



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Ing. Jiří Čop

Výzkum vlivu technologických podmínek na jakost plastikářského nástroje a polymerních výrobků

The influence of technological conditions on the surface quality of tool and polymer products

Disertační práce

Obor: 3909V013 Nástroje a procesy

Školitel: doc. Dr. Ing. Vladimír Pata

Zlín: 2016

Motto:

„Úspěch není cíl, je to jen cesta, je to jen směr, kterým jdete.“

Zig Ziglar

Poděkování:

Touto cestou bych velmi rád poděkoval svému vedoucímu dizertační práce a zároveň odbornému konzultantovi v oblasti statistiky a metrologie panu doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za jeho čas, cenné připomínky, ale také osobní a vstřícný přístup. Dále bych chtěl rovněž poděkovat svému konzultantovi za cenné připomínky, rady během studia a předání svých životních zkušeností panu Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D. Také bych chtěl v této části vzpomenout a vzdát velké holt svému dřívějšímu zesnulému školiteli panu prof. Ing. Imrichu Lukovicsovi, CSc., jenž mě přivedl k myšlence realizovat tuto dizertační práci, zasvětil mne do oblasti psaní odborných článků, fungování a průběhu mezinárodních konferencí, seznámil s mnoha kolegy ze stejného odvětví, ale také k jeho osobnímu přístupu, který mne v době mého studia významně ovlivnil. Za proces výroby zkušebních vzorků a vstřícný přístup při realizaci experimentu bych rád poděkoval technikům Ing. Jiřímu Šálkovi a Ing. Františku Vavříkovi. Dále bych chtěl poděkovat všem svým kolegům, doktorům či doktorandům z ústavu výrobního inženýrství, kteří se určitou mírou podíleli na dokončení této dizertační práce. Z nich bych rád vzpomněl a poděkoval zejména Ing. Ladislavu Fojtlovi, jenž mi vnukl myšlenku vydat se na tuto leckdy strastiplnou cestu doktorským studiem. Jeho životní zkušenosti, rady a zejména přátelský přístup mi v mnoha směrech velmi pomohly.

Velké díky bych pak v neposlední řadě směřoval celé své rodině a všem blízkým, kteří mě po celou dobu studia podporovali a byli mi vždy a ve všech situacích oporou, dodávající mi sílu, odhodlání a energii tuto práci a studium dokončit.

Tato dizertační práce byla spolufinancována z projektu Interní Grantové Agentury Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně číslo IGA/FT/2016/002.

ABSTRAKT

Ve výrobě plastikářských náradí jsou vzhledem k vysoké ceně forem kladeny vysoké nároky na snížení nákladů či zkracování výrobních časů produkce formy. Cena vstřikovací formy se promítá nejen v ceně použitého materiálu vstřikovací formy, ale také v ceně její samotné výroby.

Velmi přesné dokončovací operace, jako jsou lapování a leštění, se staly nedílnou součástí při výrobě tvarových dutin, dosedacích ploch, vtokových systémů a jiných systémů vstřikovací formy. Právě tyto ekonomicky náročné dokončovací operace ovšem mohou při výrobě vstřikovací formy zaujímat i více než polovinu celkového výrobního času, což se významně promítá do její ceny. Tvarové dutiny forem jsou v praxi z převážné většiny lapovány a následně leštěny z důvodu získání vysoké kvality povrchu polymerních výrobků, ať již pohledu estetického (vysoký lesk) či z pohledu drsnosti povrchu. U některých polymerních materiálů ovšem není možné vysokých lesků či kvalitních povrchu dosáhnout a navíc se na trhu prodeje plastových výrobků objevují i takové, u kterých je dosažení vysoké kvality povrchu nepotřebné neboť jejich plocha neplní žádnou funkci. Je tedy velmi důležité zvážit přínos drahých dokončovacích operací, které nejen že zdražují vstřikovací formu, ale také cenu samotného polymerního výrobku.

Tato dizertační práce se zabývá nejen problematikou vhodnosti použití dokončovacích operací při výrobě tvarových dutin, ale je také rozšířena o řadu vlivů, které mohou v konečném důsledku silně či méně ovlivnit cenu či strukturu povrchu polymerních výrobků. Velmi důležitým parametrem při vstřikování je správné nastavení technologických podmínek vstřikovacího stroje. Špatná volba těchto podmínek může vést nejen k produkci výrobků se špatnými rozměry, ale také ke snížení mechanických vlastností či kvality jakosti povrchu. Kromě technologických podmínek kvalitu výrobků může ovlivňovat také vhodná volba polymerních materiálů, jejich viskozita, typ či velikost krystalické fáze. V neposlední řadě má vliv na cenu formy a vlastnosti výrobků i volba nástrojových materiálů vstřikovací formy respektive tvarové dutiny. Odlišné materiály tvarové dutiny představují pro vstřikované výrobky zejména rozdíl v rychlosti chladnutí polymerní taveniny, neboť tyto se velmi liší tepelnou vodivostí.

Hlavním záměrem této dizertační práce se tedy zabývá určením míry vlivu technologických podmínek (vstřikovací tlak, rychlost a dotlak), indexu toku taveniny (viskozita polymerní taveniny), nadmolekulární struktury (amorfní, semikrystalické) a v neposlední řadě materiálu tvarové dutiny na drsnost povrchu Ra a Rz polymerních výrobků.

Klíčová slova: Polymery, vstřikování, dokončovací operace, drsnost povrchu

ABSTRACT

Price of the injection mould is reflected in the cost of tool material as well as cost of its own production. Therefore, shortage of production cost and production time of injection mould is highly demanded.

Very precise finishing operations like lapping or polishing have become an important part of the production of cavities, bearing surface, runner systems and other systems of injection mold. However, these finishing operations can take more than half of total production time in the manufacturing of injection mould, and that is significantly reflected into the price of it. In practice, the cavities are very often lapped and subsequently polished to obtain high surface quality of injection polymer parts in terms of aesthetic view (high shine) or surface roughness. Nevertheless, in case of some processed polymer materials, the high surface quality and shine of polymer product is impossible to be achieved. Moreover, on the world market a lot of injected polymer products do not have to reach the highest surface quality, because their surface does not perform any function. Therefore, it is very important to consider the benefits of expensive finishing operations, which increase not only the cost of injection molds but also the cost of products.

This dissertation thesis is focused not only on appropriate use of finishing operations in production of cavities but also on number of influences which can strongly affect the surface structure of injected polymer parts and its cost as well. Proper setting of injection molding technological conditions is highly important. Inappropriate choice of these conditions can lead to production of dimensionally inconvenient polymer parts, to insufficient mechanical resistance or decrease of surface quality of the products. Except the above mentioned properties, mould parts can be also affected by choice of polymer materials and their properties like viscosity or the size of crystalline phase. Last but not least, the inconsiderable impact on the price of mould and properties of product has the proper choice of tool materials especially for cavities. Different tool materials of cavities represents for injected products various cooling rate of polymer melt, because of their diverse thermal conductivity.

Therefore, the main aim of this thesis is to determine the degree of influence of technological conditions (injection pressure, holding pressure and injection speed), melt flow rate of polymer (viscosity of the polymer melt), supramolecular structure of polymer (amorphous and semicrystalline) and finally the material of cavities on the surface roughness parameter R_a and R_z of the injection molded parts.

Keywords: Polymers, injection molding, finishing operations, surface roughness

OBSAH PRÁCE

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	13
SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	15
1 INTEGRITA POVRCHU	16
1.1 SLOŽKY INTEGRITY POVRCHU	16
1.2 JAKOST POVRCHU.....	17
1.3 DRSNOST POVRCHU.....	17
1.4 ZPŮSOBY MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU.....	19
2 DOKONČOVACÍ OPERACE.....	21
2.1 ABRASIVNÍ DOKONČOVACÍ METODY	21
3 VSTŘIKOVÁNÍ.....	24
3.1 TECHNOLOGICKÉ PODMÍNKY VSTŘIKOVÁNÍ	25
3.2 MATERIÁLY VSTŘIKOVACÍCH FOREM.....	26
3.2.1 Oceli vhodných jakostí	27
3.2.1 Neželezné slitiny kovů.....	29
4 POLYMERNÍ MATERIÁLY.....	30
4.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	30
4.2 NADMOLEKULÁRNÍ STRUKTURA	34
4.2.1 Amorfni termoplasty.....	35
4.2.1 Semikrystalické termoplasty.....	35
4.3 ZÁKLADY REOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	36
5 CÍL PRÁCE.....	39
6 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	40
6.1 HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU	40
6.2 HODNOCENÍ KRYSTALICKÉHO PODÍLU.....	42
6.3 VÝROBA A MATERIÁL TVAROVÝCH DUTIN	43
6.3.1 Ocel ČSN 19552.4 (EN 1.2343).....	45
6.3.2 Dural ČSN 424222 (EN AW-7075)	46
6.3.3 Měď ČSN 423001 (EN CW004A)	47
6.4 VSTŘIKOVANÉ POLYMERNÍ MATERIÁLY	47
6.4.1 ABS Magnum	47
6.4.2 PP – Syntegum 1020 AFV/HFML	48
6.4.3 PA 66 – Technyl A205F.....	49
6.4.4 PMMA – Plexiglas 8N.....	49
6.4.5 PC – Calibre 303EP-22.....	50

6.5	TECHNOLOGICKÉ PODMÍNKY VSTŘIKOVÁNÍ	51
6.5.1	Vliv technologických podmínek.....	52
6.5.2	Vliv indexu toku taveniny	54
6.5.3	Vliv materiálu tvarové dutiny a nadmolekulární struktury	55
7	HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	56
7.1	VLIV TECHNOLOGICKÝCH PODMÍNEK NA JAKOST PLASTIKÁŘSKÉHO NÁSTROJE.....	56
7.1.1	Ocel ČSN 19552.4 (EN 1.2343).....	56
7.1.2	Dural ČSN 424222 (EN AW-7075)	59
7.1.3	Měď ČSN 423001 (EN CW004A)	62
7.2	VLIV JAKOSTI POVRCHU TVAROVÉ DUTINY NA JAKOST POVRCHU POLYMERNÍHO VÝROBKU	64
7.2.1	Test normality	64
7.2.2	2D hodnocení drsnosti povrchu	65
7.3	VLIV VSTŘIKOVACÍHO TLAKU NA JAKOST POVRCHU POLYMERNÍHO VÝROBKU	70
7.3.1	Test normality	70
7.3.2	2D hodnocení drsnosti povrchu	71
7.3.3	3D hodnocení drsnosti povrchu	74
7.4	VLIV VSTŘIKOVACÍ RYCHLOSTI NA JAKOST POVRCHU POLYMERNÍHO VÝROBKU	76
7.4.1	Test normality	76
7.4.2	2D hodnocení drsnosti povrchu	77
7.4.3	3D hodnocení drsnosti povrchu	80
7.5	VLIV DOTLAKU NA JAKOST POVRCHU POLYMERNÍHO VÝROBKU	82
7.5.1	Test normality	82
7.5.2	2D hodnocení drsnosti povrchu	83
7.5.3	3D hodnocení drsnosti povrchu	86
7.6	VLIV INDEXU TOKU TAVENINY NA JAKOST POVRCHU POLYMERNÍCH VÝROBKŮ	87
7.6.1	Test normality	87
7.6.2	2D hodnocení drsnosti povrchu	88
7.6.3	3D hodnocení drsnosti povrchu	92
7.7	VLIV NADMOLEKULÁRNÍ STRUKTURY NA JAKOST POVRCHU POLYMERNÍCH VÝROBKŮ	93
7.7.1	Ocel ČSN 19552.4	93
7.7.2	Dural ČSN 424222	97
7.7.3	Měď ČSN 423001.....	101

7.8	VLIV MATERIÁLU TVAROVÉ DUTINY NA JAKOST POVRCHU POLYMERNÍCH VÝROBKŮ	105
7.8.1	Materiál PP	105
7.8.2	Materiál PA66.....	107
7.8.3	Materiál PC.....	110
7.8.4	Materiál PMMA.....	112
7.8.5	3D hodnocení drsnosti povrchu	114
8	PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI	116
9	ZÁVĚR.....	117
	LITERATURA	121
	SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA	126
	CV AUTORA.....	128
	SEZNAM PŘÍLOH.....	131

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.1 Šest oblastí popisujících integritu povrchu [23]</i>	16
<i>Obr. 1.2 Parametry jakosti povrchu [24]</i>	17
<i>Obr. 1.3 Profil povrchu [23]</i>	18
<i>Obr. 1.4 Parametr drsnosti Ra [50]</i>	18
<i>Obr. 1.5 Parametr drsnosti Rz [50]</i>	19
<i>Obr. 3.1 Vstřikovací cyklus [11]</i>	24
<i>Obr. 3.2 Průběh tlaku při vstřikování</i>	25
<i>Obr. 3.3 Ilustrační vstřikovací forma s pozicemi jednotlivých komponentů</i> ..	28
<i>Obr. 4.1 Základní rozdělení polymerních materiálů</i>	30
<i>Obr. 4.2 Příklady aplikací termoplastů</i>	31
<i>Obr. 4.3. Příklady aplikací reaktoplastů</i>	31
<i>Obr. 4.4 Aplikace kaučuků a TPE</i>	32
<i>Obr. 4.5 Struktura řetězců při různých teplotních změnách</i>	34
<i>Obr. 4.6 Termomechanická křivka amorfních a semikrystalických polymerů [47]</i>	34
<i>Obr. 4.7 Tokové křivky pro modelové tekutiny [49]</i>	37
<i>Obr. 4.8 Závislost viskozity na čase [49]</i>	37
<i>Obr. 4.9 Model tokové křivky</i>	38
<i>Obr. 6.1 Profiloměr Form Talysurf 50 s ukázkou software Taylor Hobson</i> ..	40
<i>Obr. 6.2 3D bezkontaktní drsnoměr a software Talysurf CLI 500</i>	41
<i>Obr. 6.3 Difraktometr X'PERT PRO a ukázka uchycení vzorku</i>	42
<i>Obr. 6.4 Vstřikovací forma</i>	43
<i>Obr. 6.5 Tvar a rozměry tvarové dutiny vstřikovací formy</i>	44
<i>Obr. 6.6 Postup výroby tvarových dutin</i>	44
<i>Obr. 6.7 Soustruh TOS S32, univerzální frézka FHV-50PD, bruska BRH 20.03F</i>	45
<i>Obr. 6.8 Vstřikovací stroj Arburg ALLROUNDER 470H [2]</i>	51
<i>Obr. 6.9 Sušička Thermolift 100-2</i>	52
<i>Obr. 7.1 Vyrobené tvarové dutiny</i>	58
<i>Obr. 7.2 Duralové tvarové dutiny</i>	61
<i>Obr. 7.3 Měděné tvarové dutiny</i>	62
<i>Obr. 7.4 Boxplotový diagram – kontrola odlehých hodnot – ABS 3453</i>	64
<i>Obr. 7.5 Test normality Anderson-Darling pro ABS 3453</i>	65
<i>Obr. 7.6 Dendrogram vlivu jakosti povrchu tvarové dutiny</i>	66
<i>Obr. 7.7 Test rovnosti rozptylů pro ABS 3453</i>	67
<i>Obr. 7.8 Závislost drsnosti Ra polymerních výrobků na drsnosti tvarové dutiny</i>	68
<i>Obr. 7.9 Závislost drsnosti Rz polymerních výrobků na drsnosti tvarové dutiny</i>	69
<i>Obr. 7.10 Závislost drsnosti povrchu Ra na změně vstřikovacího tlaku</i>	71
<i>Obr. 7.11 Závislost drsnosti povrchu Rz na změně vstřikovacího tlaku</i>	72
<i>Obr. 7.12 Dendrogramy vlivu vstřikovacího tlaku</i>	73

<i>Obr. 7.13 3D profil povrchu při vstřikovacím tlaku 30 a 60 MPa</i>	75
<i>Obr. 7.14 2D řez v ose X 3D profilu povrchu při vstřikovacím tlaku 30MPa</i>	75
<i>Obr. 7.15 2D řez v ose X 3D profilu povrchu při vstřikovacím tlaku 60MPa</i>	75
<i>Obr. 7.16 Závislost drsnosti povrchu Ra na změně vstřikovací rychlosti</i>	77
<i>Obr. 7.17 Závislost drsnosti povrchu Rz na změně vstřikovací rychlosti</i>	78
<i>Obr. 7.18 Dendrogramy drsností Ra polymerních vzorků pro odlišné vstřikovací rychlosti</i>	79
<i>Obr. 7.19 3D profil povrchu při vstřikovacím rychlosti 20 a 120 mm/s</i>	80
<i>Obr. 7.20 2D řez v ose X 3D profilu povrchu při vstřikovací rychlosti 20 mm/s</i>	81
<i>Obr. 7.21 2D řez v ose X 3D profilu povrchu při vstřikovací rychlosti 120 mm/s</i>	81
<i>Obr. 7.22 Závislost drsnosti povrchu Ra na změně dotlaku</i>	83
<i>Obr. 7.23 Závislost drsnosti povrchu Rz na změně dotlaku</i>	84
<i>Obr. 7.24 Dendrogramy drsností Ra polymerních vzorků pro odlišné dotlaky</i>	85
<i>Obr. 7.25 3D profil povrchu při dotlaku 30 a 60MPa – ocelová dutina č. 2 ..</i>	86
<i>Obr. 7.26 Závislost drsnosti povrchu Ra na ITT</i>	88
<i>Obr. 7.27 Závislost drsnosti povrchu Rz na ITT</i>	89
<i>Obr. 7.28 Dendrogramy drsností Ra polymerních vzorků pro materiály s odlišným ITT</i>	90
<i>Obr. 7.29 3D profil povrchu materiálu ABS Magnum 3616 a 8391</i>	92
<i>Obr. 7.30 Závislost drsnosti povrchu Ra na nadmolekulární struktuře - ocel</i>	95
<i>Obr. 7.31 3D profil povrchu materiálu PP a PC – ocelová dutina č. 1</i>	96
<i>Obr. 7.32 Závislost drsnosti povrchu Ra na nadmolekulární struktuře - dural</i>	99
<i>Obr. 7.33 3D profil povrchu materiálu PP a PMMA – duralová dutina č. 1100</i>	
<i>Obr. 7.34 Závislost drsnosti povrchu Ra na nadmolekulární struktuře – měď</i>	103
<i>Obr. 7.35 3D profil povrchu materiálu PA66 a PC – měděná dutina č. 1 ...</i>	104
<i>Obr. 7.36 Závislost drsnosti povrchu Ra na materiálu tvarové dutiny - PP</i>	105
<i>Obr. 7.37 Dendrogram materiálu PP pro duralové tvarové dutiny</i>	107
<i>Obr. 7.38 Závislost drsnosti povrchu Ra na materiálu tvarové dutiny – PA66</i>	108
<i>Obr. 7.39 Dendrogram materiálu PA 66 pro tvarové dutiny č. 1 a 2</i>	109
<i>Obr. 7.40 Závislost drsnosti povrchu Ra na materiálu tvarové dutiny – PC</i>	110
<i>Obr. 7.41 Závislost drsnosti povrchu Ra na materiálu tvarové dutiny – PMMA</i>	112
<i>Obr. 7.42 3D profil povrchu materiálu PP Syntegum 1020 pro měď, dural a ocel</i>	114

<i>Obr. 7.43 2D řez v ose X 3D profilu povrchu PP – měděná tvarová dutina</i>	115
<i>Obr. 7.44 2D řez v ose X 3D profilu povrchu PP – duralová tvarová dutina</i>	
.....	115
<i>Obr. 7.45 2D řez v ose X 3D profilu povrchu PP – ocelová tvarová dutina</i>	115

