indenty velmi tvrdé, jsou zároveň velmi křehké a je nutné s nimi zacházet opatrně aby nedošlo k jejich poškození. Klasické metody ovšem měří pouze jednu deformaci na jedno zvolené zatížení. Zatímco nanoindentační zkoušky měří přesnou hloubku průniku po celou dobu, kdy je indentor v kontaktu s materiálem. Následným zpracováním dat a grafickým vyhodnocením získáváme indentační křivku, která znázorňuje závislost mezi zatížením a hloubku vtisku. [17] [18]



Obrázek 8 Vykreslení typické indentační křivky [19]

*a* – křivka postupného zatěžování, *b* – křivka postupného odlehčování, *c* – tečna ke křivce *b* v bodě  $F_{max}$ ,  $F_{max}$  – maximální zatěžovací síla,  $h_p$  – trvalá indentační hloubka,  $h_r$  – hloubka indentační tečny,  $h_c$  – kontaktní hloubka indentoru,  $h_{max}$  – maximální indentační hloubka, *S* – vtisková tuhost

Díky moderním technologiím je možné přístroj pro provádění nanoindentace připojit k počítači, kde zaznamenává všechna data a následně je možné tato data vyexportovat do souboru ve formátu txt. Tato data lze následně zpracovávat a vyhodnocovat. V textovém souboru je možné najít hodnoty jako: nastavené maximální zatížení, rychlost zatěžování a odlehčování, přesná pozice indentoru, datum a čas. Následují hlavní výsledky, jako je tvrdost a modul pružnosti. Přídavné výsledky ukazují tvrdost podle Vickerse, maximální zatížení, maximální hloubku vniku indentoru, a další. Po těchto výsledcích následují data, která jsou zaznamenána z celého průběhu testu. Z naměřených dat průběhu nanoindentační zkoušky jsou následně vypočítána data podle rovnic č. 1–6.



Obrázek 9 Znázornění kontaktu indentoru s materiálem [19]

Vtisková tvrdost  $H_{IT}$  je mírou resistance proti trvalé deformaci nebo poškození její výpočet je následující: [19]

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_p} \quad (1)$$

Kde  $A_p$  je průmět kontaktní plochy při zatížení  $F_{max}$  [19]

Další získanou hodnotou je redukovaný modul, který se získáme pomocí následující rovnice: [19]

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi} \cdot S}{2 \cdot \beta \cdot \sqrt{A_p(h_c)}} \quad (2)$$

Výpočet rovinného napěťového modulu se provádí pomocí rovnice (3) kde  $E_i$  je elastický modul indentoru v případě použití diamantu je to hodnota 1141 GPa a  $\nu_i$  je poissonova konstanta indentoru v případě diamantu je to 0,07 [19]

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} \quad (3)$$

Indentační modul  $E_{IT}$  zjistíme pomocí rovnice (4). [19]

$$E_{IT} = E^* \cdot (1 - \nu_s^2) \quad (4)$$

Kde  $\nu_s$  je poissonova konstanta vzorku. Pro polymery se používá hodnota od 0,3 do 0,4 [19]

Poslední významnější hodnota zkouška tvrdosti podle Vickerse kterou spočítáme rovnicí (5). [19]

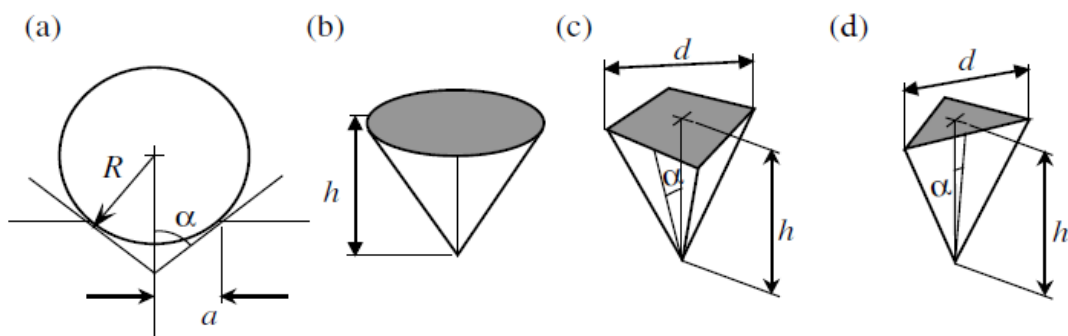
$$HV = \frac{F_{max}}{9,81 \cdot A_c(h_c)} \quad (5)$$

Pro Berkovichův indentor je hodnota přibližně: [19]

$$HV_{IT} \approx H_{IT}/10800 \quad (6)$$

### 5.1.1 Druhy indentorů

Indentační test je většinou prováděn jedním ze základních tvarů indentorů. Jak je znázorněno v obrázku (Obr. 10) může jít o: (a) sférický, (b) kuželový, (c) jehlanový, (d) Berkovichův indentor. [18]



Obrázek 10 Tvary jednotlivých indentorů [18]

Pro indentační zkoušku je důležitý vhodný výběr tvaru indentoru. Nejčastěji se používá jehlanový tvar indentoru jako je trojboký Berkovichův indentor. Jeho poměr hloubky vůči ploše je stejný jako u čtyřbokého Vickersova indentoru. Berkovichův indentor se u nanotvrdosti používá častěji z důvodu jednodušší výroby v malých měřítkách. Pro výpočet

kontaktní plochy indentoru s materiálem slouží naměřená hloubka. Geometrie skutečného hrotu způsobuje odchylky oproti ideálnímu hrotu. [17] [20]

Tyto odchylky bývají patrné při menších zatíženích, kde indentační hloubka nedosahuje takových hodnot. Při použití vyšších zatíženích je tato odchylka zanedbatelná. [20]

Sférický indentor je rovněž používaným tvarem indentoru. Jeho hlavní rozdíl oproti ostrým indentorům je v tom, jak namáhá testovaný objekt. Napětí přenášené pomocí sférického indentoru je malé a způsobuje pouze elastické deformace. [17] [20]

Kuželový indentor je dalším z ostrých indentorů. Jeho výhodou oproti jehlanovým indentorům je to, že při vnikání do objektu nezpůsobuje napětí na hranách. Tento typ indentoru se moc nevyužívá z důvodu, že je obtížné vyrobit diamant ve tvaru kužele s ostrým hrotem. [17] [20]

### 5.1.2 Faktory ovlivňující přesnost měření

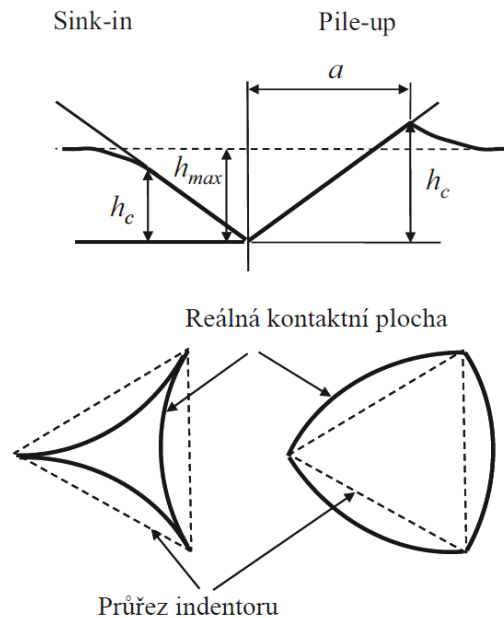
U konvenčních zkoušek tvrdosti se pro vyhodnocení tvrdosti počítá s velikostí otisku indentoru po odstranění zátěže. Předpokládá se, že velikost otisku po odstranění zátěže je stejný jako při plné zátěži. Ovšem velikost otisku po odstranění zátěže se může značně snížit v důsledku zotavení po elastické deformaci. [20]

Mezi faktory, které ovlivňují přesnost měření můžeme zařadit: kolísání teploty, skutečná geometrie indentoru, tvar vtisku, správné určení výšky povrchu, drsnost povrchu nebo naklonění roviny indentace. [20]

Vlivem teploty nám mohou vznikat dva problémy. Při vyšších teplotách se může stát, že se indentor začne snadněji vnikat do materiálu. Je to patrné na indentační křivce, kdy při stálém zatížení nám narůstá hloubka průniku. Další možností, jak může teplota ovlivnit měření, je samotná teplotní roztažnost materiálu, kdy se vlivem teploty mění rozměry měřeného objektu. [20]

V ideálním případě indentor měří hloubku od povrchu materiálu. Během testu to probíhá tak, že se indentor dotkne materiálu s nejmenším možným zatížením, a tím si nastaví nulovou hladinu. Toto určení nulové polohy probíhá v bezprostřední blízkosti místa měření tvrdosti. Pokud je materiál nerovný, případně je nakloněný, může nám software vyhodnocovat špatná data. [20]

Tvar vtisku nám mohou ovlivňovat efekty pile-up a sink-in. U vzorků z elastického materiálu se často stává, že při vnikání indentoru nám vzniká pouze elastická deformace, při které je materiál vtlačen do místa dotyku.



Obrázek 11 Efekt pile-up a sink-in při stejné hloubce průniku. [20]

Efekt pile-up nastává spíše u kovových materiálů kde materiál vystoupí nad rovinu zkušebního tělesa. [20]

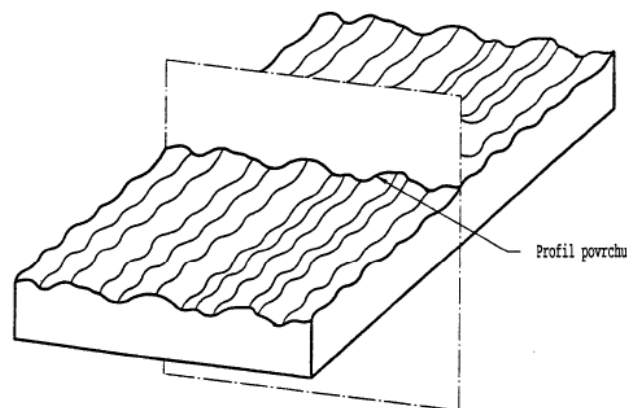
## 5.2 Měření drsnosti povrchu

Drsnost povrchu je souhrn nerovností povrchu relativně malé vzdálenosti, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Drsnost je velmi důležitým parametrem pro následnou práci s výrobky. Ačkoliv je vyšší hodnota drsnosti často nežádoucí, může být obtížné a nákladné tuto drsnost kontrolovat. Drsnost povrchu může mít výrazný vliv na životnost, přesnost práce strojů a na pevnost součástí. Základní profil povrchu zjistíme jako průsečnici skutečného povrchu a roviny, která je kolmá se skutečným povrchem. Tento základní profil dále můžeme rozdělit na další tři profily. [21] [22]

Základní profil získáme z měřeného profilu po odfiltrování nejkratších vln  $\lambda_s$ . Tento proces odebere nejkratší vlnovou složku, která není pro měření podstatná. Z tohoto profilu následně získáváme **P – parametr**. [23]

Profil drsnosti získáváme ze základního profilu odfiltrováním dlouhovlnných složek pomocí použití filtru  $\lambda_c$ . Z profilu drsnosti následně získáváme **R – parametr**. [23]

Profil vlnitosti získáme aplikací filtru  $\lambda_c$  na základní profil, kterým odfiltrujeme dlouhovlnné složky a následně aplikací filtru  $\lambda_f$  pro potlačení krátkovlnné složky. Z profilu vlnitosti získáváme **W – parametr**. [23]



Obrázek 12 Princip získání profilu pro měření drsnosti [23]

**Základní délka  $l_r$ :** délka ve směru osy  $X$ , použitá pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil. [23]

**Vyhodnocovací délka  $l_n$ :** délka ve směru osy  $X$ , použitá pro posouzení vyhodnocovaného profilu. [23]

### Parametry drsnosti

**$R_a$**  – aritmetický průměr absolutních hodnot odchylek profilu  $Z(x)$  od střední čáry drsnosti v rozsahu základní délky. [23]

**$R_z$**  – součet nejvyššího výstupku  $Z_p$  a nejnižší prohlubně  $Z_v$  v rozsahu základní délky. [23]

**$R_p$**  – největší výška výstupku profilu v rozsahu základní délky. [23]

**$R_v$**  – je hloubka  $Z_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky. [23]

## 5.3 Měření pomocí nanoindentoru

Jednotlivá vyrobená tělesa jsme napřed vzali na měření tvrdosti pomocí nanotvrdoměru TTX-NHT2. Na každém vzorku jsme provedli celkem čtyřicet měření. Nastavili jsme celkem 4 různá maximální zatížení a u každého zatížení jsme provedli 10 měření.



U indentační zkoušky jsme použili indentor typu Berkovich a vyhodnocovali jsme údaje metodou Oliver & Pharr. Z naměřených hodnot jsme se zaměřili na:

$H_{IT}$  – Vtisková tvrdost

$E_{IT}$  – Indentační modul

$C_{IT}$  – Vtiskové tečení

$W_{elast}$  – Elastická část deformační práce

$W_{plast}$  – Plastická část deformační práce

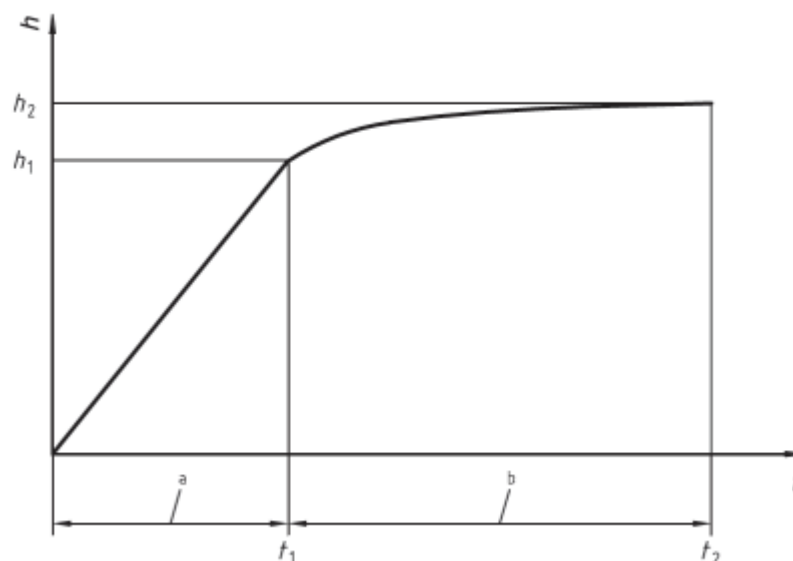
$\eta_{IT}$  – Koeficient zpětné deformace

$h_{max}$  – Maximální indentační hloubka

Veličiny  $H_{IT}$  a  $E_{IT}$  již byly popsány v předchozí kapitole.  $C_{IT}$  se nazývá vtiskové tečení anglicky (creep). Jde o pomalé tečení materiálu, které je vyvolané konstantním působením teploty a času. Jeho výpočet je pomocí následující rovnice (7). [19] [24]

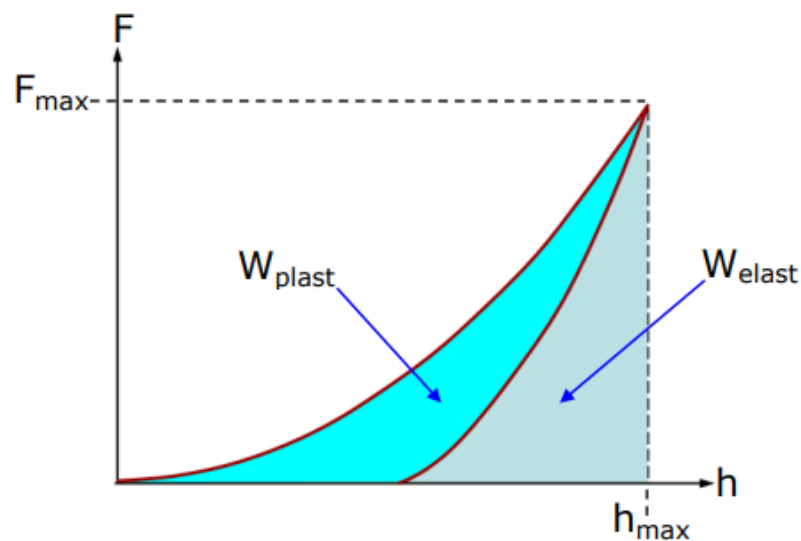
$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100 \quad (7)$$

Kde  $h_1$  je indentační hloubka v čase  $t_1$  při dosažení síly  $F$ . Proměnná  $h_2$  je indentační hloubka v čase  $t_2$  při držení konstantní síly  $F$ . [19]



Obrázek 13 Vtiskové tečení [19]

Elastická část deformační práce  $W_{elast}$  je vykreslena jako plocha pod odlehčovací křivkou. Tato hodnota určuje, jak materiál reaguje na zatížení zpětnou deformací. Plastická část deformační práce  $W_{plast}$  je vykreslena jako plocha mezi zatěžovací a odlehčovací křivkou. Tato část určuje odolnost materiálu proti plastické deformaci. Jejich následným poměrem získáme hodnotu koeficientu zpětné deformace. [19]



Obrázek 14 Plastická a elastická část práce [19]

#### 5.4 Statistické zpracování dat

Po zpracování dat do jednotlivých tabulek jsme u každého vzorku vyhodnotili aritmetický průměr, medián, rozptyl a směrodatnou odchylku.

**Aritmetický průměr** představuje součet všech měřených hodnot v měřeném souboru dělený počtem jednotek v souboru. Tento výpočet je velmi citlivý na odlehlé hodnoty a může zkreslovat informace o střední hodnotě souboru. Aritmetický průměr vypočítáme pomocí této rovnice: [25] [26]

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (8)$$

**Medián** nám rozděljuje soubor na dvě stejně velké poloviny. Jde o prostřední hodnotu seřazeného souboru podle velikosti. V případě, že má soubor sudý počet hodnot, je medián vypočítán jako aritmetický průměr dvou prostředních čísel. Výhodou mediánu je, že odlehlé hodnoty ho nezkreslují. [26]

**Rozptyl** patří mezi odchylkové ukazatele. Značíme jej nejčastěji  $s^2$ . Ukazuje proměnlivost hodnot dané proměnné. Výpočet rozptylu provádíme pomocí rovnice (8). [25]

$$s^2(X_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (9)$$

**Směrodatná odchylka** je jedna z nejdůležitějších a nejpoužívanějších měř proměnlivosti. Je vypočítána jako odmocnina z rozptylu. Pokud je v souboru směrodatná odchylka malá, tak to značí, že naměřené hodnoty si jsou velmi podobné. [26]

$$s(X_i) = \sqrt{s^2(X_i)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (10)$$

Při měření při stálých hodnotách vycházejí odchylky. Tyto odchylky jsou zcela nepředvídatelné a nelze je proto vyloučit. Lze je určit pomocí opakovaného měření za stejných podmínek. Standartní nejistota typu A se určuje jako směrodatná odchylka aritmetického průměru. Tento vztah vyjadřuje rovnice (9). [25]

$$s(\bar{X}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}} \quad (11)$$

## 5.5 Statistické vyhodnocení naměřených dat z indentační zkoušky

### Maximální vtisková tvrdost $H_{IT}$ při zatížení $F_{max}$ 500mN

Tabulka 6 Statistické vyhodnocení vtiskové tvrdosti u zatížení 500mN

Vzorek	$\bar{X}$	m	$s(X_i)$	min	max
1	0,2	0,2	0,03	0,14	0,24
2	0,13	0,13	0,01	0,12	0,16
3	0,22	0,21	0,07	0,12	0,33
4	0,12	0,12	0,01	0,12	0,13
5	0,17	0,18	0,03	0,12	0,2
6	0,14	0,14	0,01	0,12	0,15
7	0,14	0,14	0,01	0,11	0,14
8	0,12	0,12	0,01	0,11	0,13
9	0,16	0,15	0,02	0,13	0,18
10	0,13	0,13	0,01	0,13	0,14
11	0,13	0,13	0,01	0,13	0,15
12	0,13	0,12	0,01	0,12	0,14
13	0,15	0,15	0,01	0,12	0,17

14	0,13	0,13	0,01	0,13	0,15
15	0,13	0,13	0,01	0,12	0,13
16	0,12	0,12	0,01	0,11	0,13
17	0,15	0,16	0,01	0,12	0,16
18	0,16	0,16	0,02	0,12	0,19
19	0,13	0,13	0,02	0,13	0,14
20	0,2	0,18	0,08	0,13	0,43
21	0,14	0,14	0,02	0,14	0,14
22	0,14	0,14	0,01	0,14	0,15
23	0,13	0,13	0,01	0,13	0,14
24	0,13	0,13	0,01	0,13	0,13
25	0,13	0,12	0,02	0,12	0,17
26	0,12	0,12	0,01	0,12	0,13
27	0,13	0,12	0,01	0,12	0,15

Z naměřených dat měl největší průměrnou vtiskovou tvrdost vzorek číslo 3, který má  $H_{IT} = 0,22 \pm 0,07$  GPa, naopak nejnižší vtiskovou tvrdost vykazovaly vzorky číslo 4, 8, 16 a 26 s průměrnou vtiskovou tvrdostí  $H_{IT} = 0,12 \pm 0,01$  GPa.

### Maximální indentační modul $E_{IT}$ při zatížení $F_{max}$ 500mN

Tabulka 7 Statistické vyhodnocení indentačního modulu při zatížení 500mN

Vzorek	$\bar{X}$	m	$s(X_i)$	min	max
1	2,51	2,53	0,2	2,11	2,76
2	1,86	1,83	0,1	1,78	2,04
3	1,78	1,74	0,1	1,54	1,98
4	1,99	1,97	0,1	1,95	2,08
5	2,13	2,19	0,2	1,77	2,32
6	2,00	2,02	0,1	1,85	2,09
7	2,01	2,05	0,1	1,78	2,08
8	1,84	1,83	0,1	1,76	1,93
9	2,06	1,98	0,2	1,8	2,25
10	2,02	2,00	0,01	1,99	2,09
11	2,03	2,00	0,1	1,98	2,15

12	1,96	1,93	0,1	1,92	2,06
13	2,15	2,17	0,1	1,92	2,29
14	2,00	1,97	0,1	1,93	2,11
15	1,91	1,9	0,03	1,89	1,96
16	1,87	1,84	0,1	1,81	1,97
17	2,09	2,13	0,1	1,83	2,16
18	2,1	2,08	0,2	1,79	2,28
19	2,03	2,03	0,02	1,99	2,06
20	2,23	2,26	0,1	1,94	2,5
21	2,16	2,16	0,02	2,11	2,2
22	2,14	2,11	0,1	2,09	2,26
23	2,06	2,06	0,01	2,02	2,13
24	1,98	1,98	0,04	1,91	2,03
25	1,84	1,77	0,1	1,76	2,09
26	1,86	1,87	0,1	1,77	1,95
27	1,83	1,79	0,1	1,78	2,01

Nejvyšší indentační modul byl u vzorku číslo 1 s hodnotou  $E_{IT} = 2,51 \pm 0,2$  GPa. Nejnižší indentační modul jsme naměřili u vzorku číslo 3 s hodnotou  $E_{IT} = 1,78 \pm 0,1$  GPa.

#### Maximální vtiskové tečení $C_{IT}$ při zatížení $F_{max}$ 500mN

Tabulka 8 Statistické vyhodnocení vtiskového tečení při zatížení 500mN

Vzorek	$\bar{X}$	m	$s(X_i)$	min	max
1	13,99	14,07	0,6	12,51	14,54
2	11,29	11,05	0,5	10,82	12,41
3	11,15	11,37	0,5	10,17	11,62
4	11,63	11,49	0,2	11,4	12,05
5	13,33	13,7	0,9	11,27	14,12
6	12,14	12,12	0,5	11,4	12,82
7	12,55	12,8	0,6	11,05	12,91
8	12,33	12,28	0,4	11,74	13,03
9	13,56	13,42	0,6	12,14	14,41
10	10,71	10,66	0,2	10,56	11,14

11	10,77	10,64	0,3	10,57	11,4
12	10,82	10,7	0,3	10,56	11,42
13	12,24	12,34	0,6	11,18	12,93
14	11,51	11,42	0,4	11,03	12,17
15	11,11	11,09	0,1	10,94	11,48
16	11,51	11,48	0,4	11,09	12,22
17	13,25	13,53	0,6	11,81	13,69
18	13,51	13,57	0,8	11,74	14,33
19	10,54	10,53	0,1	10,41	10,85
20	11,67	11,78	0,7	9,99	12,42
21	10,28	10,28	0,2	9,96	10,57
22	10,21	10,06	0,3	9,84	10,92
23	10,1	10,05	0,2	9,87	10,58
24	9,96	9,96	0,1	9,76	10,17
25	10,41	10,12	0,6	9,89	11,61
26	10,56	10,47	0,2	10,29	10,95
27	10,47	10,35	0,3	10,04	11,3

Maximální vtiskové tečení bylo patrné u vzorku číslo 1 s hodnotou 13,9 %, naopak hodnota nejnižšího vtiskového tečení byla patrná u vzorku číslo 24 s hodnotou 9,96 %.