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2.1 Směrné hodnoty řezných podmínek pro rovinné broušení [28].....</i>	22
<i>Tab. 2.2 Doporučené hodnoty řezných podmínek pro honování [28]</i>	22
<i>Tab. 2.3 Doporučené hodnoty řezných podmínek pro lapování [28]</i>	23
<i>Tab. 2.4 Doporučené hodnoty řezných podmínek pro superfinišování [28] ..</i>	23
<i>Tab. 2.5 Dosahovaná jakost povrchu jednotlivých dokončovacích operací ..</i>	23
<i>Tab. 3.1 Doporučené ocelové materiály jednotlivých dílů vstřikovací formy</i>	28
<i>Tab. 6.1 Vybrané charakteristiky 2D profiloměru Form Talysurf 50</i>	41
<i>Tab. 6.2 Základní charakteristiky drsnoměru Talysurf CLI 500</i>	42
<i>Tab. 6.3 Technické parametry rentgenového difraktometru X'PERT PRO ...</i>	43
<i>Tab. 6.4 Vlastnosti oceli ČSN 19 552.4 [41]</i>	46
<i>Tab. 6.5 Vlastnosti duralu ČSN 424222 [34].....</i>	46
<i>Tab. 6.6 Vlastnosti mědi ČSN 423001 [33].....</i>	47
<i>Tab. 6.7 Vybrané vlastnosti použitých materiálů ABS [38][39][40]</i>	48
<i>Tab. 6.8 Naměřené hodnoty ITT materiálů ABS.....</i>	48
<i>Tab. 6.9 Vlastnosti materiálu PP SYNTEGUM 1020 [37]</i>	49
<i>Tab. 6.10 Vybrané vlastnosti PA 66 – Technyl A250F [36]</i>	49
<i>Tab. 6.11 Vybrané vlastnosti PMMA – Plexiglas 8N [21]</i>	50
<i>Tab. 6.12 Vybrané vlastnosti PC – Calibre 303EP-22 [35].....</i>	50
<i>Tab. 6.13 Základní parametry vstřikovacího stroje ALLROUNDER 470H [2].....</i>	51
<i>Tab. 6.14 Nastavení technologických podmínek – vliv technologických podmínek.....</i>	53
<i>Tab. 6.15 Nastavení technologických podmínek vstřikování – vliv ITT</i>	54
<i>Tab. 6.16 Nastavení technologických podmínek vstřikování – vliv ITT</i>	55
<i>Tab. 7.1 Technologické podmínky dokončování funkční plochy soustružením.....</i>	58
<i>Tab. 7.2 Dosažené drsnosti Ra a Rz ocelových tvarových dutin</i>	58
<i>Tab. 7.3 Test normality Anderson-Darling pro ocelové tvarové dutiny.....</i>	59
<i>Tab. 7.4 Technologické podmínky soustružení tvarových dutin z duralu.....</i>	60
<i>Tab. 7.5 Dosažené drsnosti Ra a Rz duralových tvarových dutin</i>	61
<i>Tab. 7.6 Test normality – Anderson-Darling pro duralové tvarové dutiny....</i>	61
<i>Tab. 7.7 Technologické podmínky soustružení tvarových dutin z mědi.....</i>	62
<i>Tab. 7.8 Dosažené drsnosti Ra a Rz měděných tvarových dutin</i>	63
<i>Tab. 7.9 Test normality – Anderson-Darling pro měděné tvarové dutiny.....</i>	63
<i>Tab. 7.10 Hodnoty pravděpodobnosti P (normální rozdělení) pro ABS 3453</i>	65
<i>Tab. 7.11 Kruskal-Wallisuv test pro nové nulové a alternativní hypotézy</i>	68
<i>Tab. 7.12 Hodnoty pravděpodobností P pro test normality souborů Ra a Rz polymerních vzorků – vliv vstřikovacího tlaku</i>	70
<i>Tab. 7.13 Hodnoty pravděpodobnosti P pro odlišné vstřikovací tlaky při použití tvarové dutiny č. 1 a č. 5</i>	73

<i>Tab. 7.14</i>	<i>Hodnoty pravděpodobností P pro test normality souborů Ra a Rz polymerních vzorků – vliv vstřikovací rychlosti</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 7.15</i>	<i>Hodnoty pravděpodobnosti P pro Kruskal-Wallisuv test při odlišných vstř. rychlostech.....</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 7.16</i>	<i>Hodnoty pravděpodobností P pro odlišné vstřikovací rychlosti při použití tvarové dutiny č. 1 a č. 5</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 7.17</i>	<i>Hodnoty pravděpodobností P pro test normality souborů Ra a Rz polymerních vzorků – vliv dotlaku</i>	<i>82</i>
<i>Tab. 7.18</i>	<i>Hodnoty pravděpodobností P pro odlišné dotlaky při použití tvarové dutiny č. 1 a č. 5</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 7.19</i>	<i>Hodnoty pravděpodobností P pro test normality souborů Ra a Rz polymerních vzorků – vliv ITT</i>	<i>87</i>
<i>Tab. 7.20</i>	<i>Hodnoty pravděpodobností P pro odlišné dotlaky při použití tvarové dutiny č. 1 a č. 5</i>	<i>91</i>
<i>Tab. 7.21</i>	<i>Hodnoty pravděpodobností P pro test normality souborů Ra a Rz polymerních vzorků – vliv ITT – ocel.....</i>	<i>93</i>
<i>Tab. 7.22</i>	<i>Hodnoty krystalinity PP a PA66 při použití ocelové tvarové dutiny</i>	<i>94</i>
<i>Tab. 7.23</i>	<i>Drsnost povrchu Ra pro materiály PC, PMMA, PA66 a PP - ocel</i>	<i>94</i>
<i>Tab. 7.24</i>	<i>Hodnoty pravděpodobností P pro test normality souborů Ra a Rz polymerních vzorků – vliv ITT - dural</i>	<i>97</i>
<i>Tab. 7.25</i>	<i>Hodnoty krystalinity PP a PA66 při použití duralové tvarové dutiny.....</i>	<i>98</i>
<i>Tab. 7.26</i>	<i>Drsnost povrchu Ra pro materiály PC, PMMA, PA66 a PP - dural</i>	<i>98</i>
<i>Tab. 7.27</i>	<i>Hodnoty pravděpodobností P pro test normality souborů Ra a Rz polymerních vzorků – vliv ITT - měď</i>	<i>101</i>
<i>Tab. 7.28</i>	<i>Hodnoty krystalinity PP a PA66 při použití měděné tvarové dutiny</i>	<i>102</i>
<i>Tab. 7.29</i>	<i>Drsnost povrchu Ra pro materiály PC, PMMA, PA66 a PP - měď</i>	<i>102</i>
<i>Tab. 7.30</i>	<i>Hodnoty drsností Ra polymerních vzorku PP a tvarových dutin .</i>	<i>106</i>
<i>Tab. 7.31</i>	<i>Hodnoty drsností Ra polymerních vzorku PA 66 a tvarových dutin</i>	<i>108</i>
<i>Tab. 7.32</i>	<i>Kruskal-Wallisuv test materiálu PA66 pro dutiny č. 1 a 2.....</i>	<i>109</i>
<i>Tab. 7.33</i>	<i>Hodnoty drsností Ra polymerních vzorku PC a tvarových dutin .</i>	<i>111</i>
<i>Tab. 7.34</i>	<i>Kruskal-Wallisuv test materiálu PA66 pro dutiny č. 1 a 2.....</i>	<i>111</i>
<i>Tab. 7.35</i>	<i>Hodnoty drsností Ra polymerních vzorku PMMA a tvarových dutin</i>	<i>113</i>
<i>Tab. 7.36</i>	<i>Kruskal-Wallisuv test materiálu PMMA pro dutiny č. 1 a 2</i>	<i>113</i>

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

Ra	Střední aritmetická odchylka profilu na základní délce
Rz	Součet největšího výstupku a nejnižší prohlubně na základní délce
Al	Hliník
Cu	Měď
Fe	Železo
EP	Epoxidová pryskyřice
UP	Polyesterová pryskyřice
POM	Polyoxymetylen
PE	Polyetylen
ABS	Akrilonitril butadien styren
PP	Polypropylen
PC	Polykarbonát
PMMA	Polymetyl metakrylát
PA66	Polyamid s označením 66
EDM	Elektro jiskrové obrábění
ECM	Elektro chemické obrábění
CM	Chemické obrábění
t_v	Čas vstřikování
t_d	Čas dotlaku
t_{pl}	Čas doplnění
P	Parametr vypočítaný ze základního profilu
R	Parametr vypočítaný z profilu drsnosti
W	Parametr vypočítaný z profilu vlnitosti
IT	Stupeň přesnosti
η	Viskozita
τ	Smykové napětí
v_f	Posuvová rychlost
a_p	Hloubka úběru
n	Otáčky

$\dot{\gamma}$	Časový gradient smykové deformace
K	Koeficient úměrnosti,
n	Exponent vyjadřující stupeň odklonu tokové křivky
τ_0	prahová smykové napětí
ITT	Index toku taveniny
TPE	Termoplastické elastomery
T_g	Teplota skelného přechodu
T_m	Teplota tání
T_f	Teplota tečení
D	Délka
H	Hloubka
V	Výška
μm	Mikrometr
nm	Nanometr
K	Kelvin
kg	Kilogram
S	Sekunda
C	Uhlík
Si	Křemík
Mn	Mangan
Cr	Chrom
Mo	Molybden
V	Vanad
Zn	Zinek
Mg	Magnesium
Ag	Stříbro
O	Kyslík
J	Joule
MPa	Megapaskal
λ	Tepelná vodivost
Rm	Mez pevnosti
E	Modul pružnosti v tahu

SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Polymerní materiály, jejich využití i zpracovatelské technologie se v současné době stále více rozvíjejí. Z tohoto důvodu je vyvíjen vysoký tlak na co nejnižší výrobní náklady plastikářských nástrojů při dosažení předem definované vysoké kvality polymerních výrobků. V oblasti výroby vstřikovacích forem je již spoustu let konstrukce postavena na dosažení co nejvyšší kvality všech částí vstřikovací formy, ať již se jedná o vtokové kanály, temperační kanály, dosedací plochy, tvarové dutiny či ostatní prvky vstřikovací formy. Již dříve provedené výzkumy ovšem signalizovaly lepší zatékavost taveniny ve vtokové soustavě na povrchu s horší jakostí povrchu nežli na povrchu leštěném, přičemž výrobní cena technologie leštění je jednou z nejnákladnějších položek při výrobě vtokových kanálů a tvarových dutin. Lze tedy predikovat, že použití tvarových dutin s mírně horší jakostí povrchu v porovnání s tvarovou dutinou dokončenou leštěním může přinést řadu výhod, ať již ekonomických či kvalitativních.

Důležitou součástí optimalizace technologie vstřikování je použití vhodného polymerního materiálu či vhodnost použití nástrojového materiálu tvarové dutiny. Právě materiál vstřikovací formy může ovlivnit nejen časy cyklu vstřikování, ale svou cenou a snadnou obrobiteľností také výrobní časy při produkci samotné vstřikovací formy, která se odráží v ceně budoucího polymerního výrobku. Stejně tak typ polymerního materiálu, jehož reologické vlastnosti a nadmolekulární struktura ovlivňuje nejen mechanické vlastnosti výrobku, ale mohou také silně ovlivňovat vzhled výrobku a zejména jeho jakost povrchu. Tyto estetické a jakostní vlastnosti polymerních výrobků jsou jednou z nejdůležitějších podmínek pro výrobce plastových výrobků. Ne vždy ovšem vhodně esteticky vypadající vzorek dosahuje i požadované drsnosti povrchu, které ovlivňuje nejen jakostní vlastnosti výrobků, ale také životnost výrobku.

V neposlední řadě je drsnost povrchu velmi závislá na správném nastavení vstřikovacích podmínek, doby chlazení, dotlaku, vstřikovací tlaku a ostatních parametrů. Každý špatně nastavený parametr může vést k výrobě vzorků s odlišnými vlastnostmi a to nejen mechanickými ale také jakostními. Naopak správně nastavené technologické podmínky mohou snížit drsnost povrchu na požadovanou kvalitu, která zaručuje dostatečně velkou nosnou plochu již v nízké úrovni profilu povrchu a zvyšuje tak životnost polymerních výrobků.

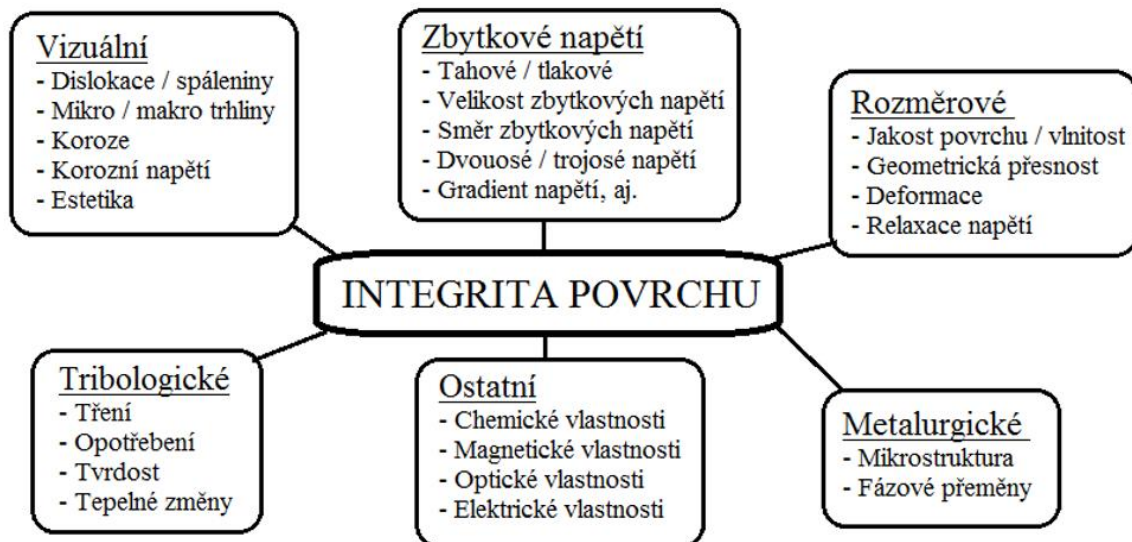
Vhodnou optimalizací řady faktorů zasahujících do výroby vstřikovaných polymerních výrobků tak může vést nejen ke zvýšení životnosti, ale také k dosažení požadovaného povrchu při co nejnižších nákladech.

1 INTEGRITA POVRCHU

Existuje široká škála možností obrábění, ať již nástroji s definovanou geometrií (soustružení, frézování apod.) či nástroji s obtížně definovatelnou a nedefinovatelnou geometrií břitu. Způsob výroby a zvolené technologické podmínky silně ovlivňují mechanismus vzniku nového povrchu součásti. Integrita povrchu je výsledkem zvolených technologických podmínek u odlišných způsobů obrábění, které se promítají nejen na jakosti povrchu obrobene plochy, ale rovněž na funkčních vlastnostech obrobene plochy. Integrita povrchu nám tedy udává vzájemný vztah mezi geometrickými a fyzikálními vlastnostmi povrchu. Jednotlivé vlastnosti předurčují životnost, ale také schopnost plnit požadovanou funkci výrobku. Tyto vlastnosti integrity povrchu jsou hodnoceny pomocí řady složek, které popisují a hodnotí vlastnosti a kvalitu obrobene plochy. [1][13][15][22][31]

1.1 Složky integrity povrchu

V současné době neexistuje způsob jak komplexním způsobem zhodnotit celkovou integritu povrchu. Řada údajů o integritě povrchu je již v dnešní době bez velkých problémů měřitelná, existují ovšem stále i takové, které jsou těžce či snad stále nemožně měřitelné. Integrita povrchu může být zjednodušeně rozdělena do dvou částí. První část popisující jakost a kvalitu povrchu se nazývá vnější stav povrchu. Druhá část naopak popisuje metalografii, tvrdost, zbytkové napětí atd. a nazývá se vnitřním stavem povrchu. Pro co nejkompaktnější popis stavu povrchové vrstvy byla integrita povrchu rozdělena do šesti oblastí (Obr. 1.1). [3][18][43]

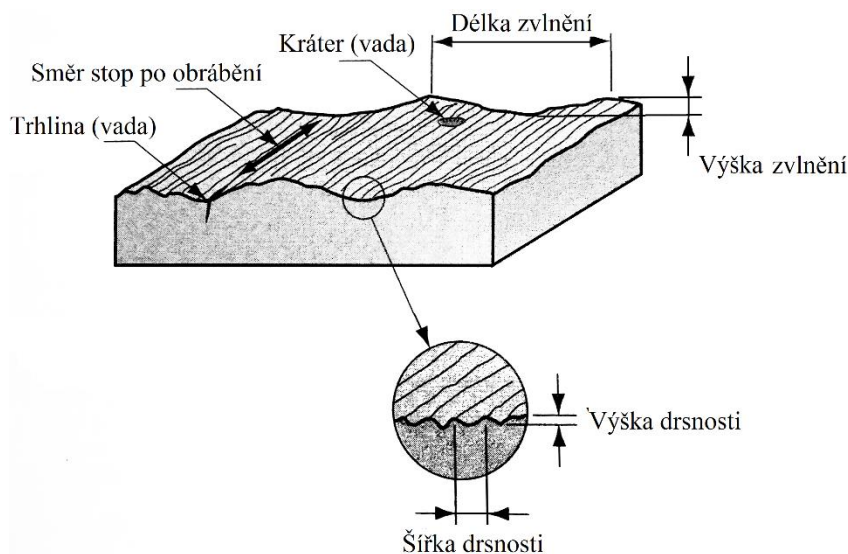


Obr. 1.1 Šest oblastí popisujících integritu povrchu [23]

Všechny tyto oblasti se podílí na konečném stavu povrchu a mají na ně přímý vliv zvolené dokončovací operace a nastavené technologické podmínky. Pro zdokonalení dokončovacích operací je potřeba určení vzájemných vztahů mezi mechanickými, chemickými, tepelnými aspekty a těmito šesti skupinami popisujícími integritu povrchu. Jedním z nejdůležitějších parametrů ovlivňující kvalitu povrchu, provozní vlastnosti povrchu, ale rovněž i spolehlivost a životnost výrobku popisuje jakost povrchu. [13][15]

1.2 Jakost povrchu

Jakost povrchu je složená z náhodných nebo opakujících se odchylek v porovnání s ideálně rovnou plochou, kterou nelze nikdy dosáhnout. Je charakterizována čtyřmi základními parametry: drsností, zvlněním, směrem stop po obrábění a vadami vznikajícími na povrchu (Obr. 1.2). [1][5][26]



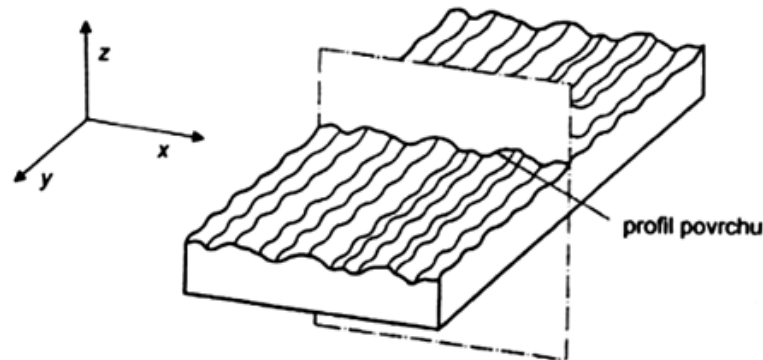
Obr. 1.2 Parametry jakosti povrchu [24]

Vlnitostí povrchu rozumíme součet periodických i neperiodických výstupků a prohlubenin. Při obrábění je tvorba vln nejvíce ovlivněna pracovními pohyby obrobku, kmitáním nástroje, tvarovou odchylkou nástroje, nepřesným upnutím obrobku a mnoha dalšími technologickými vlivy, které ovšem u většiny obráběcích technologií nelze zcela eliminovat. [1][4][17]

1.3 Drsnost povrchu

Tato veličina značí širokou škálu nerovností na povrchu vznikající po libovolné technologické operaci. Problém hodnocení nerovnosti povrchu je obvykle řešen redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu.

V této rovině je získán profil (Obr. 1.3), který je základním zdrojem informací pro posuzování drsnosti povrchu. [14][24][44]



Obr. 1.3 Profil povrchu [23]

Norma ČSN EN ISO 4287 definuje následující geometrické parametry drsnosti:

R – parametr vypočítaný z profilu drsnosti

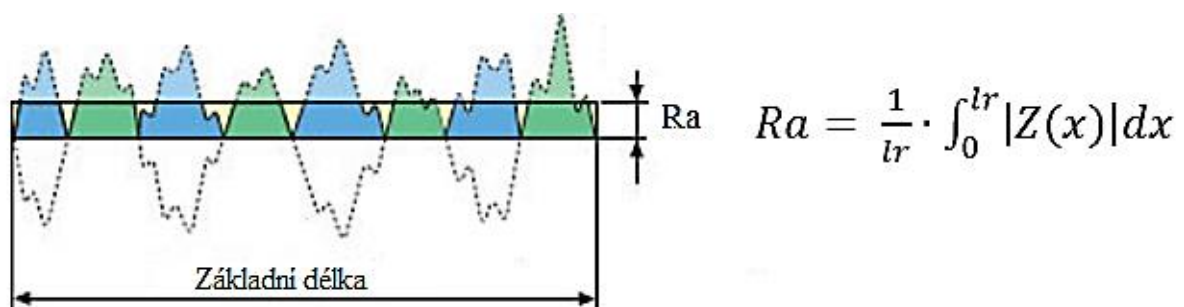
W – parametr vypočítaný z profilu vlnitosti

P – parametr vypočítaný ze základního profilu

Mezi nejpoužívanější a nejznámější parametry vypočítané z profilu drsnosti patří mimo jiné R_a a R_z . [16][19][25]

Parametr drsnosti R_a

Tento parametr je nazýván jako střední aritmetická úchylka profilu v rozsahu základní délky. Je zřejmě nejuniverzálnější a také jeden z nejpoužívanějších parametrů pro hodnocení kvality povrchu, z důvodu jeho snadného definování, měření a dobré vypovídací hodnotě o stavu povrchu. [45]

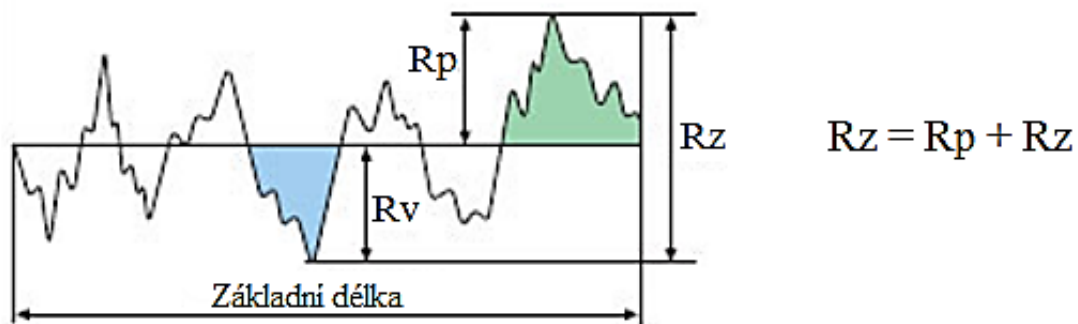


Obr. 1.4 Parametr drsnosti R_a [50]

Největší nevýhodou tohoto parametru je jeho náchylnost na vychýlené hodnoty. Z důvodu výpočtu parametru pomocí aritmetického průměru, parametr R_a velké prohlubně či výstupky pouze zprůměruje a nepodá informace o jejich velikosti. Lepší vypovídací schopnost o těchto nežádoucích odchylkách na profilu má parametr R_z . [22]

Parametr drsnosti R_z

Parametr R_z vyjadřuje součet výšky nejvyššího výstupku profilu R_p a nejnižší prohlubně R_v profilu drsnosti v rozsahu základní délky. [22]



Obr. 1.5 Parametr drsnosti R_z [50]

1.4 Způsoby měření drsnosti povrchu

Existuje široká škála metod pro praktické zjišťování hodnot parametrů drsnosti povrchu, z nichž zřejmě nejpožívanější se jeví metody dotyková a bezdotyková.