#### Maximální práce při elastické deformaci $W_{\text{elast}}$ u zatížení $F_{\text{max}}$ 500mN

Tabulka 9 Statistické vyhodnocení práce při elastické deformaci u zatížení 500mN

Vzorek	$\bar{X}$	m	$s(X_i)$	min	max
1	1162341,81	1162024,33	25097,3	1116740,7	1207895,94
2	1278865,52	1282258,62	13258,9	1257995,34	1294859,66
3	1096721,07	1056599,34	88557,7	1008105,76	1235640,76
4	1174113,32	1174870,2	2815,5	1168622,14	1177181,28
5	1224258,35	1212480,02	32982,4	1186146,51	1294705,62
6	1218272,66	1216620,55	6819,3	1212363,26	1237471,34
7	1211239,82	1208383,66	9209,2	1201041,65	1232878,51
8	1256917,31	1257995,18	5685,3	1246581,41	1264456,16
9	1251925,16	1275141,25	38565,98	1198522,46	1297136,47

10	1190828,91	1191720,52	3433,6	1182755,23	1193846,52
11	1190908,72	1192393,43	3862,3	1182531,95	1194802,51
12	1213219,88	1215694,06	4532,8	1205612,43	1217415,85
13	1190712,13	1191925,78	16480,2	1168025,62	1215786,6
14	1222069,65	1223642,02	4371	1212357,81	1227061,83
15	1240741,02	1241505,07	3534,5	1232243,91	1245384,17
16	1245677,93	1247584,7	3542,5	1237801,38	1248214,29
17	1225793,12	1219599,2	14744,04	1210010,06	1255217,74
18	1238498,69	1247809,63	37020,7	1189987,31	1299901,11
19	1197754,51	1198511,49	4496,8	1191778,78	1203763,31
20	1184050,44	1198881,03	64739,4	1004860,34	1248280,8
21	1169195,48	1166140,47	5657,2	1163526,58	1180137,14
22	1176864,33	1178157,45	4910,1	1167648,87	1182627,11
23	1200037,49	1199402	5946,1	1190090,65	1209789,05
24	1228661,76	1227400,45	11848,01	1210497,66	1249765,78
25	1296212,35	1301480,73	15553,1	1261514,06	1314305,23
26	1268160,73	1263307,76	24493,5	1233349,63	1304681,07
27	1287313,36	1294140,54	14240,3	1261023,96	1300766,94

Maximální hodnotu práce při elastické deformaci jsme našli u vzorku číslo 25 s hodnotou  $W_{\text{elast}} = 1296212,35 \pm 15553,1$  pJ. Nejnižší hodnotu vykazoval vzorek číslo 3, který měl  $W_{\text{elast}} = 1096721,07 \pm 88557,7$  pJ.

#### Maximální práce při plastické deformaci $W_{\text{plast}}$ u zatížení $F_{\text{max}} 500\text{mN}$

Tabulka 10 Statistické vyhodnocení práce při plastické deformaci u zatížení 500mN

Vzorek	$\bar{X}$	m	$s(X_i)$	min	max
1	1951172,75	1942418,31	30856,5	1904596,85	2019231,95
2	1987941,49	1992734,39	13162,3	1960654,81	2003685,28
3	1905681,39	1900553,35	13854,5	1889598,15	1934656,67
4	2097792,42	2097067,53	4621,9	2090936,97	2104501,4
5	1983169,37	1968766,59	42360,7	1942363,96	2072588,14
6	2037778,89	2034624,58	8563,9	2026915,82	2056208,37

7	2116777,78	2117440,9	7926,95	2101748,59	2133489,04
8	2162191,1	2160800,72	8318,1	2152788,97	2183247,95
9	2068641,73	2068955,96	18631,2	2043836,97	2114808,93
10	1928358,76	1932308,81	8724,4	1911661,46	1937002,72
11	1928736,27	1928797,26	7291,4	1915976,56	1940446,74
12	1965956,16	1963886,7	7591,01	1956008,2	1985349,18
13	1984420,91	1982313,06	11808,4	1968386,42	2013068,99
14	1971355,81	1970365,03	6691,01	1963426,95	1989139,04
15	1975890,3	1977659,63	6266,8	1965142,25	1983587,03
16	2085050,01	2083771,74	7013,8	2076395,97	2104512,09
17	2078983,57	2075800,36	15859,9	2063681,69	2124508,24
18	2058005,19	2054005,69	17929,6	2036734,72	2087501,81
19	1925027,65	1924855,51	11613,5	1909028,93	1951522,8
20	1822357,32	1820892,7	16808,8	1794826,75	1856573,37
21	1838214,85	1837625,87	5321,1	1831501,33	1851990,43
22	1839307,63	1839419,68	5714,1	1832008,15	1851632,88
23	1863179,09	1860747,1	7289,9	1856754,02	1877485,84
24	1862181,74	1864169,53	5386,7	1855372,72	1868949,09
25	1921559,67	1932922,73	26831,8	1859146,44	1956172,59
26	1997430,54	1995047,81	10099,02	1986027,21	2023761,01
27	1981306,75	1980876,17	4978,8	1973127,85	1990268,18

Maximální hodnotu práce při plastické deformaci jsme našli u vzorku číslo 8 s hodnotou  $W_{\text{plast}} = 2162191,10 \text{ 01} \pm 8318,1 \text{ pJ}$ . Nejnižší hodnotu vykazoval vzorek číslo 20, který měl  $W_{\text{plast}} = 1822357,32 \pm 16808,8 \text{ pJ}$ .

### Maximální koeficient zpětné deformace $\eta_{\text{IT}}$ při zatížení $F_{\text{max}} 500\text{mN}$

Tabulka 11 Statistické vyhodnocení koeficientu zpětné deformace při zatížení 500mN

Vzorek	$\bar{X}$	m	$s(X_i)$	min	max
1	37,33	37,35	0,3	36,93	37,85
2	39,15	39,24	0,2	38,73	39,41
3	36,47	35,71	1,8	34,7	39,44
4	35,88	35,88	0,02	35,85	35,94
5	38,17	38,14	0,5	37,1	38,97



6	37,42	37,41	0,1	37,3	37,57
7	36,4	36,4	0,2	36,19	36,82
8	36,76	36,77	0,1	36,53	36,96
9	37,69	38,06	0,6	36,81	38,23
10	38,18	38,19	0,1	38,08	38,26
11	38,18	38,21	0,1	38,00	38,25
12	38,16	38,22	0,1	37,84	38,28
13	37,5	37,54	0,2	37,13	37,8
14	38,27	38,3	0,1	38,04	38,41
15	38,57	38,54	0,1	38,34	38,74
16	37,4	37,44	0,1	37,19	37,54
17	37,09	37,02	0,2	36,8	37,55
18	37,56	37,67	0,5	36,83	38,4
19	38,36	38,38	0,1	38,15	38,62
20	39,36	39,67	1,2	35,89	40,45
21	38,88	38,81	0,2	38,58	39,19
22	39,02	39,05	0,1	38,76	39,13
23	39,18	39,18	0,2	38,8	39,43
24	39,75	39,69	0,3	39,31	40,24
25	40,28	40,23	0,3	39,97	40,94
26	38,83	38,81	0,5	37,87	39,55
27	39,38	39,5	0,2	38,91	39,58

Maximální koeficient zpětné deformace jsme našli u vzorku číslo 25 který měl  $\eta_{IT} = 40,28 \%$ , naopak nejnižší hodnotu koeficientu měl vzorek číslo 4 s hodnotou  $\eta_{IT} = 35,58 \%$ .

#### Maximální hloubka indentace $h_{max}$ při zatížení $F_{max}$ 500mN

Tabulka 12 Statistické vyhodnocení maximální hloubky při zatížení 500mN

Vzorek	$\bar{X}$	m	$s(X_i)$	min	max
1	12407,56	12228,37	754,2	11473,16	14349,4
2	14913,88	15210,46	513,9	13774,5	15315,4

3	13897,4	13579,86	703,6	13030,63	15067,63
4	15191,03	15359,13	263,01	14703,7	15421,92
5	13449,71	13209,73	1021,7	12506,28	15475,71
6	14523,41	14441,71	485,02	13962,36	15319,42
7	14524,67	14312,06	558,4	14168,85	16024,14
8	15451,76	15458,63	402,5	14861,01	16020,82
9	13748,98	14060,44	714,2	12884,66	15220,85
10	14740,15	14798,79	163,3	14336,62	14887,37
11	14688,23	14814,86	280,6	13998,33	14925,2
12	14871,49	15089,87	324,8	14296,91	15131,59
13	13954,75	13805,42	633,01	13264	15234,09
14	14638,94	14801,78	388,2	14005,46	15018,1
15	15067,28	15097,78	98,6	14784,88	15154,39
16	15391,14	15550,48	374,5	14715,2	15776,61
17	13998,23	13762,77	576,4	13613,65	15610,19
18	13656,77	13686,61	755,6	12837,02	15345,82
19	14747,93	14753,86	99,01	14489,97	14901,65
20	13020,34	12881,05	700,2	12101,76	14687,7
21	14267,6	14298,41	103,2	14056,11	14399,57
22	14264,53	14404,65	280,8	13657,74	14484,14
23	14542,38	14596,2	123,01	14252,73	14652,87
24	14731,61	14725,48	88,02	14603,62	14883,13
25	14889,11	15291,68	696,8	13433,55	15381,71
26	15233,43	15251,29	167,4	14972,1	15454,19
27	15169,11	15333,1	372,4	14238,36	15438,72

Maximální aritmetický průměr hloubky  $h_{\max}$  jsme našli u vzorku číslo 8, který měl hodnotu  $h_{\max} = 15451,76 \pm 402,5$  nm. Nejnižší z aritmetických průměrů měl vzorek číslo 1, který měl  $h_{\max} = 12407,56 \pm 754,2$  nm.

### 5.5.1 Vybraná data při zatížení 500mN

Naměřená data jsme statisticky vyhodnotili a aritmetický průměr jsme vložili do těchto tabulek pro zjednodušení.

Nastavení indentační zkoušky na maximální zatížení 500 mN a zatěžující a odlehčující rychlost 1000 mN/min.

Tabulka 13 Vyhodnocená data pro maximální zatížení 500mN

Vzorek	$H_{IT}$ [GPa]	$E_{IT}$ [GPa]	$C_{IT}$ [%]	$W_{elast}$ [pJ]	$W_{plast}$ [pJ]	$\eta_{IT}$ [%]	$h_{max}$ [nm]
1	0,2	2,51	13,99	1162341,81	1951172,75	0,2	2,51
2	0,13	1,86	11,29	1278865,52	1987941,49	0,13	1,86
3	0,22	1,78	11,15	1096721,07	1905681,39	0,22	1,78
4	0,12	1,99	11,63	1174113,32	2097792,42	0,12	1,99
5	0,17	2,13	13,33	1224258,35	1983169,37	0,17	2,13
6	0,14	2,00	12,14	1218272,66	2037778,89	0,14	2,00
7	0,14	2,01	12,55	1211239,82	2116777,78	0,14	2,01
8	0,12	1,84	12,33	1256917,31	2162191,1	0,12	1,84
9	0,16	2,06	13,56	1251925,16	2068641,73	0,16	2,06
10	0,13	2,02	10,71	1190828,91	1928358,76	0,13	2,02
11	0,13	2,03	10,77	1190908,72	1928736,27	0,13	2,03
12	0,13	1,96	10,82	1213219,88	1965956,16	0,13	1,96
13	0,15	2,15	12,24	1190712,13	1984420,91	0,15	2,15
14	0,13	2,00	11,51	1222069,65	1971355,81	0,13	2,00
15	0,13	1,91	11,11	1240741,02	1975890,3	0,13	1,91
16	0,12	1,87	11,51	1245677,93	2085050,01	0,12	1,87
17	0,15	2,09	13,25	1225793,12	2078983,57	0,15	2,09
18	0,16	2,1	13,51	1238498,69	2058005,19	0,16	2,1
19	0,13	2,03	10,54	1197754,51	1925027,65	0,13	2,03
20	0,2	2,23	11,67	1184050,44	1822357,32	0,2	2,23
21	0,14	2,16	10,28	1169195,48	1838214,85	0,14	2,16
22	0,14	2,14	10,21	1176864,33	1839307,63	0,14	2,14
23	0,13	2,06	10,1	1200037,49	1863179,09	0,13	2,06
24	0,13	1,98	9,96	1228661,76	1862181,74	0,13	1,98
25	0,13	1,84	10,41	1296212,35	1921559,67	0,13	1,84
26	0,12	1,86	10,56	1268160,73	1997430,54	0,12	1,86
27	0,13	1,83	10,47	1287313,36	1981306,75	0,13	1,83

## 5.5.2 Vybraná data při zatížení 300mN

Nastavení indentační zkoušky na maximální zatížení 300mN a nastavení rychlosti na 600mN/min.

Tabulka 14 Vyhodnocená data pro maximální zatížení 300mN

Vzorek	$H_{IT}$ [GPa]	$E_{IT}$ [GPa]	$C_{IT}$ [%]	$W_{elast}$ [pJ]	$W_{plast}$ [pJ]	$\eta_{IT}$ [%]	$h_{max}$ [nm]
1	0,14	1,93	12,05	586717,18	830781,62	0,14	1,93
2	0,13	1,89	11,53	581449,18	868896,13	0,13	1,89
3	0,13	1,95	11,38	571580,92	868408,18	0,13	1,95
4	0,12	1,97	11,85	540292,54	943119,96	0,12	1,97
5	0,14	1,99	11,95	563509,79	903088,53	0,14	1,99
6	0,12	1,97	11,68	550041,26	929468,38	0,12	1,97
7	0,11	1,83	12,09	558367,88	999621,81	0,11	1,83
8	0,12	1,84	12,15	571834,74	961186,62	0,12	1,84
9	0,12	1,79	11,73	586692,04	934169,47	0,12	1,79
10	0,13	2,08	10,91	540987,36	868642,26	0,13	2,08
11	0,13	2,03	10,85	544341,42	880812,01	0,13	2,03
12	0,13	2,00	10,76	550691,33	882323,19	0,13	2,00
13	0,13	2,00	11,06	548260,82	895216,31	0,13	2,00
14	0,13	2,01	10,90	555915,47	871447,42	0,13	2,01
15	0,13	1,99	10,86	559247,81	872563,11	0,13	1,99
16	0,12	1,88	11,64	564681,75	938952,95	0,12	1,88
17	0,12	1,91	11,51	570476,37	915710,39	0,12	1,91
18	0,12	1,83	11,54	584303,75	923188,01	0,12	1,83
19	0,14	2,11	10,33	544811,41	837945,72	0,14	2,11
20	0,14	2,17	10,22	537712,64	826935,80	0,14	2,17
21	0,14	2,11	9,95	548351,25	829881,05	0,14	2,11
22	0,14	2,09	10,15	548126,04	852703,62	0,14	2,09
23	0,13	2,05	10,16	557467,62	857147,25	0,13	2,05
24	0,13	1,94	10,04	578033,20	853145,00	0,13	1,94
25	0,13	1,86	10,34	587246,73	888148,89	0,13	1,86
26	0,13	1,83	10,57	597747,31	896773,23	0,13	1,83
27	0,13	1,85	10,49	594822,58	892825,21	0,13	1,85

## 5.5.3 Vybraná data při zatížení 100mN

Nastavení indentační zkoušky na maximální zatížení 100mN a nastavili jsme rychlost 200mN/min

Tabulka 15 Vyhodnocená data pro maximální zatížení 100mN

Vzorek	H <sub>IT</sub> [GPa]	E <sub>IT</sub> [GPa]	C <sub>IT</sub> [%]	W <sub>elast</sub> [pJ]	W <sub>plast</sub> [pJ]	η <sub>IT</sub> [%]	h <sub>max</sub> [nm]
1	0,14	2,10	10,05	104828,69	142779,44	0,14	2,10
2	0,14	2,14	10,12	103055,42	148696,59	0,14	2,14
3	0,50	4,93	21,41	77531,97	135734,87	0,50	4,93
4	0,13	2,18	10,40	95908,20	164324,93	0,13	2,18
5	0,13	2,12	10,97	99382,71	166249,03	0,13	2,12
6	0,13	2,09	10,92	99819,65	168883,21	0,13	2,09
7	0,11	1,92	11,35	102655,51	183818,85	0,11	1,92
8	0,12	2,06	11,05	101563,03	171899,52	0,12	2,06
9	0,13	2,00	10,06	104276,82	164445,09	0,13	2,00
10	0,13	2,20	10,15	93284,40	152675,63	0,13	2,20
11	0,13	2,16	10,14	100217,55	165115,62	0,13	2,16
12	0,13	2,13	10,18	101732,37	166311,86	0,13	2,13
13	0,13	2,13	10,36	100612,37	169298,91	0,13	2,13
14	0,13	2,12	9,88	102568,62	163831,18	0,13	2,12
15	0,13	2,15	10,26	101295,31	166658,15	0,13	2,15
16	0,14	2,26	11,61	99022,50	174975,30	0,14	2,26
17	0,13	2,08	10,63	102740,42	171744,14	0,13	2,08
18	0,13	2,03	10,56	104502,83	171578,99	0,13	2,03
19	0,13	2,21	10,13	101008,28	162218,15	0,13	2,21
20	0,14	2,27	9,93	101071,19	158505,04	0,14	2,27
21	0,14	2,18	10,09	104522,72	160024,85	0,14	2,18
22	0,14	2,15	10,62	104901,24	165780,86	0,14	2,15
23	0,14	2,12	10,62	106264,83	164477,85	0,14	2,12
24	0,14	2,08	10,48	108104,59	163441,07	0,14	2,08
25	0,14	2,05	10,72	107465,94	165808,02	0,14	2,05
26	0,14	2,02	10,69	109257,54	163401,66	0,14	2,02
27	0,14	2,07	10,57	108530,19	161494,15	0,14	2,07

## 5.5.4 Vybraná data při zatížení 50mN

Nastavení indentační zkoušky na maximální zatížení 50mN a nastavení rychlosti 100mN/min

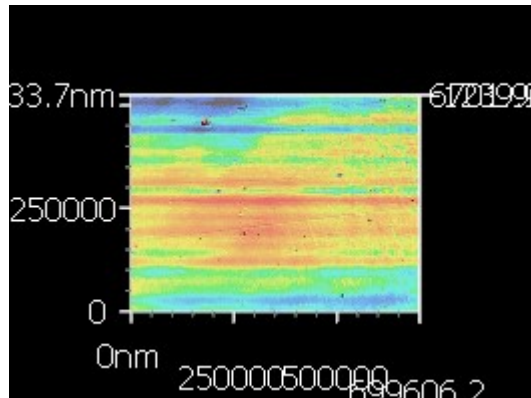
Tabulka 16 Vyhodnocená data pro maximální zatížení 50mN

Vzorek	$H_{IT}$ [GPa]	$E_{IT}$ [GPa]	$C_{IT}$ [%]	$W_{elast}$ [pJ]	$W_{plast}$ [pJ]	$\eta_{IT}$ [%]	$h_{max}$ [nm]
1	0,14	2,25	6,82	35736,17	47979,62	0,14	2,25
2	0,13	2,21	8,89	35576,80	54228,15	0,13	2,21
3	0,13	2,11	8,22	36819,62	54086,55	0,13	2,11
4	0,12	2,15	10,53	34608,48	61115,43	0,12	2,15
5	0,12	2,12	10,87	34673,84	62780,98	0,12	2,12
6	0,12	2,12	10,93	34637,52	63291,99	0,12	2,12
7	0,10	1,94	11,10	36005,40	68171,24	0,10	1,94
8	0,12	2,06	10,80	35353,97	63550,48	0,12	2,06
9	0,12	2,06	10,07	35958,70	60408,76	0,12	2,06
10	0,13	2,19	10,29	41629,43	69725,23	0,13	2,19
11	0,13	2,18	10,21	35176,32	58899,70	0,13	2,18
12	0,15	2,31	10,49	35035,08	57384,98	0,15	2,31
13	0,13	2,17	10,90	35016,87	61159,25	0,13	2,17
14	0,13	2,17	10,00	35565,05	57862,43	0,13	2,17
15	0,13	2,18	10,67	35109,62	59758,67	0,13	2,18
16	0,12	2,09	11,17	35349,19	63476,37	0,12	2,09
17	0,15	2,33	11,62	34411,64	59615,18	0,15	2,33
18	0,13	2,12	10,57	35556,04	59487,75	0,13	2,12
19	0,14	2,27	9,49	35300,34	54491,68	0,14	2,27
20	0,14	2,24	9,20	35867,54	54090,44	0,14	2,24
21	0,15	2,28	9,93	36627,23	52036,66	0,15	2,28
22	0,15	2,20	10,06	36815,64	54053,04	0,15	2,20
23	0,15	2,24	10,04	36682,57	52410,45	0,15	2,24
24	0,15	2,24	9,73	36877,95	51719,97	0,15	2,24
25	0,15	2,24	9,70	36152,18	53284,84	0,15	2,24
26	0,15	2,24	9,44	36655,31	51896,96	0,15	2,24
27	0,15	2,26	9,41	36505,43	51935,29	0,15	2,26

## 5.6 Naměřená data z kontofokálního mikroskopu

Kontofokálním mikroskopem Keyence VK-X1000 byl nasnímán každý vzorek při zvětšení 20× a při zvětšení 150× následně jsme u vzorků se zvětšením 20× změřili drsnost povrchu.

### 5.6.1 Vyhodnocení snímků



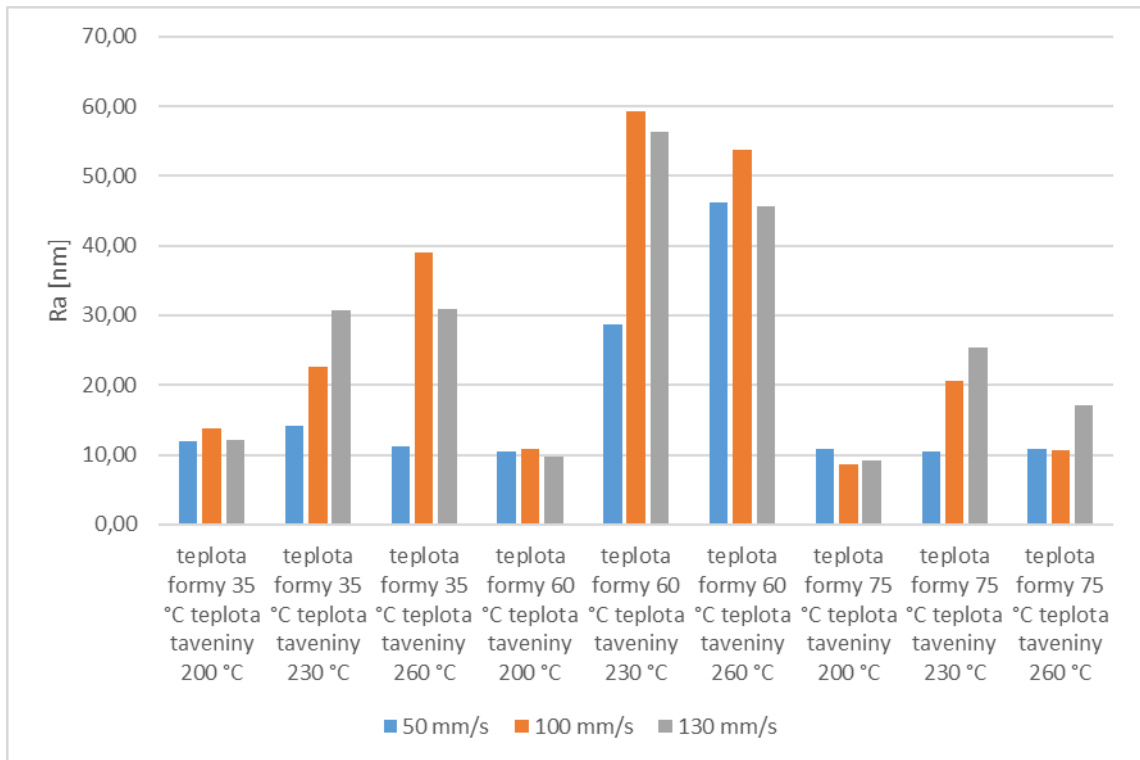
Obrázek 15 Snímek z mikroskopu

Na snímcích od všech vzorků byla vybrána část, kde byla měřena výsledná drsnost povrchu. Vypočítané hodnoty jsme zapsali do tabulky (Tab. 17).