Metoda dotyková

Tato metoda využívá ostrého hrotu, jehož zaoblení se liší podle materiálu měřeného produktu, který se posouvá ve zvoleném směru po povrchu součásti, čímž snímá informace o jeho profilu. Touto metodou lze snímat normalizované i ne-normalizované parametry drsnosti povrchu a u moderních přístrojů lze tuto metodu využít také ke statistickému a spektrálnímu hodnocení jakosti povrchu. Realizace metody zabezpečuje dotykový profilometr, který se skládá z mechanické a elektronické části. Mechanický signál, generovaný snímacím hrotem sledujícím nerovnosti povrchu měřené plochy, je v indukčnostním převodníku transformován na signál elektrický, který je dále zpracováván a interpretován jako číselná hodnota zvolené charakteristiky drsnosti povrchu, případně jako grafický záznam profilu nerovností daného povrchu.

Snímání profilu měřeného povrchu může být provedeno jako snímání:

- **Absolutní** – měřicí základnou je velmi přesná přímá nebo tvarová dráha snímače (přednostně, viz ČSN EN ISO 4287,4288)
- **Relativní** – měřicí základnou je dráha generovaná kluznou patkou snímače klouzající po měřeném povrchu.

Snímací systém svými vlastnostmi ovlivňuje získaný profil. Kritické jsou zejména:

- Poloměr zaoblení snímacího hrotu
- Vrcholový úhel snímacího hrotu
- Měřicí (přítlačná) síla
- Rychlost změny měřicí síly [14]

Metoda bezdotyková

Bezkontaktní měřicí, diagnostické a kontrolní metody se v moderní době velmi rychle rozvíjí a to zejména v posledních dvou desetiletích. Tento fakt je způsoben především z důvodu stále se zvyšujících požadavků kladených na kvalitu při výrobě a intenzivního vývoje moderních prvků a systémů v oblasti mikro či nanotechnologie a elektroniky. Tyto metody se s velkou výhodou využívají nejen ve vědě, ale také v průmyslové či stavební oblasti, zejména z důvodu rychlé bezdotykové kontroly jakosti výrobku či pro odhalování vnitřních vad jak v procesu výroby, tak i v samotném provozu. Tímto jsou tedy rozvíjeny i metody a problematika výrobní kontroly a defektoskopie. V budoucnosti lze v tomto odvětví očekávat další rozvoj a mnohé pokroky

V dnešní době se mezi nejpoužívanější bezkontaktní metody hodnocení povrchu řadí:

- **Optická interferometrie** (dvousvazkové či vícesvazkové, pomocí monochromatického nebo polychromatického optického záření)
- **Mikroskopické metody** (skenovací mikroskopie, holografická mikroskopie, skenovací optická mikroskopie blízkého pole)
- **Optické rozptylové metody** (založené na měření intenzity rozptýleného světla po odrazu na měřeném povrchu – používané zejména v praxi)
- **Elektronová mikroskopie** (SEM – Scanning Electron Microscopy, TEM – Transmission Electron Microscopy).
- **Senzory** (na bázi konfokálního principu při měření s polychromatickým zdrojem záření) [10]

2 DOKONČOVACÍ OPERACE

V dnešní době se využívá a je stále zdokonalována řada dokončovacích metod, jenž zaručují dosažení požadované kvality. Tyto technologie se do výrobního procesu zařazují z důvodu dosažení vysoké přesnosti rozměru, geometrického tvaru, ale také jakosti povrchu budoucího výrobku. [23][42]

Dokončovací operace lze dělit:

1) Dle geometrie břitu

- S definovanou geometrií břitu (jemné soustružení, jemné frézování aj.)
- S nedefinovanou geometrií břitu – abrazivní (broušení, lapování, leštění, aj.)

2) Dle úběru materiálu

- S úběrem materiálu (broušení, lapování, leštění, aj.)
- Bez úběru materiálu (válečkování, kuličkování, vyhlazování, aj.)

3) Dle způsobu obrábění

- Konvenční (broušení, lapování, leštění, aj.)
- Nekonvenční (EDM, ECM, CM, aj.) [27]

2.1 Abrasivní dokončovací metody

Abrasivní metody obrábění dosahují úběru materiálu pomocí působení velmi tvrdých zm, která mohou být při obrábění volně rozprostřené nebo pomocí pojiv spojené do pásů, hranolů či kotoučů. Mezi nejpoužívanější abrazivní metody se řadí zejména broušení, honování, superfinišování, lapování či leštění. Pro dosažení kvalitních povrchů je nutné vhodně nastavit a zvolit technologické podmínky obrábění, které se liší zejména použitou dokončovací operací či zvolenou metodou dokončování. Doporučené směrné hodnoty řezných podmínek pro jednotlivé dokončovací operace jsou vypsány v Tab. 2.1, Tab. 2.2, Tab. 2.3 a Tab. 2.4. [24][42]

Tab. 2.1 Směrné hodnoty řezných podmínek pro rovinné broušení [28]

Druh práce	Radiální posuv f_r [mm]	Axiální posuv f_a [mm]	Tangenciální rychlost posuvu stolu [m.min ⁻¹]
<u>Rovinné broušení obvodové</u>			
a) Přímočarý pohyb stolu			
- Hrubování	0,01 – 0,04	(0,4 – 0,7) b_s	8 – 30
- Broušení na čisto	0,005 – 0,01	(0,2 – 0,3) b_s	15 – 20
b) Kruhový pohyb stolu			
- Hrubování	0,005 – 0,015	(0,3 – 0,6) b_s	20 – 60
- Broušení na čisto	0,005 – 0,010	(0,2 – 0,25) b_s	40 – 60
<u>Rovinné broušení čelní</u>			
a) Přímočarý pohyb stolu			
- Hrubování	0,015 – 0,04	-	4 – 12
- Broušení na čisto	0,005 – 0,01	-	2 – 3
b) Kruhový pohyb stolu			
- Hrubování	0,015 – 0,03	-	10 – 40
- Broušení na čisto	0,005	-	10 – 40

Tab. 2.2 Doporučené hodnoty řezných podmínek pro honování [28]

Materiál	Operace	Brusivo					
		Diamant, KNB			Umělý korund, karbid křemíku		
		v_c [m.min ⁻¹]	v_f [m.min ⁻¹]	p_k [MPa]	v_c [m.min ⁻¹]	v_f [m.min ⁻¹]	p_k [MPa]
Nekalená ocel	hrubování	25 – 35	6 – 12	0,4 – 0,6	15 – 30	8 – 12	0,4 – 0,8
	dokončování	25 – 35	3 – 8	0,2 – 0,4	10 – 30	5 – 7	0,2 – 0,4
Kalená ocel	hrubování	40 – 50	5 – 8	0,8 – 1,4	20 – 40	5 – 8	1,0 – 1,5
	dokončování	40 – 55	4 – 6	0,4 – 0,8	20 – 30	4 – 7	0,6 – 1,0
Litina	hrubování	50 – 80	15 – 18	0,8 – 1,5	40 – 80	12 – 22	0,8 – 1,4
	dokončování	40 – 70	8 – 16	0,4 – 0,9	30 – 50	8 – 15	0,3 – 0,8
Bronz	dokončování				40 – 70	4 – 8	0,3 – 0,5
Tvrde povlaky	dokončování	20-25	10 - 12	0,3 – 0,4			

Kde v_c – řezná rychlost, v_f – posuvová rychlost, p_k – přítláčný tlak

Tab. 2.3 Doporučené hodnoty řezných podmínek pro lapování [28]

Typ plochy a materiál	Operace	Brusivo, zrnitost	Řezné podmínky		
			Přídavek [μm]	Tlak [MPa]	Rychlost v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]
Rovinné plochy, kalená ocel	hrubování	Al_2O_3 , 60	30 – 60	0,13 – 0,15	30 – 60
	jemné lapování	Al_2O_3 , 6220	10 – 15	0,12 – 0,15	15 – 30
	velmi jemné lapování	Al_2O_3 , 500	5 – 7	0,10 – 0,12	10 – 15
		Al_2O_3 , 1200	1 – 3	0,08 – 0,10	7 – 10
Vnější válcové plochy, bronz	hrubování	Cr_2O_3 , 36	20 – 30	0,02 – 0,03	20 – 30
	jemné lapování	Cr_2O_3 , 36	10 – 15	0,01 – 0,015	10 – 15
	velmi jemné lapování	Cr_2O_3 , 36	3 - 5	0,01 – 0,015	10 - 15

Tab. 2.4 Doporučené hodnoty řezných podmínek pro superfinišování [28]

Drsnost povrchu R_a [μm]		Přídavek [μm]	Operace	Úhel křížení stop 2α [$^\circ$]	Poměr v_w / v_k
požadovaná	výchozí				
0,16	1,6	10 – 12	hrubovací	80 – 110	0,8 – 1,2
0,08	0,8	5 – 8	hrubovací	40 – 70	1,5 – 2,5
0,04	0,4	4 – 5	jemné	20 – 40	3 – 12
0,02	0,2	2 - 3	jemné	méně než 20	12 - 28

Kde: v_w – rychlost rotace obrobku, v_k – rychlost nástroje

Vhodnost použití jednotlivých abrasivních metod je závislá na možnosti aplikování zvolené dokončovací operace, ale především také na požadované jakosti povrchu výrobku.

Tab. 2.5 Dosahovaná jakost povrchu jednotlivých dokončovacích operací

Technologie	Geometrie povrchu	R_a [μm]	IT
Broušení	Rovinné plochy, vnější rotační, kruhové plochy	0,2 – 3,2	7-9
Jemné broušení	Rovinné plochy, vnější rotační, kruhové plochy	0,2 – 0,4	5-7
Honování	Kruhové plochy (vnitřní / vnější)	0,1 – 0,4	3-5
Superfinišování	Rovinné plochy, kruhové plochy	0,05 – 0,1	2-4
Lapování	Rovinné, tvarové, kruhové plochy	0,015 – 0,05	1-3
Leštění	Různé plochy	0,005 – 0,01	1-2

3 VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování je proces, při kterém je polymer zahřát do vysoce plastického stavu a pomocí vysokého tlaku nucen k zatečení do dutiny vstřikovací formy, kde dochází k jeho ochlazení a fixování tvaru. Dutina vstřikovací formy je přímým odrazem rozměrů a tvarů budoucího polymerního výrobku.

Vstřikovací cyklus je složen z dvou oblastí. První oblast je spojena s úkony prováděnými plastikační jednotkou. Druhá oblast popisuje činnosti vstřikovací formy. [51] [52]



Obr. 3.1 Vstřikovací cyklus [11]

V první fázi vstřikování dochází k plastikaci polymerního materiálu na taveninu vlivem disipace a pomocí vnějších tepelných zón. Šnek se při tomto kroku otáčí a posouvá zpět. Tavenina se vlivem odlišných drsností šneku a pouzdra posouvá vlivem tření vpřed před trysku. Plastikace materiálu probíhá při současném chlazení předchozího výrobku, otevření vstřikovací formy a jeho vyhození. Vstřikovací formu je nutné v některých případech přichystat pro další vstřikování. Po tomto kroku dochází k uzavření formy, přičemž plastikační jednotka má již připravenou polymerní taveninu, která se může plastikovat i v průběhu přípravy formy. Častěji má ovšem plastikační jednotka dostatečné množství taveniny již dříve a proto pro ni může nastat krátká prodleva. Při uzavírání vstřikovací formy dochází současně i k příjezdu plastikační jednotky. Po všech přípravách nastává vstřikování, kdy šnek vykonává pohyb vpřed a svým čelem vstříkuje vysokou rychlostí taveninu do uzavřené formy. Pro zajištění kvalitního výrobku a zejména z důvodu smršťování polymeru následuje dotlak a doplnění, při kterých dochází k dodatečnému dotlačení materiálu do formy.

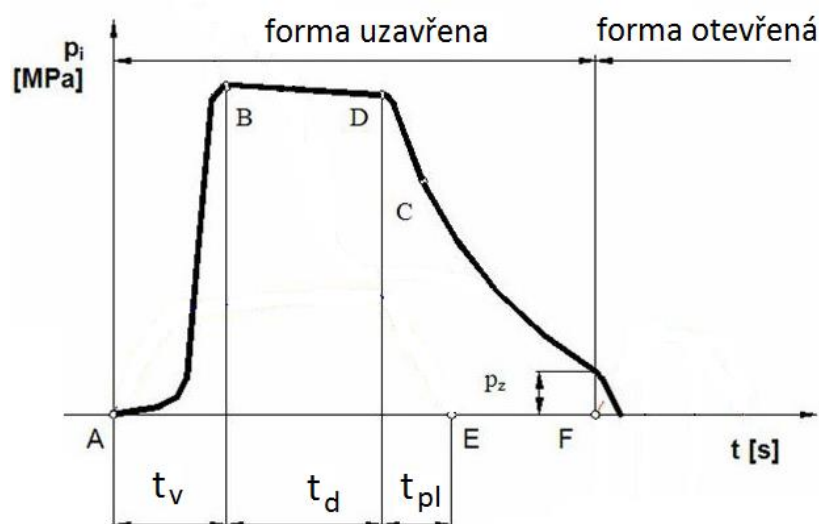
Po dokončení vstřikování a dotlaku nastává nejdélejší a zároveň jeden z nejdůležitějších kroků vstřikování a to chlazení. Při chlazení je nutné brát ohled na možné defekty, které mohou vznikat při příliš rychlém či pomalém chlazení. V tomto kroku dochází rovněž k odjezdu plastikační jednotky, která začíná plástikovat novou dávkou a proces se opakuje. Technologické podmínky jako je doba chlazení, velikost vstřikovací rychlosti, vstřikovací tlak, dotlak a jiné je nutno řešit individuálně v závislosti na použitém polymerním materiálu, ale také na konstrukci a typu vstřikovací formy a výrobku.

3.1 Technologické podmínky vstřikování

Technologické podmínky vstřikování mohou silně ovlivňovat nejen kvalitu jakosti povrchu, ale také samotné rozměry a budoucí vlastnosti výrobku. Mezi technologické podmínky, které zřejmě jako nejvíce ovlivňují výsledné vlastnosti, patří mimo jiné vstřikovací tlak, vstřikovací rychlost a dotlak při vstřikování. [11]

Vstřikovací tlak

Představuje vstřikovací sílu vztaženou na jednotku plochy vstřikovacího šneku pístu. Velikost a doba působení vstřikovací tlaku může silně ovlivnit nejen kvalitu polymerního výrobku ale rovněž jeho fyzikálně-mechanické vlastnosti. Mezi hlavní parametry, které vstřikovací tlak ovlivňuje, patří rychlost plnění, vnitřní pnutí, smrštění, orientace vláken či uzavírací síla. Z Obr. 3.2 lze vidět, že vstřikovací tlak dosahuje nejvyšší hodnoty v průběhu vstřikování. Dotlak působící po vstřikování má hodnotu stejnou nebo klesající v porovnání se vstřikovacím tlakem. [29][12]



Obr. 3.2 Průběh tlaku při vstřikování

Kde t_v – tlak vstřikovací, t_d – dotlak, t_{pl} – doplnění

Vstřikovací rychlost

Vstřikovací rychlostí se rozumí rychlost proudění taveniny do dutiny vstřikovací formy. Tato rychlost musí být taková, aby byla dutina formy naplněná a přitom nedošlo k předčasnému zchlazení taveniny. Vstřikovací rychlost je rovněž závislá na viskozitě materiálu, složitosti vstřikovaného dílce a na délce vtokové soustavy. Vysoká vstřikovací rychlost má příznivý vliv na orientaci plniv při vstřikování, ale může také způsobovat degradaci materiálu vlivem přehřátí či diesel efekt, způsobený nedostatečným časem na vytlačení vzduchu formy. Nízká vstřikovací rychlost může způsobit zejména vzhledové vady (studené spoje, pomerančová kůra povrchu apod.). [12][7]

Dotlak při vstřikování

Jedná se o pokračující a ve většině případů snížený tlak po naplnění formy. V principu plní dotlak dvě důležité funkce. Zabraňuje tavenině vytékání z formy v oblasti plastikační jednotky a zároveň doplňuje zmenšený objem taveniny způsobený poklesem teploty. Délka dotlaku je omezena dobou zatuhnutí ústí vtoků. Z hlediska procesu je však výhodné skončit s dotlakovou fází dříve, než dojde k zatuhnutí vtoku, protože jinak dochází k „přetlačení“ taveniny plastu v blízkosti vtoku a tedy k velkému pnutí v oblasti vtoku. Při nízkém dotlaku, tak může dojít k úplnému nezaplnění dutiny formy, které nemusí být v prvním momentě pozorováno (dutý díl). Vysoký dotlak může naopak způsobovat přestříky v dělicí rovině. Jedná se o fázi, která má za úkol kompenzovat zmenšování objemu (smrštění). K přepnutí na dotlak může dojít několika možnými způsoby: dle dráhy šneku, vstřikovacího času, tlaku ve formě nebo tlaku v hydraulice. Standardní a nejpoužívanější způsoby přepínání na dotlak jsou podle dráhy nebo podle vstřikovacího času. Pokud jsou vstřikovací formy vybaveny tlakovými čidly, je také možné využívat přepínání na dotlak podle tlaku ve vstřikovací formě. [12][52]

3.2 Materiály vstřikovacích forem

Vstřikovací formy a jejich výroba patří mezi velmi nákladné nástroje a operace. Formy se skládají z mnoha dílčích desek a pomocných komponentů, které zabezpečují správný chod vstřikovací formy. Již při návrhu vstřikovací formy je nutné brát v potaz nástrojový materiál, který musí zaručit požadovanou životnost vstřikovací formy a to s ohledem na celkovou cenu materiálu, která se v důsledku odráží i na ceně budoucího výrobku. Volba materiálu vstřikovací formy je kromě snahy o snížení pořizovací ceny rovněž závislá na těchto parametrech výroby:

- Druh polymerního materiálu
- Přesnost a jakost výstřiku
- Technologické podmínky vstřikování (tlak, chlazení atd.)
- Vstřikovací stroj [11]

Jednotlivé komponenty forem plní odlišné funkce a jsou rovněž specificky zatěžované a vyžadují tedy i odlišné požadavky na volbu materiálu, z kterého budou vyrobeny. Volba materiálu těchto komponentů souvisí zejména se schopností vykonávat požadovanou funkci při co nejmenším opotřebení a vysoké životnosti. Kladen je tedy důraz na dostatečnou mechanickou pevnost, ale také dobrou obrobiteľnosť. Z pohľadu technologie výroby vstřikovacích forem má materiál funkčních dílů dále plnit specifické požadavky na kvalitu struktury, která je dána:

- Dobrou obrusitelností a leštitelností
- Vysokou odolností proti otěru
- Odolností proti korozi či jiným chemickým vlivům plastu
- Vyhovujícím tepelným zpracováním
- Stálostí rozměrů a minimální deformací při chemicko-tepelném zpracování
- Vhodnými fyzikálními vlastnostmi [12]

Pro výrobu vstřikovacích forem se tedy používá materiálů, které optimálně splňují zmíněné provozní podmínky, ale jsou zároveň i ekonomicky výhodné. Výběr vhodného materiálu je rovněž ovlivněn stykem komponentu či desky s taveninou. Vysoká teplota taveniny, použití plniv či chemické reakce mohou zapříčinit změny mechanických či fyzikálních vlastností u některých nástrojových materiálů. Jako materiály vstřikovacích forem se používají zejména:

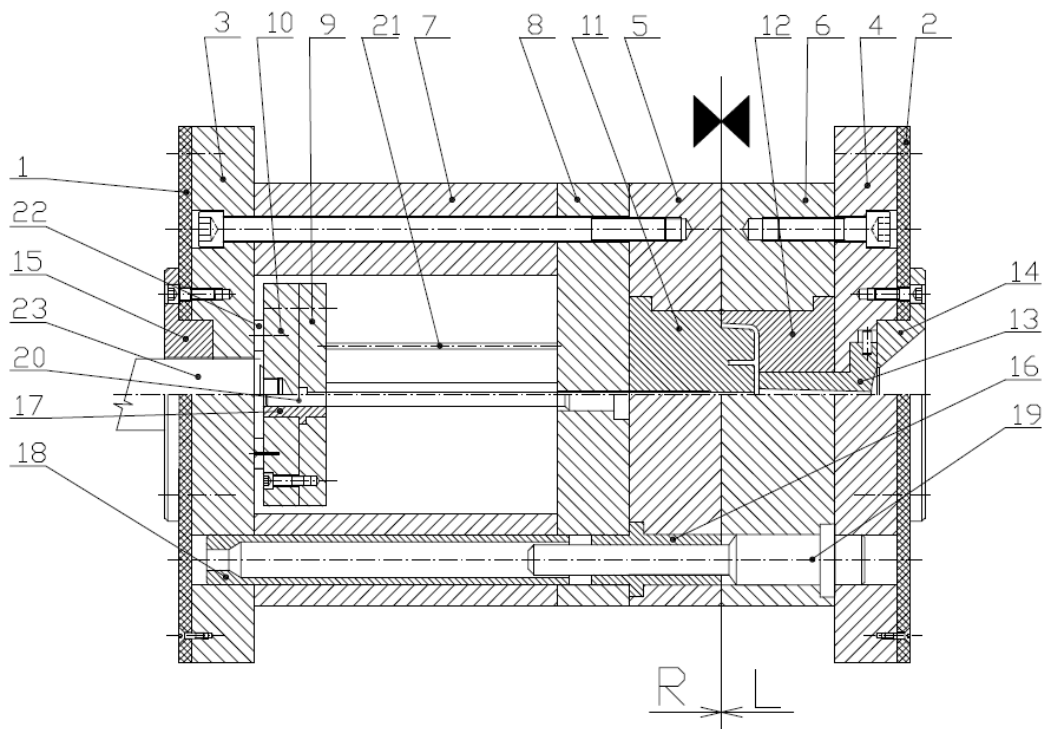
- Oceli vhodných jakostí (konstrukční či nástrojové)
- Neželezné slitiny kovů (Al, Cu,...)
- Ostatní materiály (izolační, tepelné, nevodivé – např. reaktoplasty)

3.2.1 Oceli vhodných jakostí

Pro výrobu forem se používají následující skupiny ocelí:

- Oceli konstrukční k použití v přírodním i zušlechtěném stavu
- Oceli k snadnému opracování a tváření, pro cementování a zušlechtování
- Oceli uhlíkové k zušlechtování
- Oceli nástrojové legované se sníženou i velkou prokalitelností a odolností proti oděru
- Oceli k nitridování
- Oceli antikorozi, používané při zpracování plastů, které chemicky ovlivňují ocel
- Oceli martenziticky vytvrditelné s malou deformací při tepelném zpracování a velkou stálostí rozměrů

Příklad použití ocelových materiálů jako desek či komponentu vstřikovacích forem je zobrazen v Obr. 3.3 a jednotlivé materiály vypsány v Tab. 3.1.



Obr. 3.3 Ilustrační vstřikovací forma s pozicemi jednotlivých komponentů

Tab. 3.1 Doporučené ocelové materiály jednotlivých dílů vstřikovací formy

Pozice	Název	Materiál
3, 4	Kotevní desky	19 083, 19 550, 19 663, 15 260, 11 373, 12 060, 11 600
5, 6	Upínací desky	19 083, 19 550, 19 663, 15 260, 11 373, 12 060, 11 600
7	Rozpěrky	11 373, 11 375, 11 500, 11 600
8	Opěrné desky	12 050, 12 060, 12 061, 11 373, 11 375, 11 500, 11 600
9	Vyhazovací desky kotevní	11 373, 11 375, 11 500, 11 600
10	Vyhazovací desky opěrné	11 373, 11 375, 11 500, 11 600
11, 12	Tvárník a tvárnice	19 191, 19 083, 19 312, 19 314, 19 452, 19 436, 19 550, 19 573, 19 614, 19 665, 19 902, 19 015, 19 486, 19 487, 19 340, 19 435, 17 024, 17 029, 15 340, 14 340, 14 220, 14 221, 12 060, 12 010
13	Vtokové vložky	19 312, 19 314, 19 573, 19 581, 19 486, 19 487, 15 340,
14, 15	Středící kroužky	12 050, 12 060, 12 061, 11 373, 11 375, 11 500, 11 600
16, 17	Vodící pouzdra	19 083, 19 191, 19 312, 19 314, 14 220, 19 486, 19 487
18	Středící trubky	19 083, 19 191, 19 312, 19 314, 14 220, 19 486, 19 487
19, 20	Vodící čepy	19 083, 19 191, 19 312, 19 314, 14 220, 19 486, 19 487
21	Vyhazovače	19 191, 19 312, 19 421, 19 452, 19 732
22	Dorazy	11 600, 11 700, 19 083, 19 312, 19 550, 12 060
23	Táhlo	11 373, 11 375, 11 500, 11 600

3.2.1 Neželezné slitiny kovů

Ve výrobě forem se s výhodou používají také neželezné kovy případně jejich slitiny z důvodu některých odlišných vlastností v porovnání s ocelí. Nevýhodou použití těchto materiálů je zejména v jejich životnosti. Nejpoužívanější slitiny neželezných kovů jsou slitiny hliníku a mědi.

Slitiny hliníku

Vstřikovací formy vyráběné ze slitin hliníků a některých dalších neželezných kovů mají své specifické využití. Vynikají zejména svou tepelnou vodivostí, korozivzdorností ale také cenou, čehož se dá s výhodou u forem využít. Na druhou stránku mají menší pevnost a odolnost proti opotřebení v porovnání s ocelí.

Využívají se např. u forem pro výrobu strukturní pěny, kde je vyžadován intenzivní chladicí účinek, vysoká chemická odolnost, odolnost proti korozi či ostatním činidlům, které mohou vznikat při vstřikování polymerních materiálů s nadouvadly.

U funkčních dílů vstřikovacích forem se velmi dobře jeví válcovaná slitina 424203.6, u které lze dosáhnout vyšší pevnosti při použití precipitačního vytváření. Méně časté je pak použití odlévaných materiálů. U těchto výrobků není příliš snadné docílení kvalitního a bezporézního povrchu. Tento problém se projevuje u tvarových dutin, ale i u temperačních kanálů, kde je vhodné vkládat spíše měděné chladicí trubky. [29]

Slitiny mědi

Při výrobě vstřikovacích forem se mimo ocelí a slitin hliníků prosazují také slitiny mědi. Tento materiál se s výhodou používá nejen pro chladicí trny, vytáčecí matice, vyhazovací kolík, vodící a středící pouzdra apod. ale také jako tvarové dutiny neboť mají v porovnání s ocelí některé velmi užitečné vlastnosti. Především se jedná o vysokou tepelnou vodivost, dobrou chemická odolnost i kluzné vlastnosti. Právě v důsledku těchto výhodných vlastností lze dosáhnout zkrácení výrobního cyklu (kratší doby chlazení atd.) vyšší kvalitu výstřiku, vyšší funkční bezpečnost (lepší jakost povrchu, vhodnější kluzné vlastnosti).

Čistá měď bez přídavku ostatních neželezných kovů se v praxi příliš nepoužívá z důvodu nízké tvrdosti a špatné obrobitelnosti. Pro funkční komponenty vstřikovací formy se používají různé slitiny mědi s jinými kovy, čímž dojde ke změnám vlastností mechanických či fyzikálních. Optimální volba slitiny mědi závisí na kritériu, které potřebujeme ve vstřikovací formě upřednostnit.

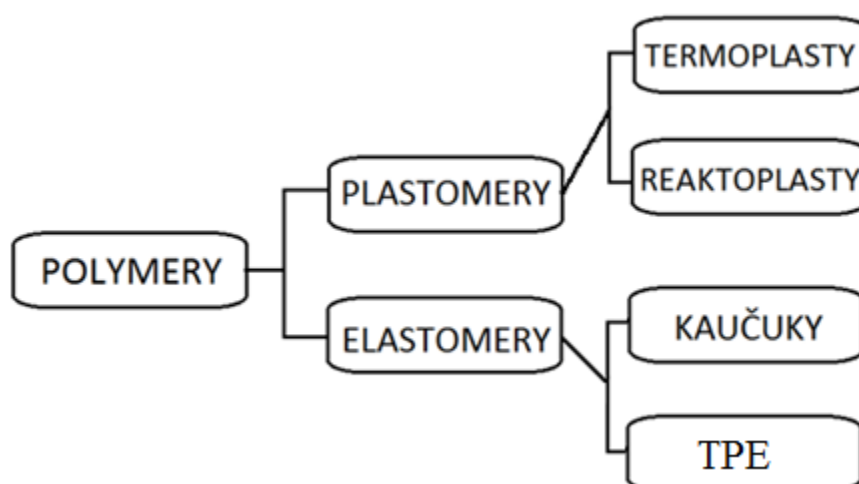
Čistá měď jako materiál se používá málo. Pro funkční díly se častěji používají nejrůznější slitiny mědi s jinými kovy. Tím se vlastnosti Cu poněkud mění. Při volbě optimální slitiny záleží na tom, která kritéria je nutno upřednostnit. [29]

4 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Polymery jsou chemické látky (přírodní či syntetické), vykazující díky svým velkým molekulám různorodou škálu vlastností. V současné době nabízí trh několik tisíc odlišných polymerů lišících se zejména mechanickými, fyzikální, tepelnými či chemickými vlastnostmi ale také oblastí použití. Při volbě materiálu je nutné vedle těchto vlastností a ceny brát v úvahu i jeho možnost zpracování, která ovlivňuje výsledné vlastnosti polymerního výrobku. Mezi výhody polymerních materiálů patří zejména jejich nízká hmotnost, výborné zpracovatelské vlastnosti, odolnost proti korozi, tlumení rázů a chvění a také mohou či nemusí být elektricky vodivé. Největší nevýhodu pak představuje ekologická zátěž pro okolní svět, mnohdy špatná recyklovatelnost či nízké mechanické a časově závislé vlastnosti.

4.1 Základní rozdělení polymerů

Nejznámější základní rozdělení polymerů, se odvíjí od složení a teplotního chování. Toto rozdělení je zobrazeno v Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Základní rozdělení polymerních materiálů

Termoplasty

Jsou to polymery, které při zvýšených teplotách měknou (přechází do plastického stavu) a lze je tvářet. V tavenině se přeměňují při zahřátí nad teplotu tání (T_f). Ochlazením se tyto materiály vrací do tuhého a pevného stavu. Při zahřívání či ochlazení nedochází k chemickým reakcím a v důsledku zpracování se nemění jejich chemická struktura. Probíhající změny jsou pouze fyzikálního charakteru a tento proces ohřátí a tuhnutí je vratný. Velkou výhodou těchto materiálů je jejich schopnost recyklace, při které ovšem klesají mechanické vlastnosti. Mezi hlavní a typické představitele termoplastů patří materiály PE – polyetylen, PP – polypropylen, PS – polystyren, PVC – polyvinylchlorid, PMMA – polymethylmethakrylát a další. [9]



Obr. 4.2 Příklady aplikací termoplastů

Reaktoplasty

Jedná se o materiály, které jsou schopny tváření po zahřátí pouze po určitou dobu. V průběhu dalšího zahřívání dochází u těchto materiálů k chemickým změnám (vytvrzování), které molekuly zesilují. Po tomto kroku již nelze reaktoplasty opakovaně tavit či tvarovat. Výrobky z reaktoplastů jsou charakteristické vysokou chemickou a tepelnou odolností, tvrdostí a tuhostí. Jako typický příklad reaktoplastů bývá označována pryskyřice (např. PF – fenol-formaldehydová pryskyřice, EP – epoxidová pryskyřice, UP – polyesterová pryskyřice apod). [9]



Obr. 4.3. Příklady aplikací reaktoplastů

Elastomery

Elastomery lze dělit podle povahy vytvrzování na tzv. termoplastické elastomery (TEP) a kaučuky.

➤ Termoplastické elastomery

Jsou vlastnostmi velmi podobné kaučukům. Jejich struktura je tvořena tvrdými a měkkými segmenty, kde měkké segmenty zastupují právě elastomery a tvrdé termoplasty, které tvoří tzv. uzly sítě. Při zvýšené teplotě přechází TPE na rozdíl od kaučuků do tekutého stavu a lze je zpracovávat obdobně jako termoplasty. Největším rozdílem mezi kaučuky a TPE je ve vlastnostech uzlů sítě, které jsou u kaučuků tvořeny chemicky, zatímco u TPE jsou pouze fyzikálního charakteru. Tato síť je tvořena obvykle určitým množstvím nemísitelných termoplastických segmentů rozptýlených ve spojitě elastomerní fázi. Hlavní výhodou TPE je možnost vstřikování na běžných strojích určených pro termoplasty a také možnost recyklace. Nevýhoda v porovnání s kaučuky jsou nižší elastické vlastnosti.

➤ Kaučuky

Kaučuky jsou jednou z nejdůležitějších složek v gumárenském průmyslu. Existuje široká škála druhů kaučuků v rámci každého typu, jejichž vlastnosti jsou odlišné a jsou závislé především na množství a typu přísad. Tyto přísady ovlivňují obvykle současně více vlastností najednou. Mechanické vlastnosti jsou ovlivněny zejména teplotou, při které výrobek v praxi funguje. S rostoucí teplotou klesá pevnost v tahu, zatímco s klesající teplotou roste modul. Kaučuky se vyskytují v gumárenském průmyslu syntetické ale i přírodní. Syntetické kaučuky se vyznačují relativně nízkou cenou a velkým objemem spotřeby. Jejich výhodou je vysoká pevnost, dobrá odolnost proti otěru, nízká hystereze a vysoká odrazová pružnost. Z důvodu špatné odolnosti proti stárnutí za tepla je výhodné u nich používat antidegradanty. Přírodní kaučuky jsou získávané z řady rostlin, které obsahují mléčně zbarvenou mizu nazývanou se latex. Většinou se pro gumárenské aplikace používá strom *Hevea Brasiliensis*. Tento latex obsahuje průměrně 30% kaučuku. Tyto kaučuky mají vysokou mechanickou pevnost, vysokou elasticitu a velmi dobrou odolnost proti otěru. Vykazují ovšem i velmi dobré dynamické vlastnosti a z tohoto důvodu jsou často využívány v pneumatikách, pružinách či vibračních uloženích. [32]



Obr. 4.4 Aplikace kaučuků a TPE

Polymerní materiály lze ovšem dělit dle více kritérií a to zejména v závislosti na jejich struktuře, složení, aplikaci atd.

Dle původu lze polymery dělit:

- Přírodní – na bázi celulózy, na bázi kaseinu, na bázi latexu
- Syntetické

Dle způsobu výroby:

- Polymerizáty (např. PE, PP, PS, aj.)
- Polykondenzáty (např. PC, PA66, aj.)
- Polyadukty (např. EP, UP, aj.)

Dle molekulární struktury:

- Lineární
- Rozvětvené
- Síťované – blokové či roubované kopolymery

Dle nadmolekulární struktury:

- Amorfní (např. PS, ABS, PMMA, PC, aj.)
- Semikrystalické (např. PE, PP, PA, POM aj.)

Dle chemického složení:

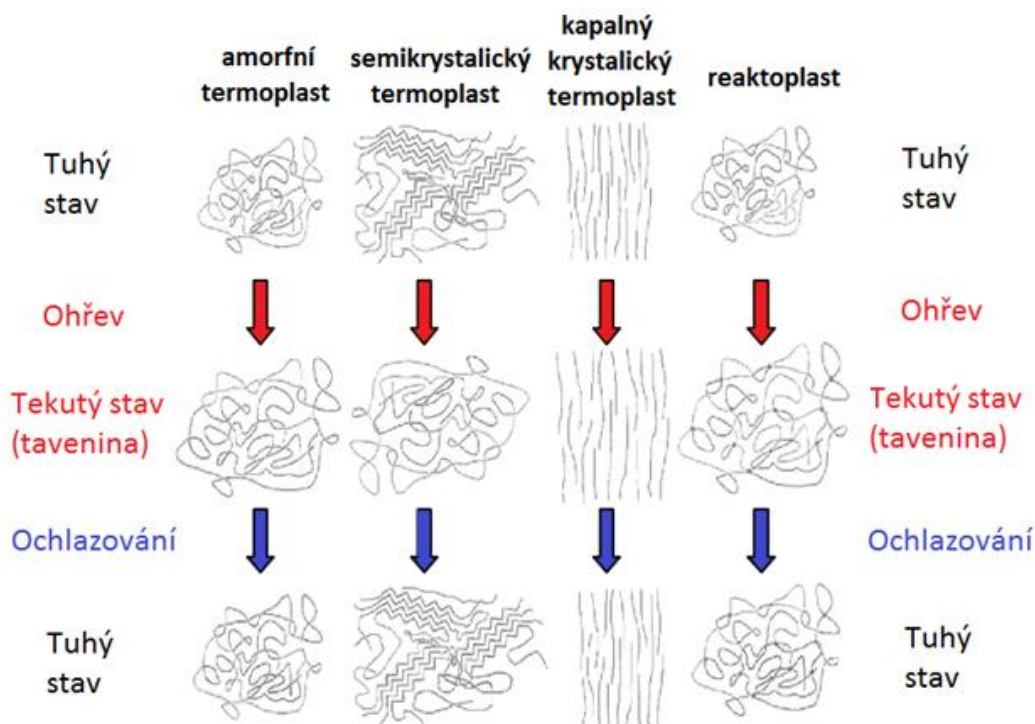
- | | |
|----------------|---------------------|
| ➤ Polyolefiny | - Polyamidy |
| ➤ Polystyreny | - Polyuretany |
| ➤ Chloroplasty | - Silikony |
| ➤ Fluoroplasty | - Deriváty celulózy |
| ➤ Polyestery | - Vinylové polymery |
| ➤ Akryláty | - aj. |

V neposlední řadě se v současné době dělí polymerní materiály **dle aplikací:**

- Standartní polymery (běžné aplikace v praxi)
- Konstrukční polymery
- High-tech polymery

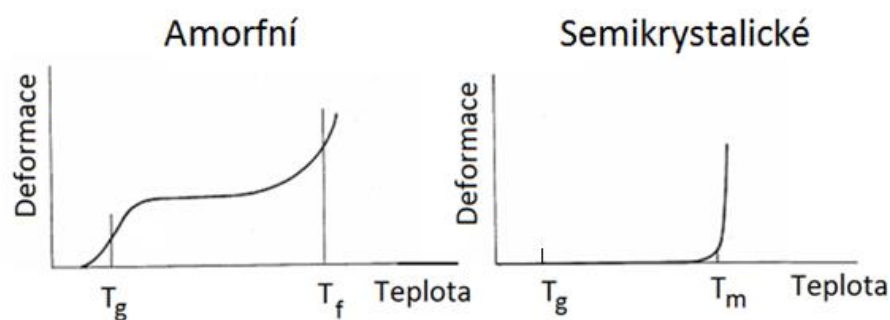
4.2 Nadmolekulární struktura

Nadmolekulární struktura polymeru indikuje rozdělení molekul na nadmolekulární úrovni, v přeneseném slova smyslu známá jako morfologie, která zahrnuje faktory jako stupeň krystalizace, tvar krystalů, jejich velikost, orientaci a další informace. Obecně se termoplasty rozdělují na amorfní, semikrystalické a kapalné krystalické termoplasty. Uspořádání polymerních řetězců pro jednotlivé typy polymerů při různých teplotních zatíženích je zobrazeno v Obr. 4.5. [9]



Obr. 4.5 Struktura řetězců při různých teplotních změnách

Oblast tváření či použití semikrystalických a amorfních termoplastů se výrazně liší. Pro každý termoplast je charakteristická tzv. termomechanická křivka, která udává teplotní závislost deformace (napětí), vznikající působením vnější síly. Schematicky znázorněné křivky pro amorfní a semikrystalické polymery jsou zobrazeny v Obr. 4.6.