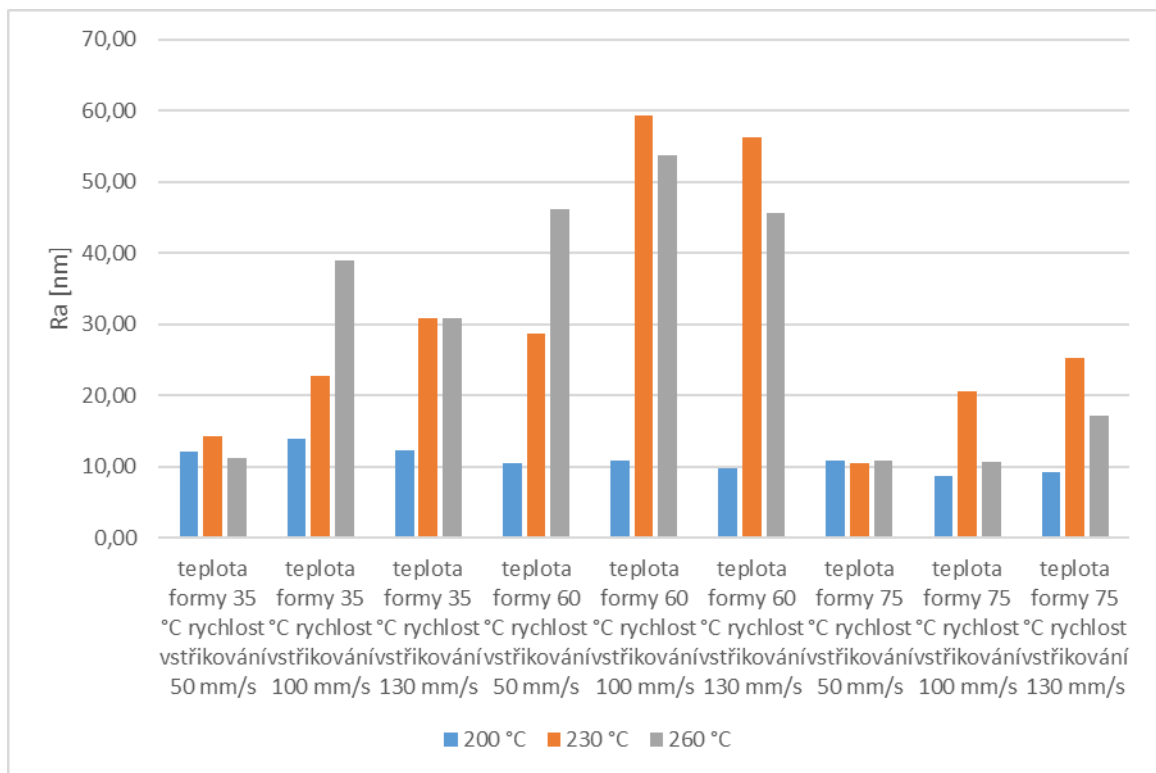
Tabulka 17 Naměřené hodnoty drsnosti  $R_a$  u jednotlivých vzorků

Vzorek	$R_a$ [nm]	Vzorek	$R_a$ [nm]	Vzorek	$R_a$ [nm]
1	12,0	10	10,5	19	10,8
2	13,8	11	10,8	20	8,7
3	12,2	12	9,7	21	9,1
4	14,2	13	28,7	22	10,5
5	22,7	14	59,3	23	20,6
6	30,8	15	56,3	24	25,3
7	11,2	16	46,2	25	10,8
8	39,0	17	53,8	26	10,7
9	30,9	18	45,6	27	17,1

Jednotlivé hodnoty drsnosti jsou zobrazeny v grafech a je zde porovnán vliv vstřikovacích parametrů na drsnost povrchu.



Obrázek 16 Graf porovnávající drsnost povrchu jednotlivých vzorků a jejich vstříkovací rychlosti

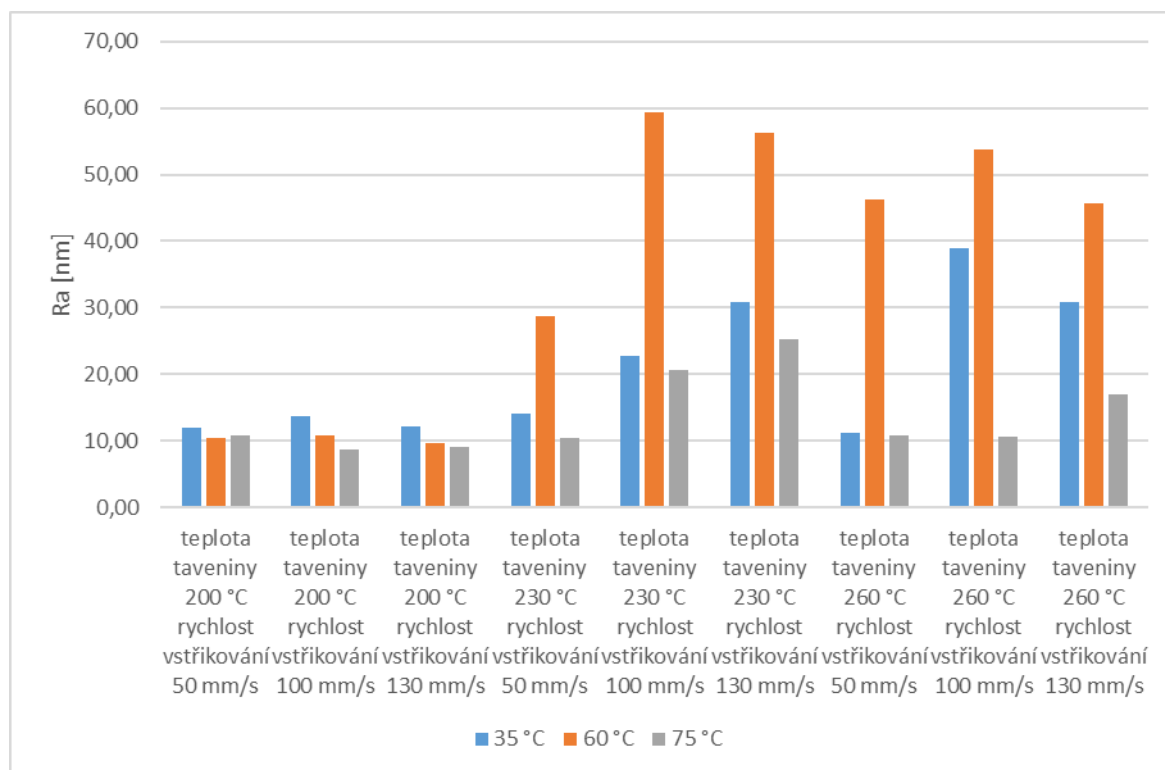


Obrázek 17 Graf porovnávající drsnost povrchu jednotlivých vzorků a teploty taveniny během vstříkování



Z vynesného grafu na obrázku (Obr 16) je zřejmé, že drsnost povrchu byla nejnižší u vzorků, které byly vstříkované rychlostí 50 mm/s. Mezi rychlostí 100 mm/s a 130 mm/s není vidět znatelný rozdíl.

Z grafu na obrázku (Obr. 17) je patrné, že při nastavení teploty taveniny na 200 °C během vstříkovacího procesu výsledná tělesa dosahovala stabilně nižších hodnot  $R_a$  než ostatní teploty.

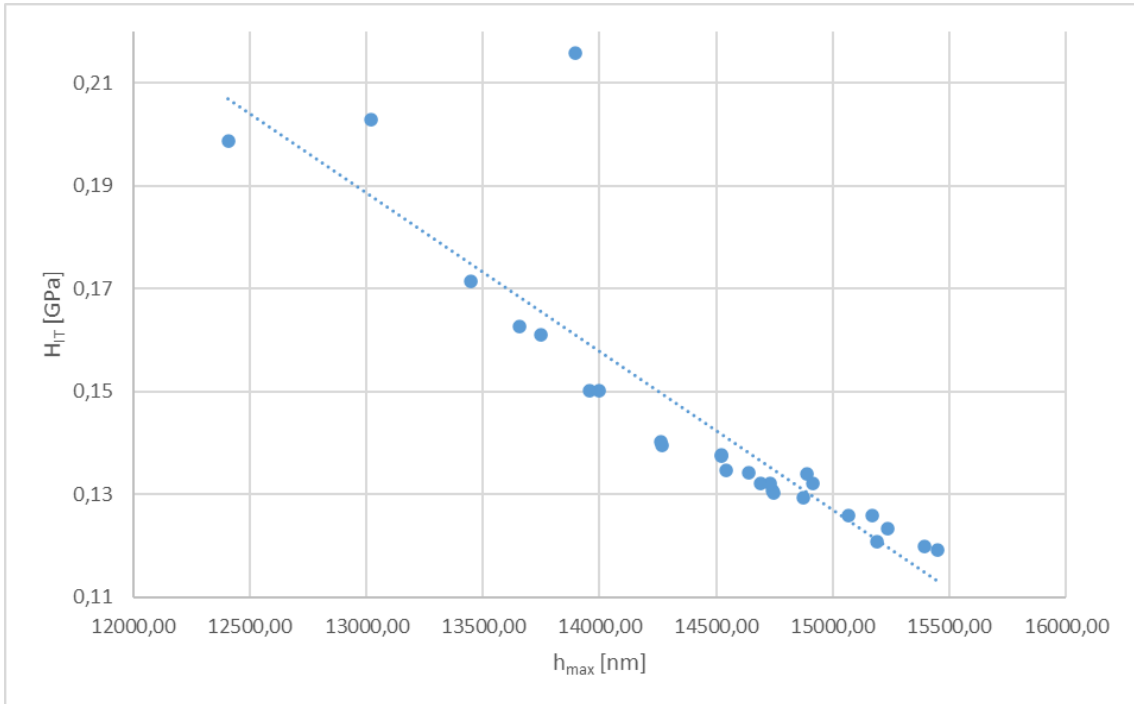


Obrázek 18 Graf porovnávající drsnost povrchu jednotlivých vzorků a teploty formy během vstříkování

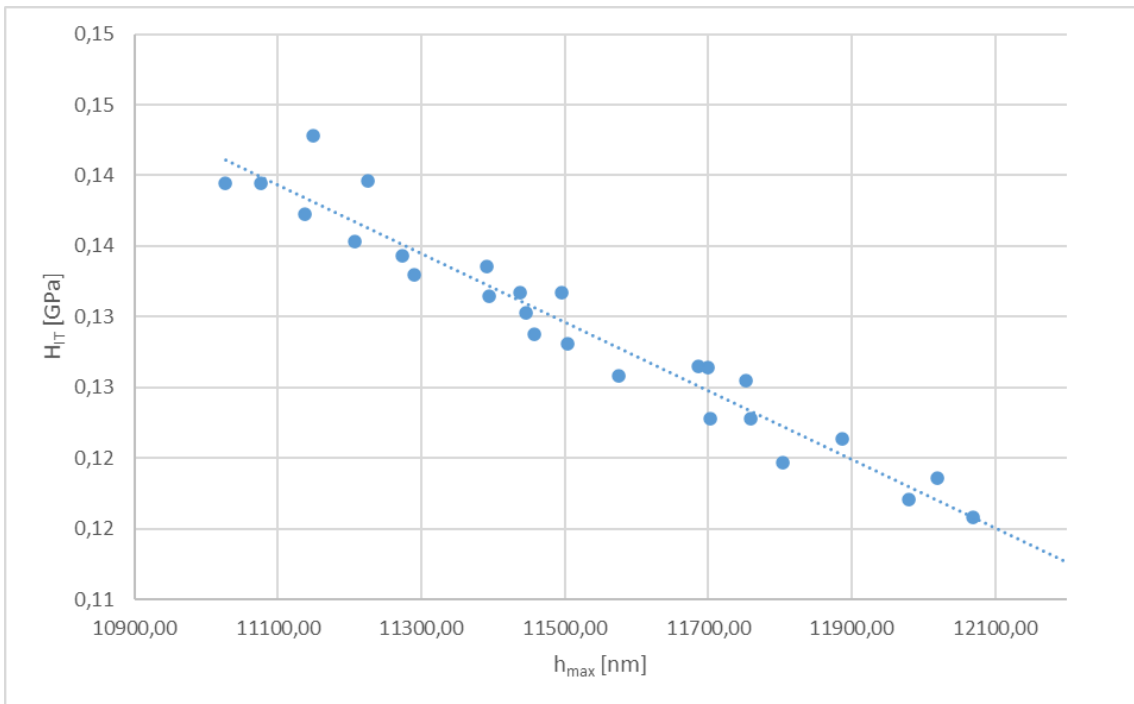
Z grafu je vidět, že nastavení teploty formy na 60 °C, mělo zásadní vliv na hodnotu  $R_a$ , nejnižší hodnoty  $R_a$  měly výrobky s nastavením teploty formy 75 °C.

## 5.7 Grafické vyhodnocení dat z indentačních zkoušek

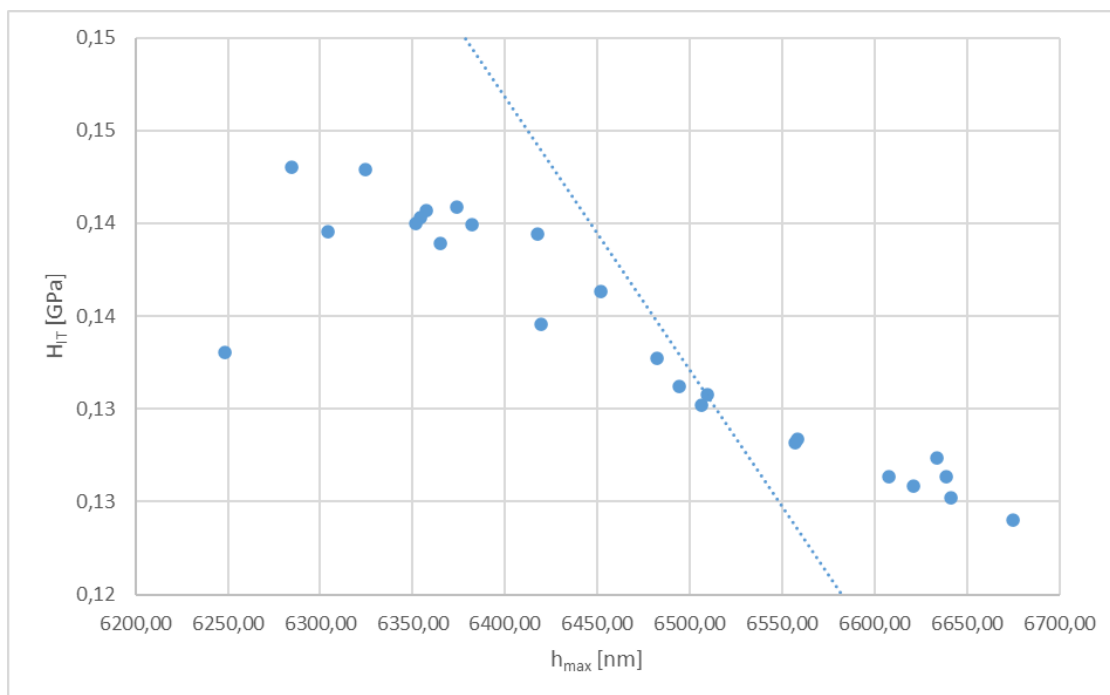
Na základě získaných dat z indentační zkoušky jsme provedli porovnání závislosti tvrdosti  $H_{IT}$  na maximální hloubce  $h_{max}$  pro jednotlivá zatížení a graficky vyhodnotili do následujících grafů.