Obr. 4.6 Termomechanická křivka amorfních a semikrystalických polymerů [47]

4.2.1 Amorfní termoplasty

Jak lze vidět z Obr. 4.6, charakteristickými přechodovými teplotami jsou u amorfních polymerů teplota skelného přechodu (teplota zesklenní) T_g a také teplota viskózního toku T_f . Pod teplotou T_g je termoplast tvrdý a křehký, má vysoký modul pružnosti a nachází se ve sklovitém stavu. Při zahřátí přechází do tzv. stavu kaučukovitého. Modul pružnosti v oblasti mezi T_g a T_f klesá přibližně o tři řády. Toto je způsobeno vyšší pohyblivostí segmentů makromolekul, které konají rotační nebo kývavý pohyb, čímž poklesnou mezimolekulární síly. Při dalším zahřívání ztrácí amorfní polymer v oblasti T_f své kaučukovité elastické vlastnosti. Při takovémto zahřátí klesá modul pružnosti skokem až téměř na nulovou hodnotu (makromolekuly se vůči sobě navzájem pohybují) a polymer přechází do stavu vysoce viskózní taveniny. Právě nad touto teplotou se nachází zpracovatelská oblast amorfních polymerů pro většinu zpracovatelských technologií, jako jsou vstřikování, vytlačování, odlévání apod. [9]

Vlastnosti amorfních polymerů:

- Možnost transparentního (průhledného) provedení
- Tvrdé, křehké
- Vysoká pevnost a modul pružnosti
- Nižší součinitel tepelné roztažnosti než u semikrystalických polymerů
- Menší smrštění v porovnání se semikrystalickými polymery
- Výborné optické a mechanické vlastnosti

4.2.1 Semikrystalické termoplasty

Nejdůležitější předpokladem pro krystalizaci lineárních řetězců polymerního materiálu je chemická a sterická pravidelnost (stereoregularita) dostatečně dlouhých úseků jednotlivých řetězců. K tomu aby byly polymery schopny krystalizovat je ovšem rovněž nutné, aby byly řetězce schopné hustého uložení v pravidelném paralelním uspořádání, a musí být také dostatečně ohebné. Výsledné vlastnosti semikrystalických polymerů jsou dány vzájemným podílem krystalické a amorfní složky, která se vyjadřuje jako stupeň krystalinity. Zauzlení, zaklesnutí řetězců a jejich konců, objemné substituenty, polarita skupin a různé další defekty nepovolují polymernímu materiálu dosáhnout úplnou krystalizaci, a proto všechny reálně používané polymery krystalizují pouze částečně, z čehož plyne jejich název semikrystalické. [8][47]

Ke změnám vlastností u semikrystalických termoplastů v okolí teploty T_g dochází pouze pro jejich amorfní složku. Čím vyšší stupeň krystalinity tedy polymer obsahuje, tím méně výrazné jsou změny v oblasti této teploty. Teplota T_g je tedy pro semikrystalické materiály méně významná. Z důvodu vysokých mezimolekulárních sil mezi jednotlivými krystaly si tyto polymery udržují velmi dobré mechanické i technické vlastnosti v oblasti mezi T_g a T_m .

V oblasti T_m nazývané teplota tání dochází k přechodu z pevného skupenství na vysoce viskózní taveninu. V této oblasti dochází k velkým změnám vlastností a lze tedy říci, že oblast použití semikrystalických polymerů je pod touto teplotou T_m . S ohledem na spolehlivou funkci výrobku je volena tato hranice asi 20 – 40°C pod touto teplotou. Při dlouhodobém zatížení je ovšem nutné tuto hranici více snížit.

Vlastnosti semikrystalických polymerů:

- Mléčně zakalené – netransparentní
- Houževnatější v porovnání s amorfními při obdobné pevnosti a tuhosti
- S rostoucím krystalickým podílem roste pevnost a modul pružnosti
- Větší smrštění v porovnání s amorfními
- Výborná chemická odolnost

4.3 Základy reologických vlastností

Měření reologických informací popisuje proces tečení materiálu pod vlivem vnějších. Význam měření procesu tečení je důležitý zejména pro vhodnou volbu zpracovatelské technologie. Jelikož se může polymerní materiál chovat viskózně (jako kapalina), ale také elasticky (jako pružná látka), nazýváme chování polymerních materiálů jako viskoelastické. Základním vztahem pro formulování reologických vlastností je dán Newtonovým zákonem, který je platný pro ideální tekutinu:

$$\tau = \eta * \dot{\gamma} \quad (1)$$

kde: τ – smykové napětí, η – viskozita, $\dot{\gamma}$ – časový gradient smykové deformace

Polymerní materiály s relativně vysokou viskozitou se nicméně ve svých tokových vlastnostech liší a neplatí pro ně tento jednoduchý zákon. Chovají se tedy jako neneutonské kapaliny a vztah pro popis tokového chování je pro ně tedy nutné modifikovat, neboť závislost napětí na rychlosti smykové deformace není lineární. Platí pro ně tedy vztah:

$$\tau = K * \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

Kde platí:

$$\eta = K * \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3)$$

$$\tau = \tau_0 + \eta * \dot{\gamma} \quad (4)$$

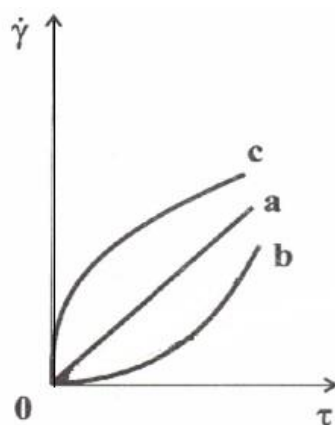
K – koeficient úměrnosti,

n – exponent vyjadřující stupeň odklonu tokové křivky,

τ_0 – prahová smykové napětí – mez toku, při němž začne působit trvalá plastická deformace

Funkční závislost $\eta = f(\tau)$ má v podstatě dva charaktery:

- viskozita η klesá se zvyšujícím se smykovým napětím τ – index $n > 1$ – pseudoplasticita – tzv. kapaliny pseudoplastické
- viskozita η roste se zvyšujícím se smykovým napětím τ – index $n < 1$ – dilatance – tzv. kapaliny dilatantní

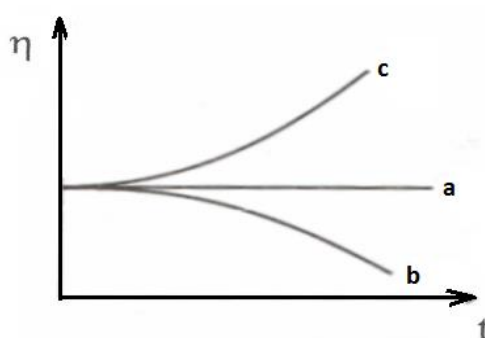


Obr. 4.7 Tokové křivky pro modelové tekutiny [49]

a – newtonská kapalina, b – pseudoplastická kapalina, c – dilatantní kapalina

Tyto tokové křivky se dále rozšiřují o tzv. Binghamské kapaliny, které jsou charakterizovány tím, že k toku u nich dochází až po překročení určitého prahového smykového napětí tzv. meze toku (kluzu). Patří sem např. koncentrované průmyslové a odpadní kaly, kašovitě suspenze, křídly, vápna aj.

Pojem tokových vlastností polymerních systémů se ovšem dále komplikuje případnou závislostí viskozity na experimentálním čase. Smykové napětí konstantních hodnot může v čase rozrušovat pseudostabilní nadmakromolekulární struktury, což má za následek, že se viskozita s časem snižuje (tzv. tixotropie), takovéto látky nazýváme tixotropní kapaliny či zvyšuje (tzv. reopexie) a takovéto látky jsou nazývány reopexní kapaliny. Těchto jevů může být dosaženo při působení chemických reakcí (např. tuhnutí cementu, ztužování tuku, vulkanizace, polymerace aj.). [48][49]



Obr. 4.8 Závislost viskozity na čase [49]

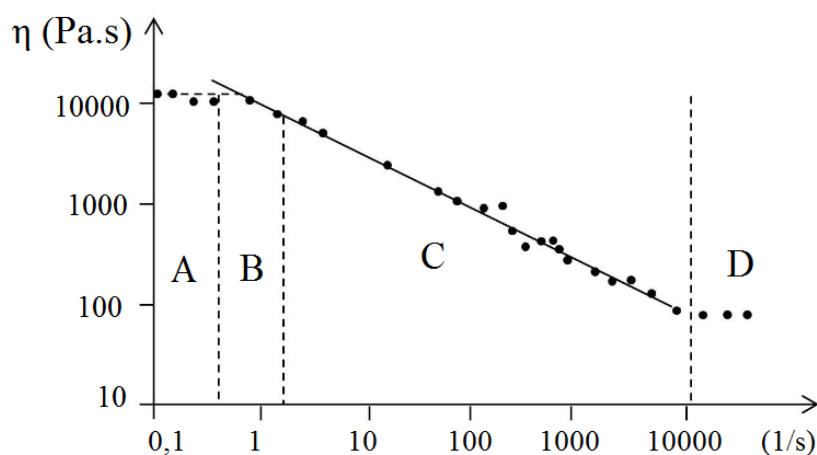
a – newtonská kapalina, b – tixotropní kapalina, c – dilatantní kapaliny

Při měření reologických vlastností polymerních materiálů je velmi důležité měřený materiál dobře temperovat při definované teplotě, která může být pro různé polymery velmi odlišná, z důvodu vysoké závislosti viskozity na teplotě.

Reologické (tokové) vlastnosti polymerních materiálů jsou nejčastěji charakterizovány:

- tokovou křivkou – závislost smykového napětí τ na rychlosti smykové deformace $\dot{\gamma}$
- závislostí viskozitního koeficientu η , K na:
 - smykovém napětí nebo rychlosti smykové deformace
 - teplotě
 - experimentálním čase
 - molekulové hmotnosti a strukturních parametrech

Pro konstrukci tokových křivek je používána řada viskozimetrů (průtokové, pádové, rotační aj.), používaných v závislosti na typu polymerního materiálu a způsobu jeho zatížení. Velmi často používanými reometry jsou pak reometry kapilární, pomocí nichž zjišťujeme hodnotu indexu toku taveniny za normou definovaných podmínek. Index toku taveniny za zvolených podmínek je ovšem pouze jedním bodem na tokové křivce. Pro konstrukci celistvé tokové křivky Obr. 4.9 je tak nutné, měřit polymerní materiál i při jiných zatíženích, teplotách či v narůstajících časových intervalech. [46]



Obr. 4.9 Model tokové křivky

Index toku taveniny ITT (MFI – melt flow index) je obecně vhodný pro:

- **Předběžné hodnocení použitelnosti materiálu ve zvolené technologii**
- **Hodnocení stejnoměrné kvality materiálu** – podává informaci o tekutosti materiálu, která musí korespondovat s ITT udávaným výrobcem, neboť změna tekutosti ovlivňuje výrobek i z hlediska mechanických vlastností
- **Porovnání plněných a neplněných termoplastů** – např. barviva tekutost zvyšují, skelná vlákna naopak výrazně snižují
- **Hodnocení kvality výrobního procesu**

5 CÍL PRÁCE

Cílem této dizertační práce je určit vliv technologických podmínek na jakost plastikářského nástroje (vstřikovací formy) a budoucího polymerního výrobku. V první fázi tohoto experimentu byly vyrobeny odlišnými technologickými podmínkami tvarové dutiny a byl určen jejich vliv na výsledné parametry drsnosti R_a a R_z . V druhé části pak byly vyrobeny polymerní vzorky při odlišných technologických podmínkách a byl testován jejich vliv na drsnost polymerních vzorku R_a a R_z . Tato dizertační práce je dále rozšířena o určení míry některých vlivů, které mohou více či méně ovlivňovat budoucí jakost povrchu polymerních výrobků. Cílem této práce je pak určit závislost jednotlivých vlivů na budoucí kvalitu povrchu tenkostěnných rovinných polymerních výrobků.

Postup při řešení disertační práce:

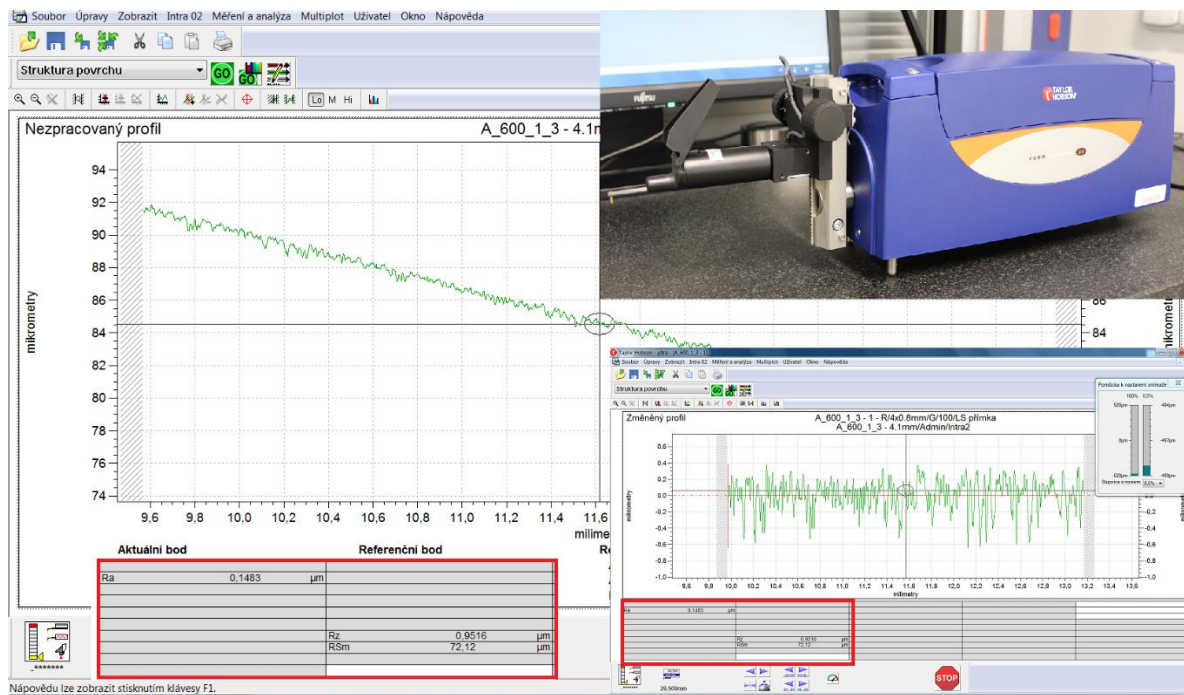
- Identifikace možných vlivů modifikujících jakost polymerního výrobku (materiál formy, technologické podmínky vstřikování, reologické vlastnosti polymeru, polymerní materiál, jakost povrchu tvarové dutiny atd.)
- Návrh a výroba tvarových dutin vstřikovací formy s odlišnou a předem definovanou drsností povrchu určenou parametry R_a a R_z
- Volba a testování vybraných polymerních materiálů
- 2D měření jakosti povrchu tvarových dutin vstřikovací formy
- Výroba vstřikovaných vzorků při předem definovaných podmínkách
- Provedení statických měření drsnosti povrchu polymerních výrobků
- Statistické vyhodnocení naměřených dat experimentu
- Určení závislosti jednotlivých vlivů na jakost polymerního výrobku
- Stanovení vhodných podmínek pro vstřikování tenkostěnných plochých polymerních výrobků

6 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Tato disertační práce se zabývá výzkumem rozličných faktorů, které mohou mít vliv na výslednou jakost povrchu malých, rovinných a tenkostěnných vstřikovaných výrobků. Experiment byl zaměřen zejména na výzkum vlivu druhu polymerního materiálu, materiálu tvarové dutiny vstřikovací formy ale také na vliv technologických podmínek při vstřikování. Správná volba těchto jednotlivých parametrů může zaručit vysokou kvalitu vstřikovaného výrobku při nízkých nákladech a kratších výrobních časech.

6.1 Hodnocení drsnosti povrchu

V tomto experimentu byla měřena jakost povrchu z pohledu drsnosti povrchu a to pomocí parametrů drsnosti R_a a R_z . Převážná část měření drsnosti povrchu tvarových dutin a polymerních výrobků byla měřena pomocí 2D kontaktního profiloměru Form Talysurf 50.



Obr. 6.1 Profiloměr Form Talysurf 50 s ukázkou software Taylor Hobson

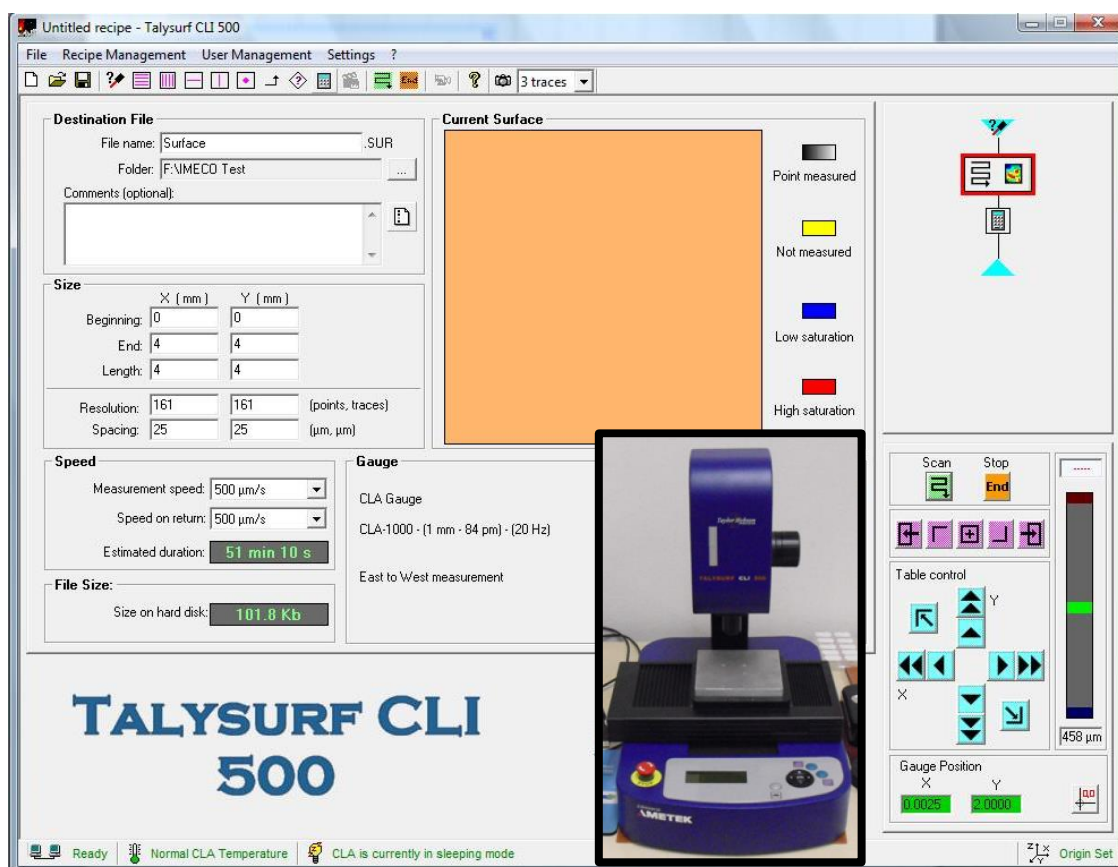
Měření jednoho souboru vždy probíhalo na deseti vzorcích, kde na každém zkušební vzorku proběhlo jedno měření. Základní délka měření drsnosti byla stanovena na 0,8 mm a v celé vyhodnocované délce byla obsažena celkem pětkrát. Vyhodnocovaná délka byla tedy 4 mm. Pro odstranění tvaru a vlnitosti byl použit Gaussův filtr. Vybrané charakteristiky profiloměru Form Talysurf 50 jsou vypsány v Tab. 6.1.

Tab. 6.1 Vybrané charakteristiky 2D profiloměru Form Talysurf 50

Horizontální charakteristika	
Délka snímání	0,1 mm až 50 mm
Rychlost snímání/měření	10 mm/s max - 0,25 mm/s
Datová rozteč v X	0,5 μm
Úchylka přímosti	0,4 μm na 50 mm
	0,2 μm na libovolných 20 mm
Vertikální charakteristika	
Nominální rozsah měření	1 mm
Rozlišení	16 nm v rozsahu 1 mm
Poměr rozsahu k rozlišení	65,536 : 1

Z důvodu možného vlivu drsnosti povrchu polymerního výrobku na vzdálenosti měření od ústí vtokového systému byly na tvarových dutinách vyrobeny oblasti o velikosti 5x5 mm (Obr. 7.1), v jejichž blízkosti docházelo ke měření kontaktním profiloměrem, ale rovněž sloužily i jako oblast ohraničující měření pomocí 3D bezkontaktního drsnoměru.

Měření charakteru povrchu pomocí 3D drsnoměru probíhalo zejména z důvodu ověření správnosti naměřených dat, ale také ke grafickému 3D porovnání jednotlivých polymerních výrobků. Náhled použitého 3D drsnoměru Talysurf CLI 500 a použitého software Taylor Hobson je zobrazen v Obr. 6.2.



Obr. 6.2 3D bezkontaktní drsnoměr a software Talysurf CLI 500

Měření 3D povrchu probíhalo v oblasti 4x4 mm. Rychlost snímání byla nastavena na 500 $\mu\text{m/s}$. Základní parametry drsnoměru Talysurf CLI 500 jsou vypsány v Tab. 6.2.