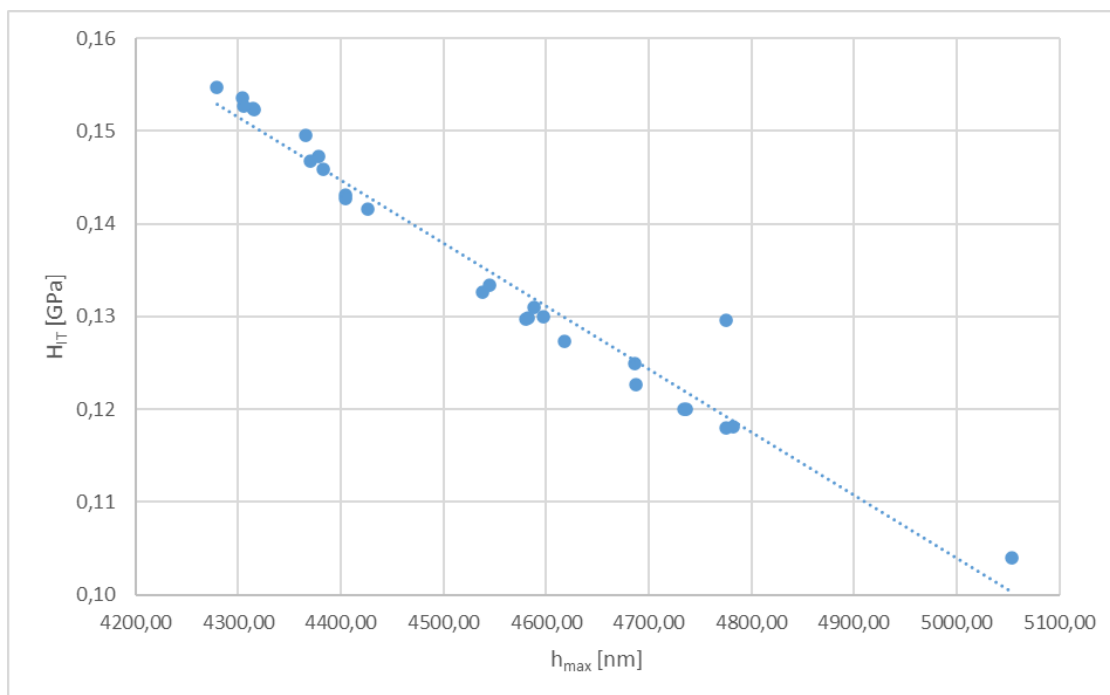
Obrázek 19 Graf závislosti tvrdosti na naměřené hloubce pro maximální zatížení 500mN



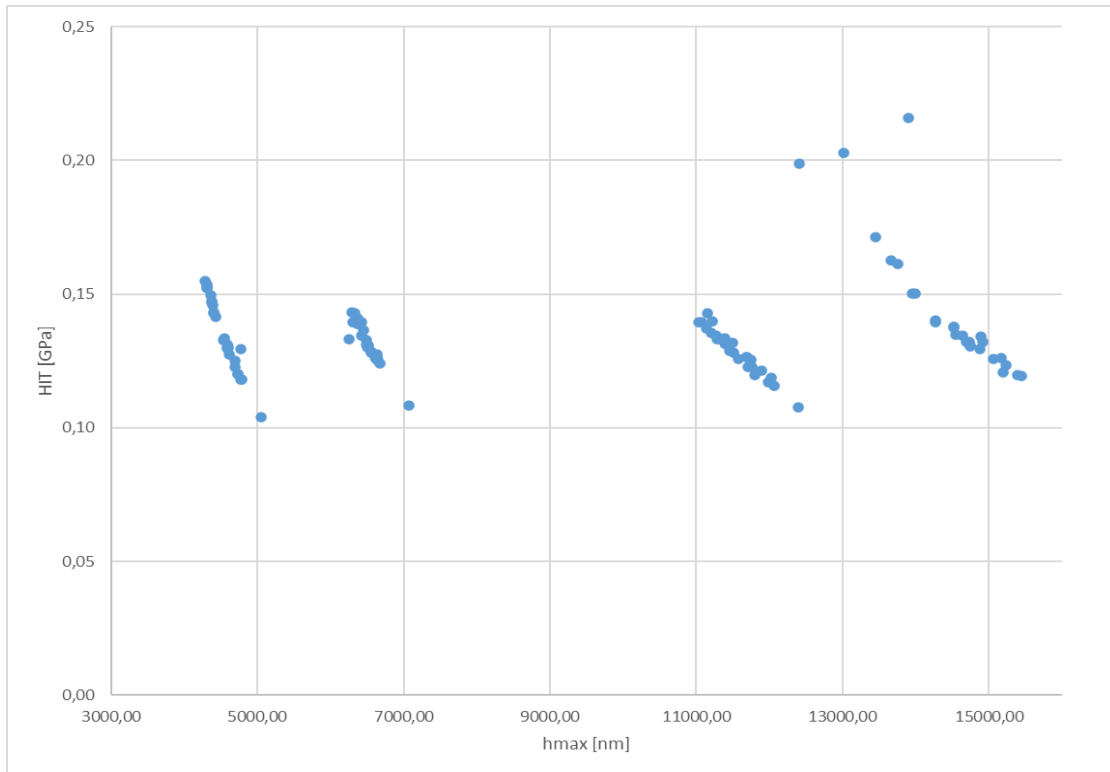
Obrázek 20 Graf závislosti tvrdosti na naměřené hloubce pro maximální zatížení 300mN



Obrázek 21 Graf závislosti tvrdosti na naměřené hloubce pro maximální zatížení 100mN

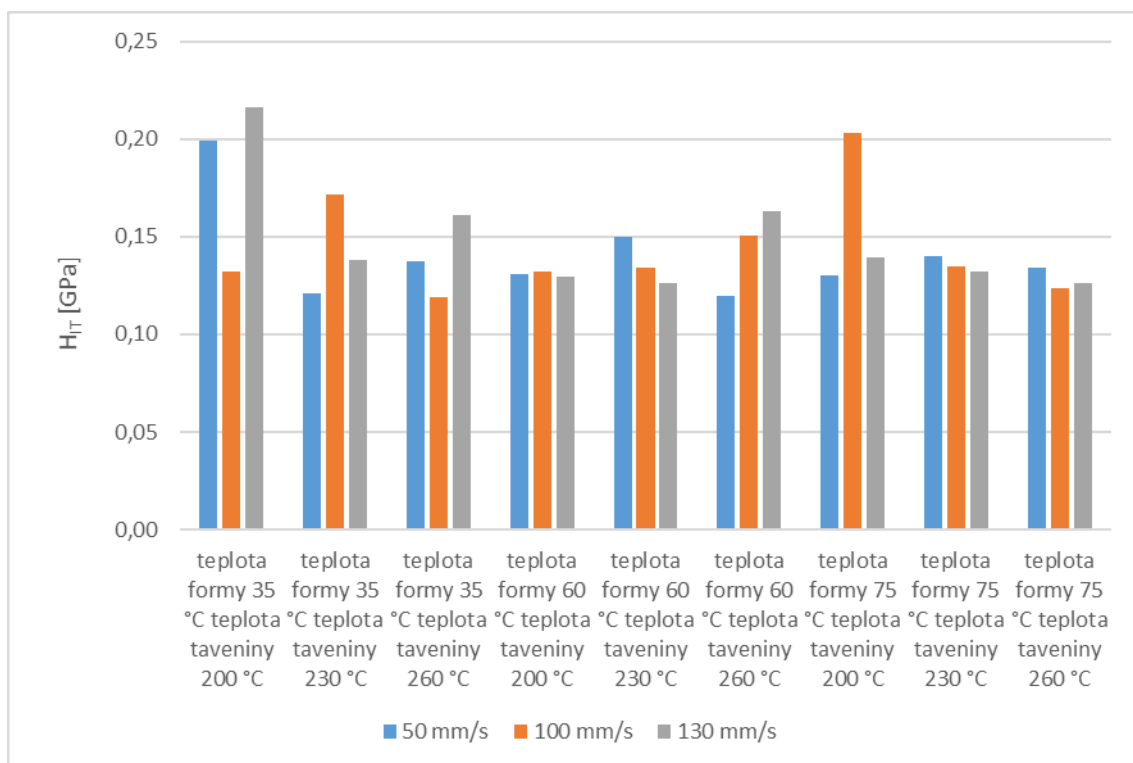


Obrázek 22 Graf závislosti tvrdosti na naměřené hloubce pro maximální zatížení 50mN