Tab. 6.2 Základní charakteristiky drsnoměru Talysurf CLI 500

Charakteristika	
Prostor měření D x H x V [mm]	50 x 50 x 50
Délka posuvu na osách X – Y - Z [mm]	50
Osové rozlišení [μm]	0,5
Rozměry D x H x V [mm]	500 x 310 x 450
Nosnost [kg]	10
Hmotnost [kg]	55
Max. rychlost polohování [mm/s]	30
Maximální rozlišitelnost [nm]	1
Maximální přípustná chyba měření [nm]	10

6.2 Hodnocení krystalického podílu

Krystalický podíl semikrystalických polymerních materiálů byl měřen na difraktometru X'PERT PRO s rentgenkou $\text{CuK}\alpha$ a Ni filtrem. Vzorky, které lze na tomto difraktometru analyzovat, mohou být i v práškovém stavu. V případě tohoto experiment byly vzorky v pevném stavu. Při měření byla využita Bragg – Brentanova konfigurace, napětí 40 kV a proud 30 mA. Měření probíhalo v rozsahu 2Θ od 5° do 30° .



Obr. 6.3 Difraktometr X'PERT PRO a ukázka uchycení vzorku

Rentgenový difraktometr představuje standartní techniku pro identifikaci fází, kvantitativní fázovou analýzu, analýzu krystalové struktury, velikost částic a stanovení napětí, non-ambient měření (vysoká teplota, vysoká vlhkost, přítomnost reakčních plynů) pro in-situ pozorování reakcí a vlastností při daných podmínkách atd. Základní parametry použitého přístroje jsou vypsány v Tab. 6.3.

Tab. 6.3 Technické parametry rentgenového difraktometru X'PERT PRO

Vlastnosti	Parametry
Zařízení	CuK _α
Rozsah 2 Θ	0-150°
Typ detektoru	Vysokorychlostní polovodičový X'Cellerator
Provozní režimy	Odrazová parafokusní (Bragg-Brentano) geometrie, transmise na plochých vzorcích Transmise ve skleněné kapiláře (Debye-Scherrer geometrie)
Rozsah teplot	Pokožová až 900 °C (reakční komora Anton Paar XRK900)
Optika	Měnitelné rozbíhavé a anti-rozptylové štěrby, Primární paprsek – hybridní monochromátor, Kolimátor 0.02 rad
Dostupný software	X'Pert Data Collector a High Score Plus
Databáze	PDF-4, ICSD

Měření probíhalo celkem na deseti vzorcích pro materiál PP a PA66. Výsledné hodnoty byly statisticky vyhodnoceny pomocí aritmetického průměru a jsou zobrazeny v Tab. 7.22, Tab. 7.25 a Tab. 7.28.

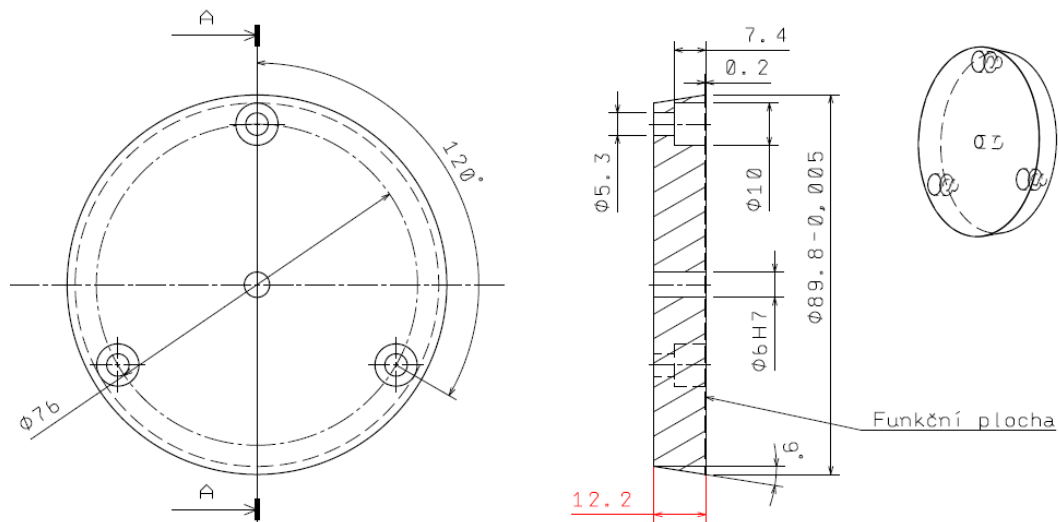
6.3 Výroba a materiál tvarových dutin

Návrh tvaru a geometrie tvarových dutin vycházela z již dříve vyrobené vstřikovací formy (Obr. 6.4). U této vstřikovací formy je velkou nevýhodou nemožnost použití temperace. Z tohoto důvodu byl mezi zkoumané vlivy zahrnut i vliv odlišných materiálů tvarových dutin, který hodnotí drsnost povrchu při použití materiálů s různou tepelnou vodivostí. Pro výrobu tvarových dutin tak byly použity materiály: ocel ČSN 19552.4, dural ČSN 424222 a měď ČSN 423001



Obr. 6.4 Vstřikovací forma

Samotný návrh tvarových dutin se odvíjel zejména z požadavků rychle montáže a demontáže tvarové dutiny ze vstřikovací formy, neboť počet použitých polymerních materiálů, ale také tvarových dutin byl vysoký. Z tohoto důvodu byl navržen tvar a rozměry zobrazené v Obr. 6.5.



Obr. 6.5 Tvar a rozměry tvarové dutiny vstřikovací formy

Pro dosažení rychlé výměny tvarové dutiny byly zhotoveny tři průchozí díry o průměru 5,1 mm po 120°, které slouží k uchycení tvarové dutiny pomocí zápusťných šroubů M5. Šířka tvarové dutiny 12,2 mm se odvíjela od rozměrů vstřikovací formy, přičemž 0,2 mm z této hodnoty byl přídavek pro následné dokončovací operace. Výsledná šířka měla tedy po dokončení hodnotu 12 mm. Tuto hodnotu bylo potřeba vyrobit co nejpřesněji, jelikož při větších odchylkách mohlo docházet k přetokům taveniny do míst se šrouby, případně ke špatnému uzavření vstřikovací formy. Postup výroby tvarové dutiny je zobrazen v Obr. 6.6.



Obr. 6.6 Postup výroby tvarových dutin

První fáze výroby tvarové dutiny spočívala v nařezání válečku na požadované rozměry s příдавky. Po orovnění tvarových dutin byl materiál v případě oceli kalen a následovalo další obrábění. V druhé fázi byla tvarová dutina znovu obrobena a byla vyrobena středící díra, která sloužila k uchycení dutiny na přípravek. Pomocí přípravku byly v třetí fázi vyrobeny tři průchozí díry pro šrouby. Posledním krokem bylo nezbytné sražení hrany na soustruhu pod úhlem 9° , které se rovněž odvíjelo od konstrukce vstřikovací formy. Poté následovala nejdůležitější operace a to dokončování funkční plochy tvarové dutiny.

Použité dokončovací operace jsou pro jednotlivé materiály popsány níže v kapitole 7.1. Po vhodné volbě dokončovacích operací a technologických podmínek bylo dále nutné zhotovit na tvarové dutině oblast o velikosti 5×5 mm, která sloužila pro měření 3D drsnoměrem a zároveň byla umístěna ve stejné vzdálenosti od vtoku, aby bylo dosaženo měření drsnosti povrchu polymerních výrobků ve stejné vzdálenosti (Obr. 7.1). Všechny zmíněné technologické operace pro výrobu tvarových vložek byly zajištěny pomocí soustruhu TOS S32, univerzální frézky FHV-50PD a horizontální brusky BRH 20.03.F, které jsou zobrazeny v Obr. 6.7.



Obr. 6.7 Soustruh TOS S32, univerzální frézka FHV-50PD, bruska BRH 20.03F

6.3.1 Ocel ČSN 19552.4 (EN 1.2343)

Jedná se o středně legovanou chrom-molybden-vanadovou ocel určenou pro práci za tepla. Tato ocel patří do třídy 19, tj. nástrojová ocel. Je kalitelná v oleji a na vzduchu, ale také je vhodná pro nástroje chlazené vodou. Mezi obvyklé použití této oceli patří nástroje velmi namáhané za tepla, jako jsou lisovací trny a matrice, nástroje na protlačování, nástroje pro výrobu šroubů a matic za tepla, nástroje pro tlakové lití, lisovací nářadí, vložky zápustek, nože pro stříhání za tepla. [41]

Chemické složení této oceli a vybrané vlastnosti jsou zobrazeny v Tab. 6.4.

Tab. 6.4 Vlastnosti oceli ČSN 19 552.4 [41]

Legující prvek	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Obsah [%]	0,33-0,41	0,80-1,20	0,25-0,50	4,80-5,50	1,10-1,50	0,30-0,50
Hustota ρ	7850 [kg.m ⁻³]					
Modul pružnosti E při 20°C	215000 [MPa]					
Mez pevnosti Rm po zušlechtnění	1200 [MPa]					
Měrná tepelná kapacita C _p při teplotě 20°C	460 [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]					
Tepelná vodivost λ při teplotě 20°C	25 [W.m⁻¹.K⁻¹]					

Mezi vlastnosti této oceli patří vysoká pevnost za zvýšených teplot, odolnost proti popouštění, odolnost proti tvorbě trhlin vlivem tepelné únavy, odolnost proti chemickému působení roztavených kovů, dobrá tepelná vodivost a nízký součinitel tepelné roztažnosti, dostatečná prokalitelnost, stálost rozměrů po kalení a popouštění, dobrá obrobiteľnosť a leštiteľnosť. [41]

6.3.2 Dural ČSN 424222 (EN AW-7075)

Dural je obchodní název pro slitiny 90 – 96 % hliníku a 4 – 6 % mědi s přísadami hořčíku, manganu atd. Dural má až pětkrát vyšší pevnost a tvrdost oproti čistému hliníku a má i nepatrně větší hustotu. Pevnost i tvrdost lze dále zvýšit tepelným zpracováním.

Tato slitina se používá v různých oblastech průmyslu ve tvaru lisovaných a válcovaných polotovárů, volných a zápustkových výkovek. Je určen pro vysoce namáhané konstrukce dlouhodobě pracující do teploty 120° C, např. pro leteckou výrobu: kryty, výztuže, přepážky. Materiál má vysokou mez pevnosti a nízkou tažnost. Je citlivý na vrubový účinek. Dále je vhodný pro nasazení do kryogenních teplot. Používá se pouze ve stavu vytvrzeném za tepla. Zvyšování teploty stárnutí je doprovázeno snížením pevnosti i tažnosti a zvýšením korozní odolnosti. [34]

Základní vlastnosti tohoto materiálu a jeho chemické složení je popsáno v Tab. 6.5.

Tab. 6.5 Vlastnosti duralu ČSN 424222 [34]

Legující prvek	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn
Obsah [%]	5,00-7,00	1,80-2,80	1,40-2,00	0,10-0,25	0,20-0,60
Hustota ρ	2850 [kg.m ⁻³]				
Modul pružnosti E při 20°C	76000 [MPa]				
Mez pevnosti Rm po zušlechtnění	500 [MPa]				
Měrná tepelná kapacita C _p při teplotě 20°C	960 [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]				
Tepelná vodivost λ při teplotě 20°C	150 [W.m⁻¹.K⁻¹]				

6.3.3 Měď ČSN 423001 (EN CW004A)

Tento použitý materiál lze označovat za téměř čistou měď. Byl vybrán z důvodu velmi dobrých mechanických vlastností, dobré obrobítelnosti, ale zejména kvůli své vysoké tepelné vodivosti. Zpracovává se za studena i za tepla především ražením a hlubokým tažením. Po žíhání na vzduchu musí následovat moření za účelem odstranění oxidické povrchové vrstvy nebo lze proces žíhání provést v neutrální argonové atmosféře. Vzhledem k obsahu kyslíku ve slitině nesmí být použita vodíková atmosféra při žíhání. Hrozí totiž nebezpečí výbuchu.

Mimo jiné vodík silně narušuje povrch této slitiny. Chemické složení slitiny je: Cu+Ag: >99,9%; O: <0,04%. [33]

Vybrané vlastnosti použitého materiálu jsou zobrazeny v Tab. 6.6.

Tab. 6.6 Vlastnosti mědi ČSN 423001 [33]

Hustota ρ	8890 [kg.m ⁻³]
Modul pružnosti E při 20°C	115000 [MPa]
Mez pevnosti R _m po zušlechtnění	395 [MPa]
Měrná tepelná kapacita C _p při teplotě 20°C	380 [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Tepelná vodivost λ při teplotě 20°C	388 [W.m⁻¹.K⁻¹]

6.4 Vstřikované polymerní materiály

Návrh a volba polymerních materiálů použitých v této dizertační práci se odvíjela zejména z pohledu navržených experimentů. Pro experiment hodnotící vliv drsnosti povrchu tvarové dutiny na drsnost polymerních vzorků byl vybrán materiál ABS Magnum 3453. V experimentu hodnotícím vliv ITT již byly použity materiály tři. Jednalo se o ABS Magnum 3616, 3453 a 8391. Vliv materiálu vstřikovací formy a nadmolekulární struktury byl hodnocen pomocí polymerních materiálů PC, PMMA, PP a PA66.

6.4.1 ABS Magnum

Materiál (ABS – akrylonitril butadien styren) byl zvolen kvůli široké oblasti svého použití. Používá se ve velké míře v automobilovém průmyslu, ale také ve spoustě jiných průmyslových odvětvích. V těchto experimentech byly použity celkem tři typy materiálu ABS. Jednalo se o ABS Magnum od stejného dodavatele, lišící se zejména indexem toku taveniny (ITT). Všechny použité polymerní materiály byly výrobcem udávány jako vhodné pro technologii vstřikování. Základní vlastnosti použitých materiálů ABS jsou vyobrazeny v Tab. 6.7.

Tab. 6.7 Vybrané vlastnosti použitých materiálů ABS [38][39][40]

Vlastnosti	Magnum 3616	Magnum 3453	Magnum 8391
Hustota (23°C) [g/cm ³]	1,05	1,05	1,05
ITT (220°C/10.0kg) [g.10min ⁻¹]	5,5	15	28
Mez pevnosti v tahu [MPa]	38	45	45
Mez pevnosti v ohybu [MPa]	65	68	70
Modul pružnosti v tahu [MPa]	2200	2280	2340

Tyto polymerní materiály byly použity pro experiment hodnotící vliv indexu toku taveniny na jakost povrchu polymerního výrobku při použití tvarových dutin s odlišnou jakostí povrchu.

Pro ověření indexu toku taveniny, udaný výrobcem v materiálovém listu, byl proveden test na kapilárním výtlačném reometru DINISCO KAYENESS LMI 4003. Test byl proveden podle normy ČSN EN ISO 1133, která udává teplotu materiálu ABS 220 °C při zatížení 10 kg, tedy shodné podmínky jako u ITT uváženém dodavatelem. Tato metoda odřezávání vzorku po určité době a následném dopočítání hodnoty ITT v jednotkách gram za 10 minut může být velmi nepřesná v závislosti na preciznosti odřezávání vzorků po přesně určeném čase. Zejména u rychle tekoucích materiálů může docházet k určitým odchylkám. Tento test ovšem sloužil pouze pro ověření různorodosti ITT jednotlivých materiálů. Výsledné zprůměrované hodnoty ITT jsou zobrazeny v Tab. 6.8.

Tab. 6.8 Naměřené hodnoty ITT materiálů ABS

Material	Magnum 3616	Magnum 3453	Magnum 8391
ITT (220°C/10.0kg) [g.10min ⁻¹]	7,9	16,1	29,5

6.4.2 PP – Syntegum 1020 AFV/HFML

Tento materiál byl použit především pro svůj vyšší obsah krystalického podílu ve struktuře výsledného polymerního výrobku. Z důvodu předchozího zjištění vlivu ITT na jakost povrchu polymerního výrobku byl tento materiál volen s podobně vysokým indexem toku taveniny. Materiál PP je často považován za nejpoužívanější a nejrozšířenější polymerní materiál na světě. Velmi často se používá v potravinářském průmyslu (balení potravin, tácky, košíčky, kalíšky, lahve na čisticí prostředky, kýble, víčka aj.), dále i v automobilovém průmyslu a také v domácnostech (nábytek, židle, stoly, krabice aj.). Základní vlastnosti tohoto polymerního materiálu jsou zobrazeny v Tab. 6.9.

Tab. 6.9 Vlastnosti materiálu PP SYNTEGUM 1020 [37]

Vlastnosti	PP
Hustota (23°C) [g/cm ³]	1.04
Teplota tání [°C]	190
Mez pevnosti v tahu [MPa]	65
Mez pevnosti v ohybu [MPa]	100
Modul pružnosti v tahu [MPa]	3200

6.4.3 PA 66 – Technyl A205F

Materiál polyamid 66 byl vybrán kvůli svému nižšímu krystalickému podílu v porovnání s PP. Tento materiál je velmi často používán v automobilovém průmyslu (vzduchové potrubí, ozubené převody, spojky, napínače řetězů, kryty motoru, dveřní kliky, zrcátka a jiné interiérové vybavení), v elektrickém průmyslu (konektory, rozvody el. energie, vypínače aj.) či v jiných průmyslových odvětvích (lyžařské vázání, železniční podložky kolejí, potrubí, balící folie aj.). Vybrané vlastnosti zvoleného materiálu PA 66 – Technyl A205F jsou zobrazeny v Tab. 6.10.

Tab. 6.10 Vybrané vlastnosti PA 66 – Technyl A250F [36]

Vlastnosti	PA 66
Hustota (23°C) [g/cm ³]	1,14
Teplota tání [°C]	263
Mez pevnosti v tahu [MPa]	60
Mez pevnosti v ohybu [MPa]	120
Modul pružnosti v tahu [MPa]	3200

6.4.4 PMMA – Plexiglas 8N

Materiál PMMA byl vybrán z důvodu velmi nízkého procenta krystalického podílu ve struktuře. Tento polymerní materiál se z obsahem krystalického podílu menším než 1% řadí mezi materiály amorfni. Je charakterizován dobrými tokovými vlastnostmi, vysokou mechanickou pevností, tvrdostí povrchu, odolností proti okolnímu prostředí ale také vysokou propustností světla a průhledností. Zejména pro svou průhlednost se PMMA používá nejčastěji jako náhražka skla např. kryty přístrojů, svítilny, hodinové sklíčka, optické a měkké kontaktní čočky.

Tab. 6.11 Vybrané vlastnosti PMMA – Plexiglas 8N [21]

Vlastnosti	PMMA
Hustota (23°C) [g/cm ³]	1,19
Teplota tání [°C]	220-260
Mez pevnosti v tahu [MPa]	77
Mez pevnosti v ohybu [MPa]	100
Modul pružnosti v tahu [MPa]	3300

6.4.5 PC – Calibre 303EP-22

Jako druhý zástupce amorfních polymerních materiálů byl zvolen polykarbonát. Tento materiál se stejně jako PMMA silně uplatňuje v automobilovém průmyslu, zejména u předních světlometů aut či jiné náhražky organického skla. Jeho výhodné vlastnosti jsou velmi podobné materiálu PMMA. Použití nacházejí rovněž jako kryty strojních zařízení, zastřešení zahrad a bazénů, náročné díly čerpadel, ventilů, větráků, ovládacích tlačítek ale také u optických přístrojů, kde se používají pro konstrukční díly kamer, blesků, promítacích strojů, dalekohledů, CD nosičů aj. Základní vlastnosti tohoto materiálu jsou vypsány v Tab. 6.12.

Tab. 6.12 Vybrané vlastnosti PC – Calibre 303EP-22 [35]

Vlastnosti	PC
Hustota (23°C) [g/cm ³]	1,2
Teplota tání [°C]	170
Mez pevnosti v tahu [MPa]	60
Mez pevnosti v ohybu [MPa]	97
Modul pružnosti v tahu [MPa]	2300

6.5 Technologické podmínky vstřikování

Technologické podmínky vstřikování jsou velmi důležitým parametrem ovlivňujícím nejen jakost povrchu polymerního výrobku, ale také jeho budoucí vlastností, správnosti rozměru, možné vady výstřiku či v neposlední řadě rychlost vstřikovacího cyklu, která se promítá ve výsledné ceně polymerního výrobku.

Technologické podmínky se odvíjejí od možnosti vstřikovacího stroje ALLROUNDER 470H (Obr. 6.8), jehož základní parametry jsou popsány v Tab. 6.13, ale také v závislosti na typu použitého polymerního materiálu.



Obr. 6.8 Vstřikovací stroj Arburg ALLROUNDER 470H [2]

Tab. 6.13 Základní parametry vstřikovacího stroje ALLROUNDER 470H [2]

Uzavírací síla	1000 [kN]
Min/max. výška formy	250 / 500 [mm]
Max. vzdálenost mezi upínacími deskami	350 [mm]
Maximální hmotnost formy	760 [kg]
Rozměr upínacích desek	637 x 637 [mm]
Vzdálenost mezi vodícími sloupy	470 x 470 [mm]
Maximální vstřikovací tlak	153 [MPa]
Vstřikovací rychlost	170 [mm/s]
Maximální hmotnost vstřikované dávky	232 [g]
Maximální objem vstřikované dávky	254 [cm ³]
Průměr šneku	40 [mm]
Zdvih šneku	160 [mm]
Poměr šneku L/D	18 [-]
Maximální tlak hydraulického systému stroje	158 [MPa]
Rozměry vstřikovacího stroje (d x š x v)	4030x1645x2050 [mm]
Hmotnost stroje (bez oleje)	4900 [kg]

Z důvodu použití některých hydrofilních materiálů bylo nutné polymerní materiály před samotným vstřikováním důkladně vysušit. Tato operace probíhala na sušičce Thermolift 100-2 (Obr. 6.9). Teplota a délka sušení byla pro jednotlivé materiály velmi odlišná a závisela na typu polymerního materiálů.



Obr. 6.9 Sušička Thermolift 100-2

Tato sušička pracuje s recirkulací čerstvého vzduchu, ale také s přívodem čerstvého vzduchu. Velkou výhodou je možnost použití sušičky kontinuálně se vstřikovacím strojem, kdy je polymerním materiál dodáván do násypky pneumaticky přímo ze sušičky.

6.5.1 Vliv technologických podmínek

V tomto experimentu byly měněny tři základní důležité parametry technologických podmínek: **vstřikovací tlak, vstřikovací rychlost a dotlak.**

Vstřikovací tlak

Vstřikovací tlak lze na stroji ALLROUNDER 470H nastavit až do hodnoty 158 MPa. Vstřikovací tlaky byly tedy testovány od minimálních hodnot, kdy docházelo k plnému zatečení polymerní taveniny do dutiny formy a výrobek tak neobsahoval žádné vady, až po maximální hodnotu, při které nedocházelo k přetokům taveniny do dělicí roviny. Minimální hodnota, kdy byl výrobek kompletní a bez vad či nedotečení, byla stanovena na hodnotu **30 MPa**. Naopak nejvyšší hodnota tlaku, kdy materiál nepřetékal do dělicí roviny u použité vstřikovací formy, byla stanovena na **60 MPa**. Použitím vyšších hodnot tlaku docházelo při použití zvoleného materiálu ABS k velkým přetokům do dělicí roviny a vadám na povrchu výrobku. Pro lepší porovnání vlivu vstřikovacího tlaku byla stanovena hodnota **45 MPa**.

Vstřikovací rychlost

Vstřikovací rychlost lze na použitém vstřikovacím stroji měnit až na hodnotu 170 mm/s. Vysoká vstřikovací rychlost může nicméně nepříznivě ovlivnit vzhled a jakost povrchu polymerního výrobku.

Pro tento experiment byly použity tři odlišné vstřikovací rychlosti, přičemž zbylé technologické podmínky byly shodné. Nejnižší hodnota, při níž došlo k vy-
stříknutí kvalitního výrobku, byla stanovena na **20 mm/s**. Nejvyšší hodnota, při
které nedocházelo ke spálení výstřiku na povrchu, byla po řadě testů ustavena na
hodnotu **120 mm/s**. I v tomto experimentu byla stanovena třetí hodnota vstřiko-
vací rychlosti z důvodu kvalitnějšího vyhodnocení tohoto vlivu a to hodnota
70 mm/s.

Dotlak

Dotlak při vstřikování silně ovlivňuje nejen jakost povrchu, ale také celistvost
a vysokou kvalitu rozměrů polymerního výrobku. V praxi bývá dotlak volen
mírně nižší případně stejně vysoký jako je nastaveny vstřikovací tlak (viz. Obr.
3.2). Z tohoto důvodu byl použit nejvyšší možný vstřikovací tlak, při němž ne-
docházelo k přetokům, a hodnoty dotlaku pak byly nastaveny podobně jako vstři-
kovací tlak a to na hodnoty **60 MPa, 45 MPa a 30 MPa**.

Technologické podmínky pro materiál ABS Magnum 3453, které byly pro
všechny tyto změny shodné, jsou zobrazeny v Tab. 6.14.

*Tab. 6.14 Nastavení technologických podmínek – vliv technologických
podmínek*

Parametr	Změna tlaku			Změna dotlaku	Změna vstř. rychl.
Vstřikovací tlak [MPa]	30	45	60	60	45
Velikost dotlaku [MPa]	30			30 45 60	45
Vstřikovací rychlost [mm.s ⁻¹]	70			70	20 70 120
Doba chlazení [s]	30			30	30
Dráha dávkování [mm]	18			18	18
Dráha přepnutí [mm]	8			8	8
Uzavírací síla [kN]	1000			1000	1000
Doba dotlaku [s]	10			10	10
Doba vstřikování [s]	0,21			0,21	0,21
Doba cyklu [s]	56			56	56
Teplota pod násypkou [°C]	40			40	40
Teplota zóny 2 [°C]	190			190	190
Teplota zóny 3 [°C]	200			200	200
Teplota zóny 4 [°C]	205			205	205
Teplota zóny 5 [°C]	210			210	210
Teplota zóny 6 [°C]	220			220	220
Teplota trysky [°C]	230			230	230
Teplota sušení [°C]	80			80	80
Doba sušení [s]	8			8	8

6.5.2 Vliv indexu toku taveniny

U tohoto experimentu byly použity celkem tři polymerní materiály lišící se indexem toku taveniny. Z důvodu vhodného porovnání zvolených materiálů byly vybrány materiály stejného typu – ABS Magnum. Pro všechny tři materiály tak mohly být nastaveny identické technologické podmínky vstřikování, které jsou vypsány v Tab. 6.15.

Tab. 6.15 Nastavení technologických podmínek vstřikování – vliv ITT

Parametr	Změna ITT
Vstřikovací tlak [MPa]	60
Velikost dotlaku [MPa]	60
Vstřikovací rychlost [mm.s ⁻¹]	70
Doba chlazení [s]	30
Dráha dávkování [mm]	18
Dráha přepnutí [mm]	8
Uzavírací síla [kN]	1000
Doba dotlaku [s]	10
Doba vstřikování [s]	0,21
Doba cyklu [s]	56
Teplota pod násypkou [°C]	40
Teplota zóny 2 [°C]	190
Teplota zóny 3 [°C]	200
Teplota zóny 4 [°C]	205
Teplota zóny 5 [°C]	210
Teplota zóny 6 [°C]	220
Teplota trysky [°C]	230
Teplota sušení [°C]	80
Doba sušení [s]	8

6.5.3 Vliv materiálu tvarové dutiny a nadmolekulární struktury

Pro tyto dva experimenty byly použité shodné polymerní materiály, které byly vstříkovány do tvarových dutin z odlišného nástrojového materiálu (ocel, dural, měď). Z důvodu zjištění jejich vlivu a to zejména vlivu tepelné vodivosti, byly pro všechny materiály tvarových dutin použity shodné technologické podmínky vstříkování, které jsou vypsány v Tab. 6.16.

Tab. 6.16 Nastavení technologických podmínek vstříkování – vliv ITT

Parametr	PMMA	PC	PA66	PP
Vstříkovací tlak [MPa]	60	60	60	60
Velikost dotlaku [MPa]	60	60	60	60
Vstříkovací rychlost [mm.s ⁻¹]	70	70	70	70
Doba chlazení [s]	30	30	30	30
Dráha dávkování [mm]	18	18	18	18
Dráha přepnutí [mm]	8	8	8	8
Uzavírací síla [kN]	1000	1000	1000	1000
Doba dotlaku [s]	10	10	10	10
Doba vstříkování [s]	0,21	0,21	0,21	0,21
Doba cyklu [s]	56	56	56	56
Teplota pod násypkou [°C]	45	75	50	30
Teplota zóny 2 [°C]	230	250	250	160
Teplota zóny 3 [°C]	240	260	260	175
Teplota zóny 4 [°C]	250	265	265	185
Teplota zóny 5 [°C]	255	270	270	195
Teplota zóny 6 [°C]	260	275	275	205
Teplota trysky [°C]	275	280	280	210
Teplota sušení [°C]	80	120	80	50
Doba sušení [s]	6	16	10	3

7 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Tato dizertační práce je rozdělena na jednotlivé části, zabývající se možností ovlivnění jakosti povrchu vstřikovaného polymerního výrobku. V první části této práce byl zkoumán vliv technologických podmínek obrábění na výslednou drsnost plastikářského nástroje, konkrétně tvarových dutin vstřikovací formy. V dalších experimentech byla již posuzována pouze drsnost povrchu výrobků z polymerních materiálů. Mezi uvažované vlivy, které mohou mít dopad na výslednou jakost výrobku, byl zahrnut vliv technologických podmínek vstřikování, vliv reologického chování polymerního materiálu (z pohledu indexu toku taveniny), vliv nadmolekulární struktury polymerního materiálu (amorfní a semikrystalické polymery) a také vliv materiálu vstřikovací formy. Jednotlivé experimenty jsou rozepsány v kapitolách.

7.1 Vliv technologických podmínek na jakost plastikářského nástroje

Tento experiment byl proveden zejména z důvodu získání tvarových dutin s různorodou drsností povrchu Ra a Rz . Z dřívějších výzkumu bylo zjištěno, že technologické podmínky obráběcích či dokončovacích operací mají značný vliv na výslednou integritu povrchu nástrojů a to i z hlediska drsnosti povrchu. Technologické podmínky obrábění tvarových dutin byly zvoleny a posuzovány z hlediska dosažení předem požadovaných drsností povrchu tvarových dutin, u kterých bude v další fázi experimentu zkoumán přenos profilu povrchu na vstřikované polymerní vzorky. V této práci byl zkoumán rovněž vliv materiálu vstřikovací formy na jakost povrchu polymerního výrobku. Z tohoto důvodu bylo nutné vyrobít nejen ocelové tvarové dutiny, ale také dutiny z neželezných kovů (slitina mědi a hliníku), které mají odlišnou teplotní vodivost. Popsané použité dokončovací operace a technologické podmínky pro jednotlivé materiály jsou popsány v kapitolách 7.1.1, 7.1.2 a 7.1.3.

7.1.1 Ocel ČSN 19552.4 (EN 1.2343)

Dokončovací operace a technologické podmínky:

Tvarová dutina č. 1

- Soustruženo s užitím procesní kapaliny:
hloubka řezu $a_p = 0,10$ mm; posuv $f = 0,01$ mm/ot; $n = 250$ ot/min
- Broušeno broušícími hranoly Minimo se zrnitostí 1200, 900 a 600
- Lapováno lapovací pastou JOKE Magic o velikosti zrna 45 a 25 μm
- Leštěno vatou s pastou Novapax s velikostí zrna 5 μm , 1 μm a 0,5 μm
– $n = 1200$ ot/min
- Celková doba výroby cca 4 hodiny

Tvarová dutina č. 2

- Soustruženo s užitím procesní kapaliny:
hloubka řezu $a_p = 0,10$ mm; posuv $f = 0,01$ mm/ot; $n = 250$ ot/min
- Broušeno broušícími kameny se zrnitostí 1200, 900 a 600
- Lapováno lapovací pastou JOKE Magic o velikosti zrna 15 μm
- Lapováno lapovací pastou JOKE Magic o velikosti zrna 7 μm
- Celková doba výroby cca 2 hodiny

Tvarová dutina č. 3

- Broušeno s vyjiskřováním a užitím procesní kapaliny:
hloubka řezu $a_p = 0,005$ mm; posuv $v_f = 7$ m/min; řezná rychlost $v_c = 29,4$ m/s
- Broušeno broušícím papírem Klingspor P2000 zrnitosti 2000 za přítomnosti procesní kapaliny
- Lapováno lapovací pastou JOKE Magic o velikosti zrna 15 μm
- Celková doba výroby cca 1 hodina

Tvarová dutina č. 4

- Broušeno s vyjiskřováním a užitím procesní kapaliny:
hloubka řezu $a_p = 0,005$ mm; posuv $v_f = 7$ m/min; řezná rychlost $v_c = 29,4$ m/s
- Leštěno plstí s leštící pastou Novapax 20 μm . – $n = 1200$ ot/min
- Celková doba výroby cca 0,5 hodiny

Tvarová dutina č. 5

- Broušeno s vyjiskřováním a užitím procesní kapaliny:
hloubka řezu $a_p = 0,005$ mm; posuv $v_f = 7$ m/min; řezná rychlost $v_c = 29,4$ m/s
- Broušeno broušícím papírem Klingspor P2000 zrnitosti 2000 za přítomnosti procesní kapaliny - $n = 1200$ ot/min
- Celková doba výroby cca 20 minut

Tvarová dutina č. 6 až 10

Funkční plocha tvarových dutin byla dokončena pouze pomocí technologie soustružení. Celková doba výroby funkční plochy byla cca 10 minut. Při použití odlišných technologických podmínek při soustružení došlo k vytvoření pěti odlišných povrchů s různou drsností Ra a Rz . Zvolené technologické podmínky soustružení jsou vypsány v Tab. 7.1.

Tab. 7.1 Technologické podmínky dokončování funkční plochy soustružením

Materiál		Ocel ČSN 19552.4				
Číslo tvarové dutiny		6	7	8	9	10
Axiální šířka záběru	a_p [mm]	0,10	0,10	0,10	0,30	0,10
Posuv	f [mm/ot]	0,01	0,04	0,16	0,15	0,32
Otáčky	n [1/min]	250	125	125	125	125
Procesní kapalina		MICROTREND 217 M	-	-	-	-



Obr. 7.1 Vyrobené tvarové dutiny

Parametry drsností R_a a R_z změřené pomocí 2D dotykového profiloměru byly statisticky vyhodnoceny pomocí mediánů a jsou uvedeny v Tab. 7.2. Zejména hodnoty drsností prvních tří tvarových dutin byly kontrolovány pomocí 3D drsnoměru, neboť jejich kvalita je na hranici rozlišení 2D profiloměru.

Tab. 7.2 Dosažené drsnosti R_a a R_z ocelových tvarových dutin

Dutina č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_a [μm]	0,007	0,010	0,041	0,099	0,126	0,199	0,531	1,290	2,902	3,456
Sm. odch.	0,001	0,001	0,008	0,004	0,009	0,011	0,031	0,047	0,039	0,083
R_z [μm]	0,079	0,086	0,309	0,725	1,047	1,401	3,715	6,389	12,074	15,650
Sm. odch.	0,017	0,011	0,060	0,053	0,151	0,106	0,333	0,362	0,162	0,545

Lze vidět, že drsnost povrchu nástroje je silně závislá na použitých technologických podmínkách. Při soustružení ovlivnily výslednou jakost zejména axiální šířka záběru, otáčky a velikost posuvu. Použití procesní kapaliny vedlo rovněž ke zlepšení jakosti povrchu. Při výrobě tvarových vložek 1 až 5 se lišily použité technologie obrábění a je tedy zřejmé, že kvalita povrchu je nejvyšší u tvarových dutin leštěných. Přidané dokončovací operace nicméně zvyšují výslednou celkovou dobu výroby tvarové dutiny, ale také zvyšují náklady na výrobu.

Všechny naměřené hodnoty byly zkontrolovány, zda pochází ze základního souboru s normálním rozdělením.

Použitá metoda: **Anderson -Darling**

H_0 : Data pochází ze základního souboru s normálním rozdělením

H_A : Data pochází z jiného souboru s jiným rozdělením s možností omylu $1 - \alpha = 0,05$

Tab. 7.3 Test normality Anderson-Darling pro ocelové tvarové dutiny

Číslo vzorků	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota P pro R_a	0,107	0,143	0,480	0,595	0,148	0,889	0,232	0,069	0,398	0,568
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Hodnota P pro R_z	0,148	0,790	0,598	0,159	0,114	0,250	0,643	0,240	0,402	0,425
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0

Hodnota pravděpodobnosti všech souborů $P > \alpha \Rightarrow$ nezamítám H_0 . Lze tedy říci, že naměřená data pochází ze základního souboru a mají normální rozdělení s pravděpodobností omylu $1 - \alpha = 0,05$.

7.1.2 Dural ČSN 424222 (EN AW-7075)

Tento materiál byl použit z důvodu vyšší tepelné vodivosti. V porovnání s ocelí je tepelná vodivost vyšší přibližně třikrát. Použitím netemperované vstříkovací formy, tak může docházet k významným rozdílům v jakosti polymerních výrobků.

Dokončovací operace a technologické podmínky:

Tvarová dutina č. 1

- Soustruženo s užitím procesní kapaliny:
hloubka řezu $a_p = 0,10$ mm; posuv $f = 0,01$ mm/ot; $n = 250$ ot/min
- Broušeno brousicími hranoly Minimo se zrnitostí 1200, 900 a 600
- Lapováno lapovací pastou JOKE Magic o velikosti zrna 45 a 25 μm
- Leštěno vatou s pastou Novapax s velikostí zrna 5 μm , 1 μm a 0,5 μm
– $n = 2800$ ot/min
- Celková doba výroby cca 4 hodiny

Tvarová dutina č. 2

- Soustruženo s užitím procesní kapaliny:
hloubka řezu $a_p = 0,10$ mm; posuv $f = 0,01$ mm/ot; $n = 250$ ot/min
- Broušeno brousicími kameny se zrnitostí 1200, 900 a 600
- Lapováno lapovací pastou JOKE Magic o velikosti zrna 15 μm
- Lapováno lapovací pastou JOKE Magic o velikosti zrna 7 μm
- Celková doba výroby cca 2 hodiny

Tvarová dutina č. 3

- Broušeno s vyjiskřováním a užitím procesní kapaliny:
hloubka řezu $a_p = 0,005$ mm; posuv $v_f = 7$ m/min; řezná rychlost $v_c = 29,4$ m/s
- Broušeno broušicím papírem Klingspor P2000 zrnitosti 2000 za přítomnosti procesní kapaliny
- Lapováno lapovací pastou JOKE Magic o velikosti zrna 15 μm
- Celková doba výroby cca 1 hodina

Tvarová dutina č. 4

- Broušeno s vyjiskřováním a užitím procesní kapaliny:
hloubka řezu $a_p = 0,005$ mm; posuv $v_f = 7$ m/min; řezná rychlost $v_c = 29,4$ m/s
- Leštěno plstí s leštící pastou Novapax 20 μm . – $n = 1200$ ot/min
- Celková doba výroby cca 0,5 hodiny

Tvarová dutina č. 5

- Broušeno s vyjiskřováním a užitím procesní kapaliny:
hloubka řezu $a_p = 0,005$ mm; posuv $v_f = 7$ m/min; řezná rychlost $v_c = 29,4$ m/s
- Broušeno broušicím papírem Klingspor P2000 zrnitosti 2000 za přítomnosti procesní kapaliny
- Celková doba výroby cca 20 minut.

Tvarová dutina č. 6 - 10

Všechny tvarové dutiny číslo 6 až 10 byly dokončeny pouze pomocí technologie soustružení. Z důvodu určení vlivu technologických podmínek obrábění na jakost povrchu nástroje, se tyto podmínky pro jednotlivé tvarové dutiny lišily. Použité technologické podmínky jsou vypsány v Tab. 7.4. Celková doba výroby byla cca 10 minut.

Tab. 7.4 Technologické podmínky soustružení tvarových dutin z duralu

Materiál		Dural 424222				
Číslo tvarové dutiny		6	7	8	9	10
Axiální šířka záběru	a_p [mm]	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Posuv	f [mm/ot]	0,01	0,04	0,15	0,19	0,24
Otáčky	n [1/min]	250	125	125	125	125
Procesní kapalina		MICROTREND 217 M				



Obr. 7.2 Duralové tvarové dutiny

Obdobně jako u ocelových tvarových dutin, i při obrábění duralových tvarových dutin, byla jakost povrchu silně závislá na zvolených technologických podmínkách. Snahou při volbě technologických podmínek bylo dosažení podobných drsností povrchu Ra a Rz jako u ocelových tvarových dutin. Změnou technologických podmínek bylo dosaženo hodnot drsnosti povrchu Ra a Rz , které jsou srovnatelné s ocelovými dutinami a jsou vyjádřeny pomocí mediánu v Tab. 7.5. I v případě duralových dutin byly hodnoty drsností Ra a Rz prvních tří dutin kontrolovány pomocí 3D drsnoměru.

Tab. 7.5 Dosažené drsnosti Ra a Rz duralových tvarových dutin

Dutina č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	0,010	0,013	0,024	0,067	0,108	0,158	0,618	1,349	2,275	3,771
Sm. odch.	0,001	0,001	0,003	0,007	0,006	0,009	0,019	0,103	0,072	0,060
Rz [μm]	0,114	0,172	0,210	0,888	1,018	1,056	3,219	7,110	10,124	15,320
Sm. odch.	0,014	0,039	0,020	0,111	0,161	0,103	0,151	0,345	0,225	0,660

Všechny naměřené hodnoty byly zkontrolovány, zda pochází ze základního souboru s normálním rozdělením.