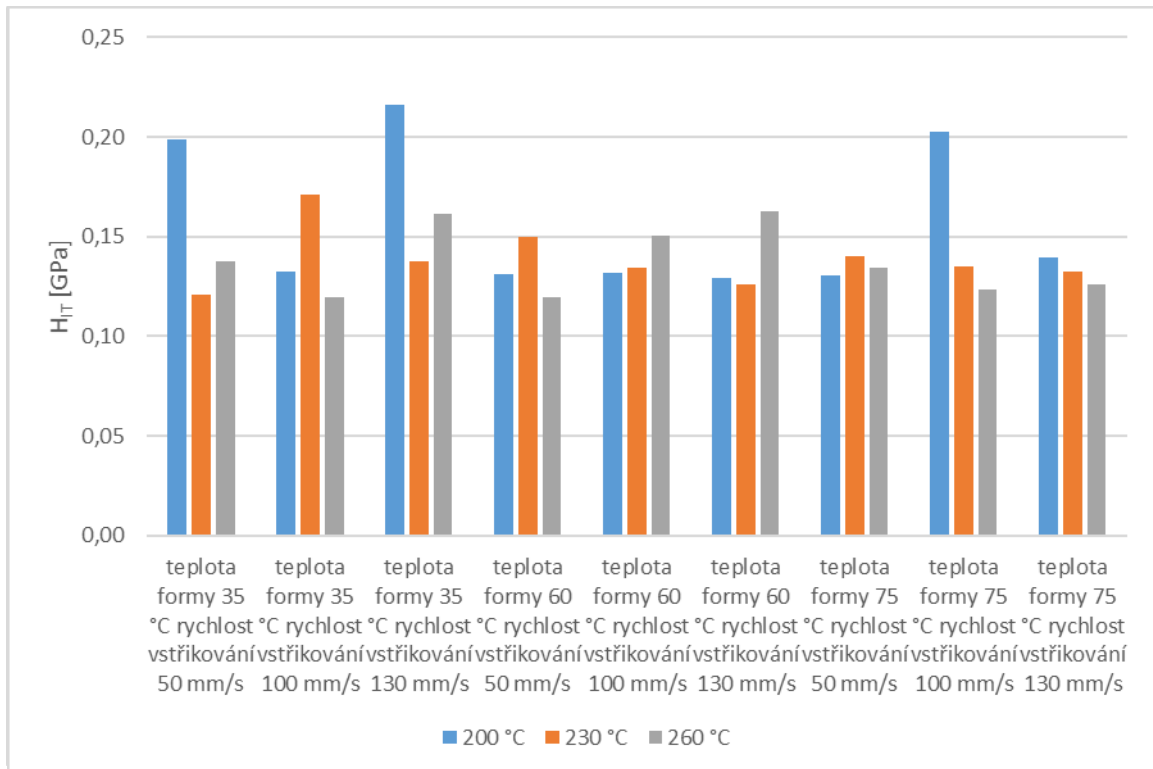


Obrázek 23 Graf závislosti tvrdosti na naměřené hloubce pro všechna zatížení

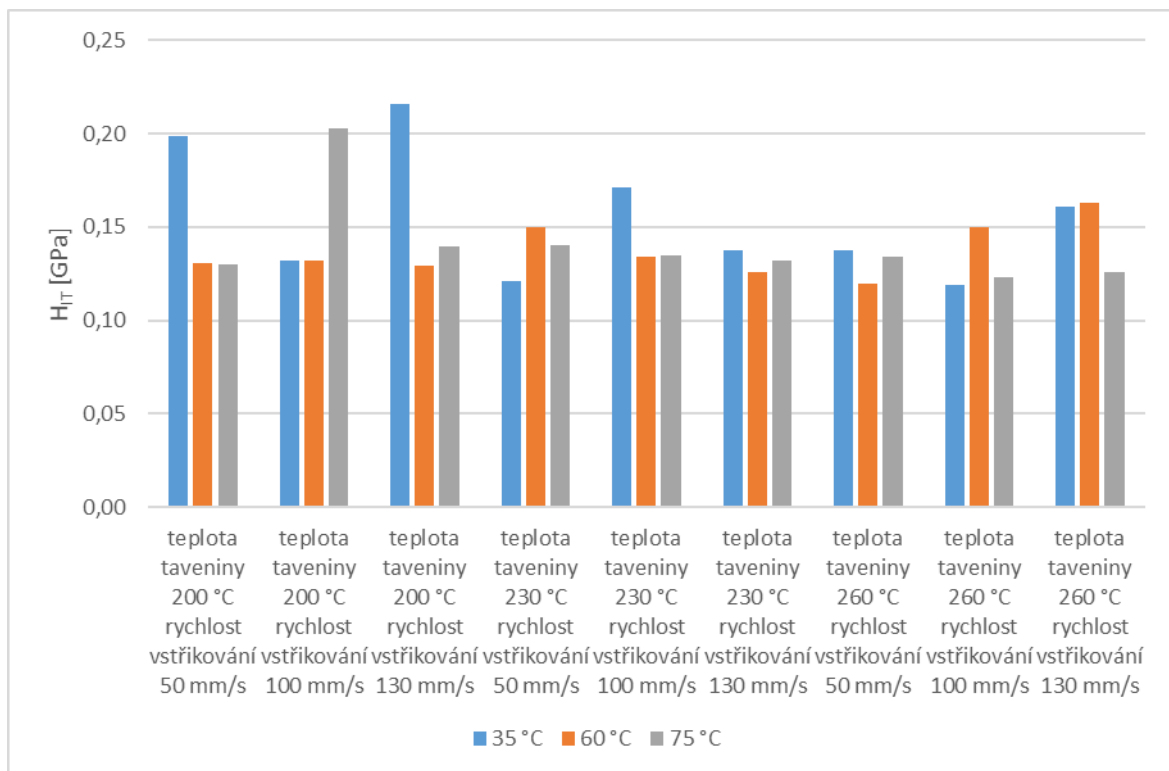
### 5.7.1 Seskupení výrobků podle vstřikovacích parametrů a porovnání jejich indentační tvrdosti



Obrázek 24 Graf porovnávající vtiskovou tvrdost při různých rychlosti vstřikování

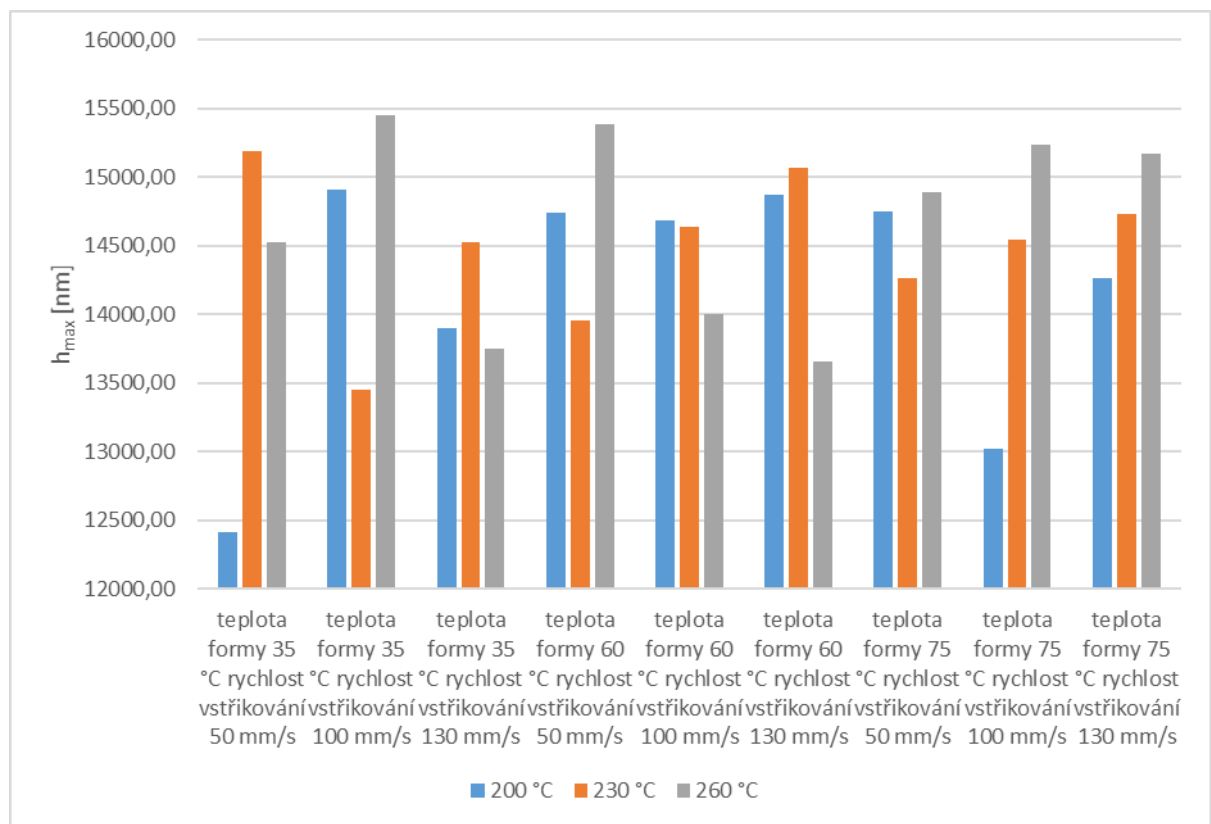


Obrázek 25 Graf porovnávající vtiskovou tvrdost při různých teplotách taveniny během vstřikování



Obrázek 26 Graf porovnávající vtiskovou tvrdost při různých teplotách formy během vstřikování

### 5.7.2 Seskupení výrobků podle vstřikovacích parametrů a porovnání jejich indentační hloubky



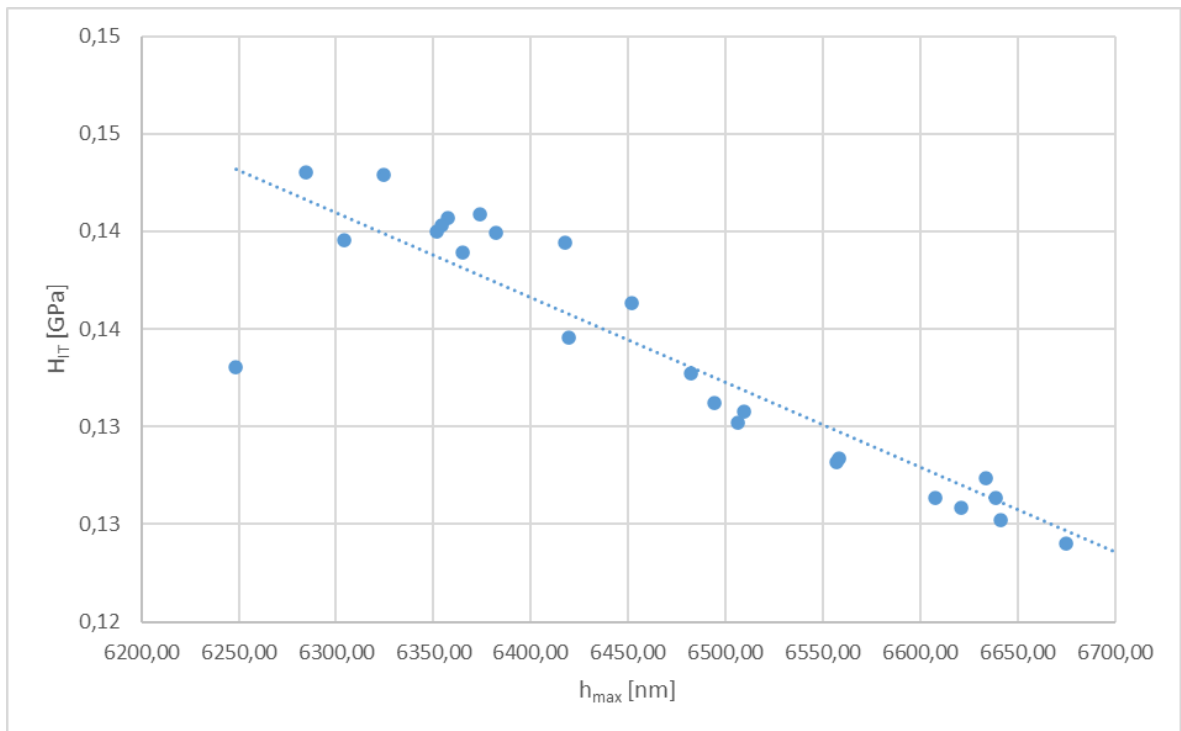
Obrázek 27 Graf porovnávající  $h_{max}$  při různých teplotách vstřikování

## 5.8 Diskuze získaných výsledků

Z grafů vlivů procesních parametrů na drsnost povrchu  $R_a$  je patrná spojitost. Vstřikované výrobky, které byly vstřikovány s teplotou taveniny 200 °C, mají stabilně nízkou drsnost povrchu při všech kombinacích vstřikovacích parametrů. Výrobky s rychlostí vstřikování 50 mm/s měly také nejnižší hodnoty drsnosti povrchu v porovnání s rychlostmi 100 mm/s a 130 mm/s. Z grafů, kde jsou výrobky rozlišeny podle teploty formy je patrné, že při teplotách formy 60 °C měly výrobky nejvyšší drsnost povrchu.

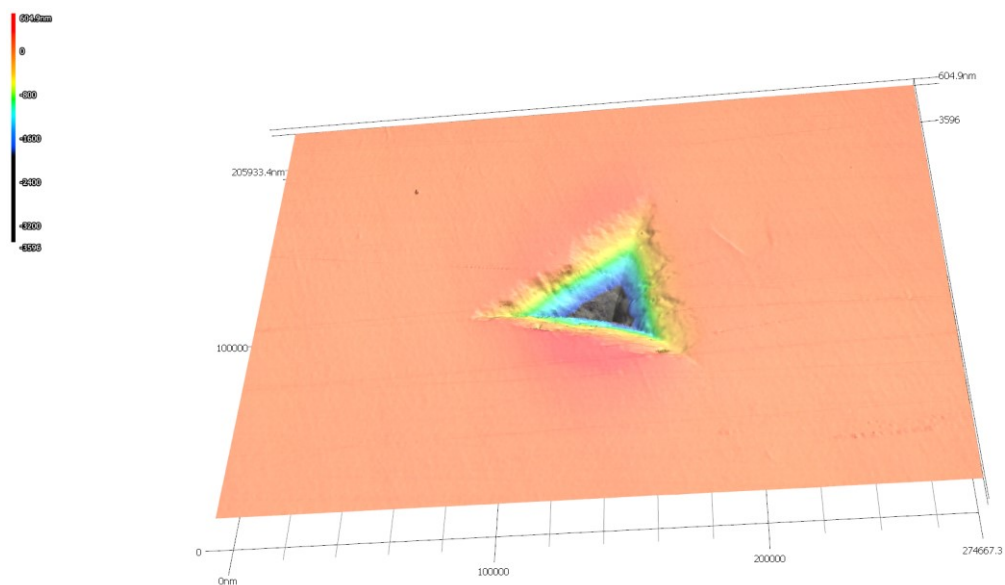
Vyhodnocené grafy závislosti tvrdosti na maximální hloubce nám vycházely podle očekávání. Ačkoliv jsme během jednotlivých zkoušek naměřili různou hodnotu vniku indentoru na výslednou vnikovou tvrdost to nemělo patrný vliv, protože materiál vykazoval stejnou tvrdost ve všech hloubkách. Rozdílné naměřené hloubky vniku indentoru jsme naměřili, protože jsme při jednotlivých testech změnili maximální zatěžovací sílu. Pouze u grafu na obrázku (Obr. 21), kde křivka trendu neladí s naměřenými hodnotami. Toto Rozhození trendové křivky bylo způsobeno špatným naměřením vzorku číslo 3 a jeho

hodnota nám tento trend takto výrazně ovlivnila. Po vynechání tohoto vzorku a vynesení do grafu zbývající vzorky nám naměřené výsledky a spojnice trendu vycházejí výrazně lépe. (Obr. 27). Chybu naměřených hodnot u vzorku číslo 3 mohlo způsobit to, že výrobek nebyl v dokonalé rovině a po načtení nulové indentační hladiny se provedlo měření celého souboru dat.



Obrázek 28 Graf závislosti tvrdosti na naměřené hloubce pro maximální zatížení 100mN po odebrání vzorku č. 3

U grafů porovnávacích vliv procesních parametrů na vtiskovou tvrdost se dá nanejvýše odvodit, že při teplotách taveniny 200 °C jsme měli vzorky s vyšší vtiskovou tvrdostí. Ostatní parametry se z těchto výsledků nedají odvodit. Tento vliv můžeme vidět i na grafech porovnávacích maximální hloubku průniku a jednotlivé vstřikovací teploty. Výrobky se vstřikovací teplotou 200 °C měly nižší hodnoty maximálního průniku indentoru než výrobky vyráběné s jinými parametry. Se snižující se hodnotou  $h_{max}$  se zvyšuje tvrdost daného materiálu.



Obrázek 29 Vnik zanechaný v materiálu po nanoindentační zkoušce



## ZÁVĚR

Tato práce se zabývala ověřením vlivu procesních parametrů jako je vstřikovací rychlost, teplota taveniny a teplota formy na výslednou kvalitu výrobků. V teoretické části jsme popsali proces vstřikování a popsali vady, které mohou na výrobcích během výroby vznikat a jak těmto vadám zabránit.

V praktické části jsme se zabývali samotným ověřením vlivu procesních parametrů na výslednou drsnost povrchu a vtiskovou tvrdost materiálu.

Z dosažených výsledků získaných pomocí kontofokálního mikroskopu jsme zjistili, že nejnižší hodnoty drsnosti povrchu byly docíleny při teplotách taveniny 200 stupňů, kde se stabilně pohybovaly okolo 10.9 nm, zatímco při teplotách formy 60 °C v kombinaci s teplotou vstřikování 230 °C jsme dosahovali nejvyšších hodnot  $R_a$ .

Další výsledky nám přinesl nanoindentor a provedené nanoindentační zkoušky. Z těchto zkoušek jsme si ověřili závislost mezi maximální hloubkou vniku indentoru a vtiskovou tvrdostí zkoumaného materiálu. S rostoucí hloubkou průniku indentoru klesá výsledná vtisková tvrdost zkoumaného materiálu. Následné porovnání výsledků z indentačních testů s parametry vstřikování jsme zjistili, že výrobky vstřikované teplotou taveniny 200 °C vykazovaly vyšší vtiskovou tvrdost než při ostatních teplotách. Dále jsme zjistili, že se zvyšující se teplotou formy se zvyšoval koeficient zpětné deformace.

Elastická část deformační práce a plastická část deformační práce byla též ovlivněna vstřikovacími parametry. Výrobky, které při výrobě měly vyšší teplotu taveniny, měly následně vyšší elastickou část deformační práce a plastickou část deformační práce, naopak nižší plastickou část deformační práce měly výrobky s vyšší teplotou formy.

## 6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 8070806176. Dostupné také z: [http://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/uid\\_isbn-80-7080-617-6/anoťace/](http://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/uid_isbn-80-7080-617-6/anoťace/)
- [2] GOODSHIP, Vanessa. *Practical Guide to Injection Moulding*. 2nd Edition. Shawbury: Smithers Rapra Technology, 2017. ISBN 978-1-91024-294-0.
- [3] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. 2016 [cit. 2022-05-15]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/03.html>
- [4] BRYCE, Douglas M. *Plastic injection molding: manufacturing process fundamentals*. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, 1996. ISBN 0-87263-472-8. Dostupné také z: [https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPIMVIMP7/plastic\\_injection\\_molding\\_volume\\_i\\_manufacturing\\_process\\_fundamentals](https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPIMVIMP7/plastic_injection_molding_volume_i_manufacturing_process_fundamentals)
- [5] SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů* [online]. 2016 [cit. 2022-05-15]. ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/03.html>
- [6] Vstřikování plastů. In: *Katedra tváření kovů a plastů - Skripta* [online]. 2018 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/04.htm#041](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm#041)
- [7] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [8] KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. *Injection molding advanced troubleshooting guide*. Munich: Hanser Publishers, 2018. ISBN 978-1-56990-645-3.
- [9] GOODSHIP, Vanessa. *Troubleshooting Injection Moulding*. Shawbury: iSmithers Rapra Publishing, 2004. ISBN 978-1-85957-470-6.
- [10] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [11] NEUHÄUSL, Emil. Polymery amorfni a semikrystalické z hlediska vstřikování. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/polymery-amorfni-a-semikrystalicke-z-hlediska-vstrikovani>
- [12] OSSWALD, Tim A. *International plastics handbook: the resource for plastics engineers*. 4th ed. Munich: Hanser Publishers, 2006. ISBN 978-1-56990-399-5.
- [13] Polypropylén (PP). In: *MatNet* [online]. 2006 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=201>
- [14] PP MOSTEN® TB 002. In: *Unipetrol* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: [https://www.unipetrol.cz/cs/NabidkaProduktu/PetrochemickeProdukty/Polyolefiny/Technical%20datasheet/Technical%20datasheet%20Mosten\\_TB%20002\\_cz.pdf](https://www.unipetrol.cz/cs/NabidkaProduktu/PetrochemickeProdukty/Polyolefiny/Technical%20datasheet/Technical%20datasheet%20Mosten_TB%20002_cz.pdf)
- [15] Preview of Plastpol in Kielce. In: *Bulletin ARBURG* [online]. 2014 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.arburg.com/cs/cz/cast-pro-novinare/tiskova-zpravy/bulletin/nl/5121/>
- [16] ALLROUNDER 470C GOLDEN EDITION. In: *ARBURG* [online]. 2020 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: [https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische\\_Daten/ARBURG\\_ALLROUNDER\\_470C\\_GOLDEN\\_EDITION\\_TD\\_523679\\_en\\_GB.pdf](https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische_Daten/ARBURG_ALLROUNDER_470C_GOLDEN_EDITION_TD_523679_en_GB.pdf)

- [17] KUHN, Howard a Dana MEDLIN, ed. *ASM handbook*. Volume 8, Mechanical testing and evaluation. Materials Park: ASM International, 2000, . ISBN 0871703890.
- [18] FISCHER-CRIPPS, Anthony C. *Introduction to contact mechanics*. Second edition. New York: Springer, 2007. ISBN 978-1-4419-4326-2.
- [19] Software Manual: Indentation. In: *Processes and Engineering in Mechanics and Materials* [online]. 2017 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: [https://pimm.artsetmetiers.fr/sites/pimm/files/2020-05/Software%20Manual\\_MHT.pdf](https://pimm.artsetmetiers.fr/sites/pimm/files/2020-05/Software%20Manual_MHT.pdf)
- [20] FISCHER-CRIPPS, Anthony C. *Nanoindentation*. Third edition. New York: Springer, 2011. ISBN 978-1-4419-9871-2.
- [21] THOMAS, Tom R. *Rough Surfaces*. 2. vyd. Londýn: Imperial College Press, 1999. ISBN 1-86094-100-1.
- [22] WHITEHOUSE, D. J. *Handbook of surface and nanometrology*. Second edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. ISBN 9781420082012.
- [23] ČSN EN ISO 4287: *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [24] TSUI, Ting a Alex A VOLINSKY. *Small Scale Deformation Using Advanced Nanoindentation Techniques*. Basel: Micromachines Editorial Office, 2019. ISBN 978-3-03897-966-1.
- [25] KUBANOVÁ, Jana. *Statistické metody pro ekonomickou a technickou praxi*. 2. vyd. Bratislava: Statis, 2004. ISBN 80-85659-37-9.
- [26] POLÁKOVÁ, Radka. *STATISTICKÁ ANALÝZA DAT PRO KVANTITATIVNÍ VÝZKUM*. Ostrava: Ostravská univerzita, 2019. ISBN 978-80-7599-168-3.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$F_p$	Přisouvací síla vstřikovacího stroje
$F_u$	Uzavírací síla vstřikovacího stroje
$t_v$	Čas plnění formy
$t_D$	Čas dotlaku
PP	Polypropylen
$H_{IT}$	Vtisková tvrdost
$A_p$	Průmět kontaktní plochy
$F_{max}$	Maximální síla zatížení
$E_r$	Redukovaný modul
$E_i$	Elastický modul indentoru
$\nu_i$	Poissonova konstanta indentoru
$E_{IT}$	Indentační modul
$\nu_s$	Poissonova konstanta vzorku
$C_{IT}$	Vtiskové tečení
$W_{elast}$	Elastická část deformační práce
$W_{plast}$	Plastická část deformační práce
$\eta_{IT}$	Koeficient zpětné deformace
$h_{max}$	Maximální indentační hloubka

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1 Vstřikovací stroj [3] .....	11
Obrázek 2 Vstřikovací jednotka [5].....	13
Obrázek 3 Schéma uzavírací jednotky [6].....	13
Obrázek 4 Průběh vstřikovacího cyklu [3] .....	14
Obrázek 5 Vstřikovací stroj Allrounder 470 C Golden [15] .....	31
Obrázek 6 Model univerzální vložky.....	32
Obrázek 7 Model zkušebního tělesa .....	33
Obrázek 8 Vykreslení typické indentační křivky [19].....	35
Obrázek 9 Znázornění kontaktu indentoru s materiálem [19] .....	36
Obrázek 10 Tvary jednotlivých indentorů [18] .....	37
Obrázek 11 Efekt pile-up a sink-in při stejné hloubce průniku. [20] .....	39
Obrázek 12 Princip získání profilu pro měření drsnosti [23] .....	40
Obrázek 13 Vtiskové tečení [19] .....	41
Obrázek 14 Plastická a elastická část práce [19] .....	42
Obrázek 15 Snímek z mikroskopu.....	55
Obrázek 16 Graf porovnávající drsnost povrchu jednotlivých vzorků a jejich vstřikovací rychlosti .....	56
Obrázek 17 Graf porovnávající drsnost povrchu jednotlivých vzorků a teploty taveniny během vstřikování.....	56
Obrázek 18 Graf porovnávající drsnost povrchu jednotlivých vzorků a teploty formy během vstřikování .....	57
Obrázek 19 Graf závislosti tvrdosti na naměřené hloubce pro maximální zatížení 500mN	58
Obrázek 20 Graf závislosti tvrdosti na naměřené hloubce pro maximální zatížení 300mN	58
Obrázek 21 Graf závislosti tvrdosti na naměřené hloubce pro maximální zatížení 100mN	59
Obrázek 22 Graf závislosti tvrdosti na naměřené hloubce pro maximální zatížení 50mN	59
Obrázek 23 Graf závislosti tvrdosti na naměřené hloubce pro všechna zatížení.....	60
Obrázek 24 Graf porovnávající vtiskovou tvrdost při různých rychlosti vstřikování .....	60
Obrázek 25 Graf porovnávající vtiskovou tvrdost při různých teplotách taveniny během vstřikování .....	61
Obrázek 26 Graf porovnávající vtiskovou tvrdost při různých teplotách formy během vstřikování .....	61
Obrázek 27 Graf porovnávající $h_{max}$ při různých teplotách vstřikování.....	62
Obrázek 28 Graf závislosti tvrdosti na naměřené hloubce pro maximální zatížení 100mN po odebrání vzorku č. 3.....	63
Obrázek 29 Vnik zanechaný v materiálu po nanoindentační zkoušce.....	64

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Požadované teploty pro vybrané plasty [3] .....	16
Tabulka 2 Materiálové vlastnosti Mosten TB 002 [14].....	30
Tabulka 3 Podmínky pro zpracování [14] .....	31
Tabulka 4 Technické údaje vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 470C 1500–400 GE [16].....	31
Tabulka 5 Parametry vstřikování jednotlivých těles.....	34
Tabulka 6 Statistické vyhodnocení vtiskové tvrdosti u zatížení 500mN.....	43
Tabulka 7 Statistické vyhodnocení indentačního modulu při zatížení 500mN .....	44
Tabulka 8 Statistické vyhodnocení vtiskového tečení při zatížení 500mN .....	45
Tabulka 9 Statistické vyhodnocení práce při elastické deformaci u zatížení 500mN .....	46
Tabulka 10 Statistické vyhodnocení práce při plastické deformaci u zatížení 500mN .....	47
Tabulka 11 Statistické vyhodnocení koeficientu zpětné deformace při zatížení 500mN....	48
Tabulka 12 Statistické vyhodnocení maximální hloubky při zatížení 500mN.....	49
Tabulka 13 Vyhodnocená data pro maximální zatížení 500mN.....	51
Tabulka 14 Vyhodnocená data pro maximální zatížení 300mN.....	52
Tabulka 15 Vyhodnocená data pro maximální zatížení 100mN.....	53
Tabulka 16 Vyhodnocená data pro maximální zatížení 50mN.....	54
Tabulka 17 Naměřené hodnoty drsnosti $R_a$ u jednotlivých vzorků .....	55

## SEZNAM PŘÍLOH