Použitá metoda: **Anderson -Darling**

H_0 : Data pochází ze základního souboru s normálním rozdělením

H_A : Data pochází z jiného souboru s jiným rozdělením s možností omylu $1 - \alpha = 0,05$

Tab. 7.6 Test normality – Anderson-Darling pro duralové tvarové dutiny

Číslo vzorků	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota P pro Ra	0,706	0,696	0,806	0,893	0,387	0,198	0,508	0,053	0,970	0,219
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Hodnota P pro Rz	0,297	0,463	0,519	0,510	0,415	0,728	0,571	0,593	0,619	0,700
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0

Hodnoty pravděpodobností ($P > \alpha \Rightarrow$ nezamítám H_0) poukazují na skutečnost, že všechny soubory pochází ze základního souboru s normálním rozdělením s pravděpodobností 95%.

7.1.3 Měď ČSN 423001 (EN CW004A)

Použití tohoto materiálu bylo voleno rovněž s ohledem na vyšší tepelnou vodivost v porovnání s ocelí ale i s hliníkem. Tepelná vodivost mědi je oproti oceli až šestkrát vyšší a v porovnání s hliníkem zhruba dvakrát vyšší. Volba byla provedena také z důvodu velmi dobrých mechanických vlastností a vyhovujícím vlastnostem pro obrábění, zaručujících dosažení vysoké jakosti povrchu.

Dokončovací operace a technologické podmínky:

- **Tvarová dutina č. 1 – č. 5**

Při výrobě těchto tvarových dutin byly použity shodné technologické operace i technologické podmínky jako u výroby duralových tvarových dutin. Podrobně rozepsané použité technologické operace a podmínky jsou popsány v kapitole 7.1.2.

- **Tvarová dutina č. 6 – č. 10**

Tvarové dutiny číslo 6 až 10 byly vyrobeny soustružením za technologických podmínek uvedených v Tab. 7.7. Celková doba výroby činila cca 10 minut.

Tab. 7.7 Technologické podmínky soustružení tvarových dutin z mědi

Materiál		Měď ČSN 423001				
Číslo tvarové dutiny		6	7	8	9	10
Axiální šířka záběru	a_p [mm]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Přísuv	f [mm/ot]	0,01	0,04	0,15	0,19	0,24
Otáčky	n [1/min]	250	125	125	125	125
Procesní kapalina		MICROTREND 217 M				



Obr. 7.3 Měděné tvarové dutiny

Také jednotlivé měděné tvarové dutiny byly dokončovány odlišnými technologickými podmínkami a dokončovacími operacemi za účelem dosažení předem požadovaných parametrů drsností povrchu Ra a Rz , které se měly co nejvíce podobat jakostem povrchu dosaženým u ocelových a duralových tvarových dutin.

Hodnoty mediánů parametrů drsnosti Ra a Rz, které byly naměřeny pomocí 2D profiloměru jsou vypsány v Tab. 7.8. Tvarové dutiny č. 1 až 3 dosahují u tohoto materiálu hodnot, které jsou na hranici rozlišitelnosti 2D profiloměru. Tyto tvarové dutiny proto byly proměřeny a zkontrolovány pomocí bezkontaktní metody, která odhalila, že naměřené hodnoty 2D a 3D spolu velmi dobře korelují a potvrdila správnost 2D měření.

Tab. 7.8 Dosažené drsnosti Ra a Rz měděných tvarových dutin

Dutina č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	0,008	0,013	0,039	0,085	0,109	0,161	0,559	1,847	2,476	4,304
Sm. odch.	0,001	0,002	0,004	0,010	0,004	0,008	0,006	0,013	0,017	0,096
Rz [μm]	0,064	0,148	0,305	0,519	0,799	1,446	2,702	6,778	10,527	19,362
Sm. odch.	0,013	0,042	0,055	0,131	0,135	0,240	0,164	0,148	0,079	1,019

Při porovnání Tab. 7.2, Tab. 7.5 a Tab. 7.8 lze vidět, že shodně označené tvarové dutiny (č. 1 až č. 10) mají velmi podobnou drsnost povrchu, lišící se zejména u vysoce kvalitních tvarových dutiny (č. 1 - č. 5) pouze v desetínách či setinách mikrometru.

Všechny naměřené hodnoty byly zkontrolovány, zda pochází ze základního souboru s normálním rozdělením.

Použitá metoda: **Anderson -Darling**

H_0 : Data pochází ze základního souboru s normálním rozdělením

H_A : Data pochází z jiného souboru s jiným rozdělením s možností omylu $1 - \alpha = 0,05$

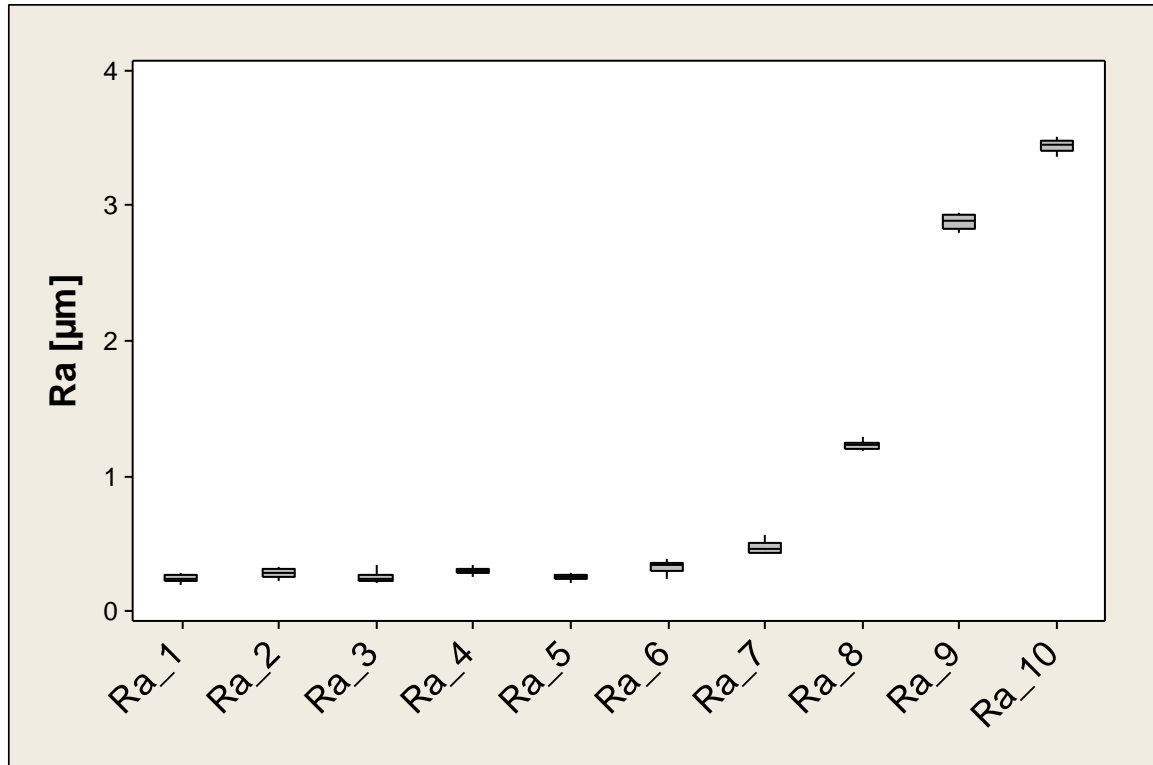
Tab. 7.9 Test normality – Anderson-Darling pro měděné tvarové dutiny

Číslo vzorků	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota P pro Ra	0,755	0,287	0,242	0,112	0,885	0,631	0,785	0,291	0,281	0,820
Platná hypotéza	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀
Hodnota P pro Rz	0,219	0,913	0,978	0,415	0,333	0,438	0,416	0,580	0,774	0,824
Platná hypotéza	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀

Kontrola normálního rozdělení poukázala na to, že všechny soubory pochází ze základního rozdělení neboť $P > \alpha \Rightarrow$ nezamítám H_0 .

7.2 Vliv jakosti povrchu tvarové dutiny na jakost povrchu polymerního výrobku

Po výrobě ocelových tvarových dutin byly zhotoveny polymerní vzorky z materiálu ABS MAGNUM 3453, u kterých byly měřeny parametry drsnosti Ra a Rz . V první řadě byly hodnoty naměřených dat kontrolovány na odlehlé hodnoty.



Obr. 7.4 Boxplotový diagram – kontrola odlehlých hodnot – ABS 3453

Jak lze z boxplotového diagramu vidět, žádná z naměřených hodnot nebyla programem MINITAB vyhodnocena a zobrazena jako odchýlená hodnota. Všechny následující naměřená data byla touto metodou zkontrolována se stejným výsledkem. Lze tedy říci, že při měření nedošlo k chybě zápisu či měření.

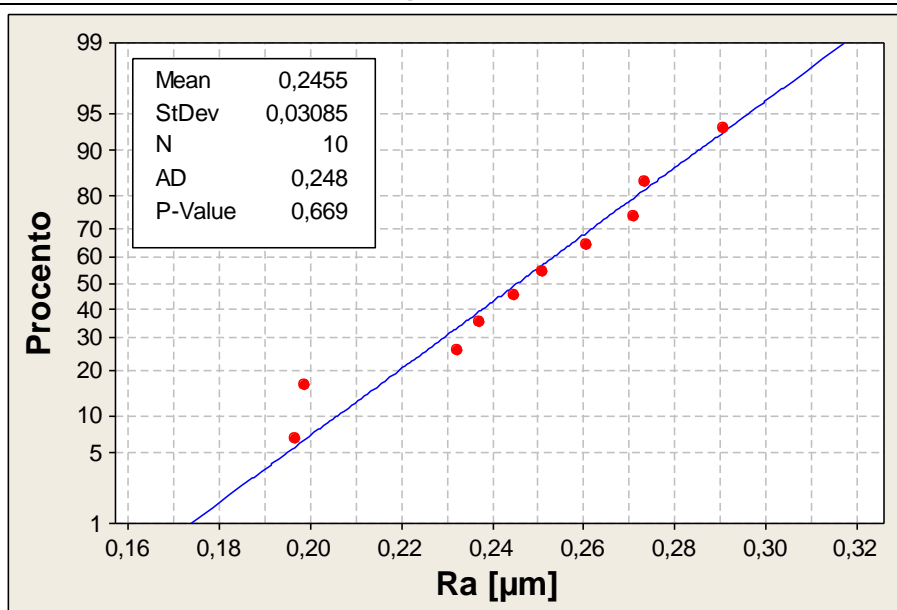
7.2.1 Test normality

Po kontrole na odlehlé hodnoty následoval test normality:

Použitá metoda: **Anderson -Darling**

H_0 : Data pochází ze základního souboru s normálním rozdělením

H_A : Data pochází z jiného souboru s jiným rozdělením s možností omylu $1 - \alpha = 0,05$



Obr. 7.5 Test normality Anderson-Darling pro ABS 3453

Obr. 7.5 zobrazuje hodnotu pravděpodobnosti P normálního rozdělení, která se rovná 0,669. Hodnota $P > \alpha \Rightarrow$ nezamítám H_0 s pravděpodobností 95%. Je tedy zřejmé, že tento soubor je základní a pochází z normálního rozdělení. Hodnoty pravděpodobnosti pro ostatní soubory v tomto experimentu jsou vypsány v Tab. 7.10.

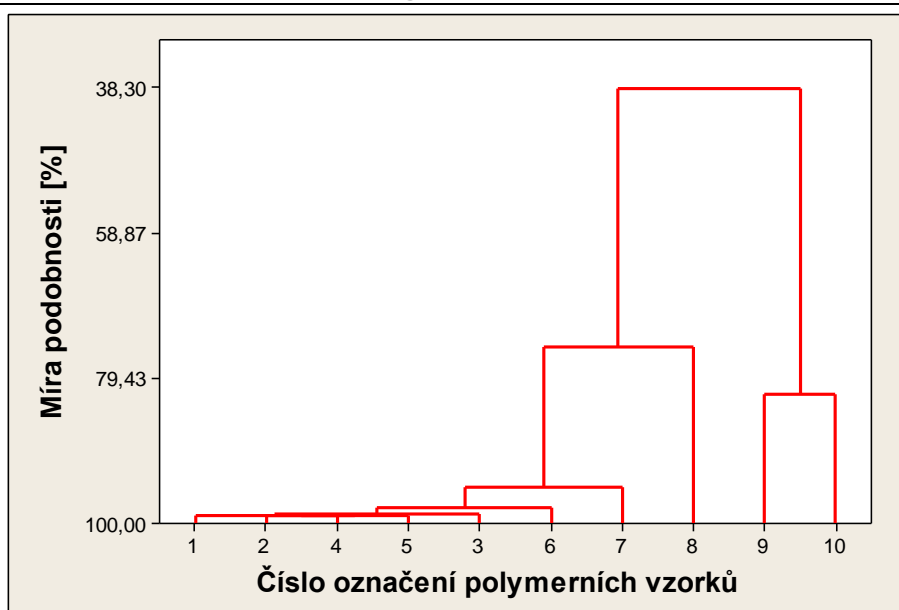
Tab. 7.10 Hodnoty pravděpodobnosti P (normální rozdělení) pro ABS 3453

Číslo vzorků	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota P pro R_a	0,669	0,804	0,189	0,231	0,585	0,641	0,255	0,417	0,378	0,150
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Hodnota P pro R_z	0,665	0,734	0,132	0,132	0,654	0,850	0,569	0,268	0,869	0,503
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0

Z tabulky lze vidět, že všechny soubory splnily podmínku $P > \alpha$ a lze tedy tvrdit, že všechny tyto soubory jsou základní s normálním rozdělením s pravděpodobností 95%.

7.2.2 2D hodnocení drsnosti povrchu

Po kontrole odlehých hodnot a testu normálního rozdělení následovalo statistické vyhodnocení dat. Pro zjištění podobnosti souborů a určení vlivu jakosti povrchu tvarové dutiny na jakost povrchu polymerních výrobků byl použit dendrogram s využitím mediánů a Euklidianovy metody (Obr. 7.6). Tento způsob vyhodnocení dendrogramů byl aplikován pro všechny následující vyhodnocené dendrogramy.



Obr. 7.6 Dendrogram vlivu jakosti povrchu tvarové dutiny

Z tohoto dendrogramu lze pozorovat, že míra podobnosti jednotlivých souborů je velmi vysoká u polymerních vzorků vyrobených pomocí leštěných, lapovaných a broušených tvarových dutin (č. 1 - 5). Pro tyto soubory se celková míra shody rovná 98,8372 %. Největší míru shody pak dosahují soubory 2, 4 a 5, která činí shodu 98,8741 %. Při použití tvarových dutin s označením 6 - 10 již míra shody klesá. Pro další posouzení tak bude nejdůležitější porovnat drsnost povrchu Ra polymerních vzorků při použití tvarových dutin č. 1 až č. 5. Pro srovnání průměrů jednotlivých souborů byla zvolena metoda ANOVA, pro jejíž použití jsou nutné dvě podmínky:

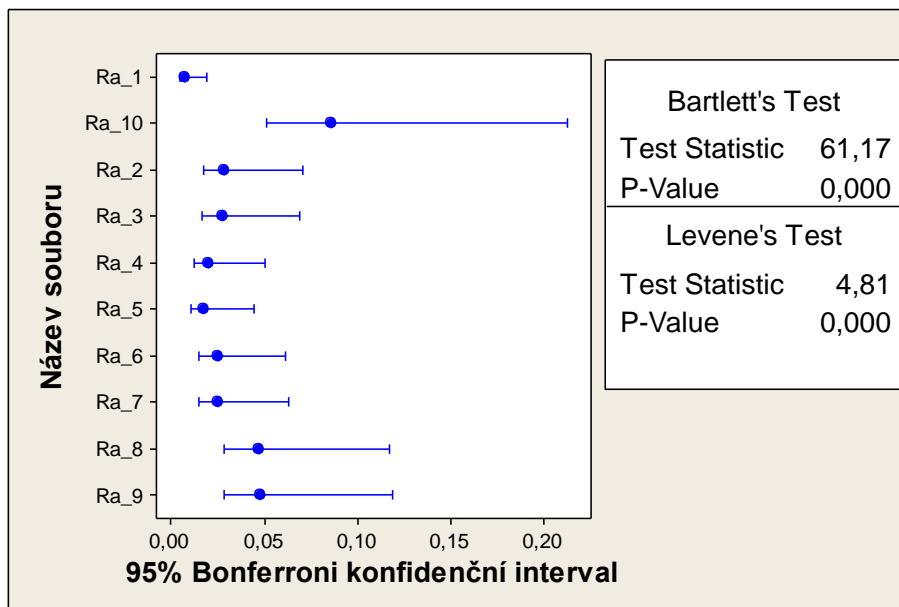
1. Data musí pocházet z normálního rozdělení
2. Rovnost rozptylů jednotlivých souborů

První podmínka byla splněná výše v kapitole 7.2.1. Pro druhou podmínku byla stanovena nulová hypotéza:

$$H_0 = \sigma_{Ra(Rz)-1}^2 = \sigma_{Ra(Rz)-2}^2 = \dots = \sigma_{Ra(Rz)-10}^2 \quad (5)$$

$$H_A = NON$$

Tato hypotéza byla testována pomocí Bartletova a Levenosova testu:



Obr. 7.7 Test rovnosti rozptylů pro ABS 3453

Jelikož hodnota pravděpodobnosti P je u obou testů nižší než 0,05, zamítám hypotézu H_0 ve prospěch alternativní hypotézy H_A s možností omylu $\alpha = 5\%$. Nelze tedy postupovat metodami parametrickými. Z tohoto důvodu byla pro další statistické hodnocení vybrána neparametrická metoda, založená na hodnocení mediánů.

V první fázi byly touto metodou testovány všechny soubory, tedy drsnosti povrchu Ra a Rz naměřené na polymerních vzorcích při použití tvarové dutiny č. 1 až č. 10.

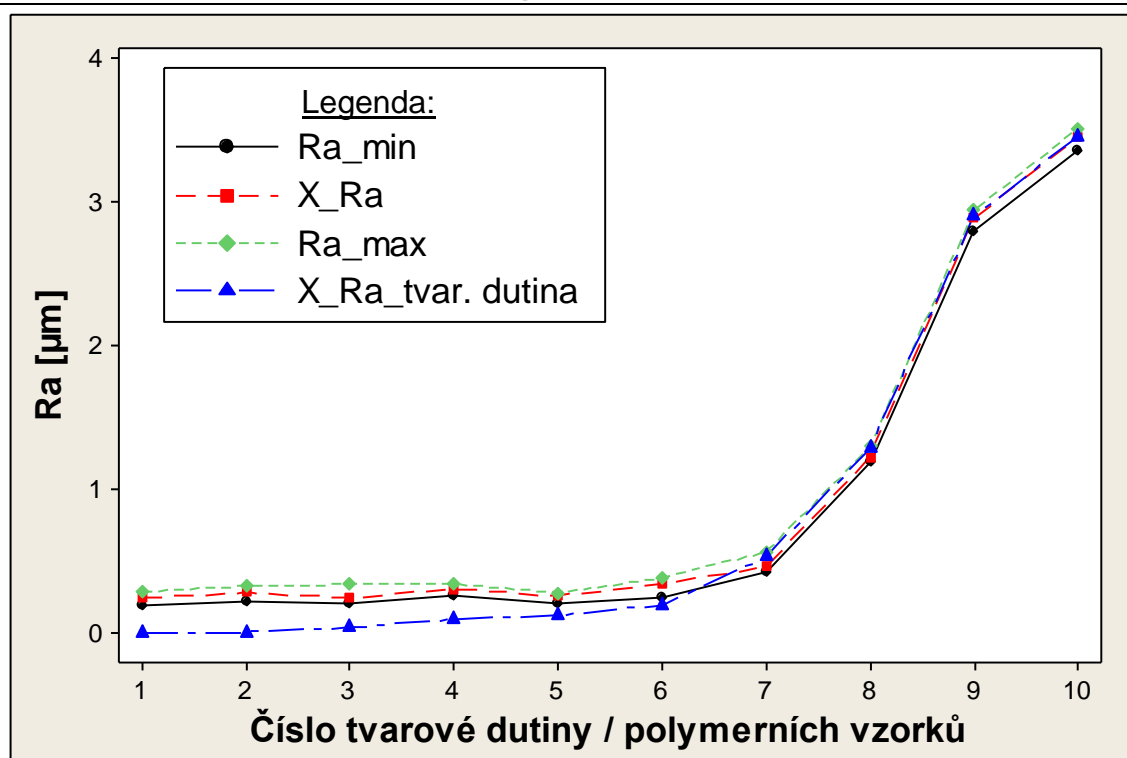
Použitá metoda: **Kruskal-Wallis**

Nulová a alternativní hypotéza:

$$H_0 = \tilde{X}_1^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_2^{Ra(Rz)} = \dots = \tilde{X}_{10}^{Ra(Rz)} \quad (6)$$

$$H_A = NON$$

V programu MINITAB 14 byl proveden neparametrický Kruskal-Wallisův test s výsledkem hodnoty $P = 0,000$. Hodnota P byla porovnána s hodnotou významnosti α , nastavenou v tomto testu na $\alpha = 0,05$. Lze tedy psát $P < \alpha$, což indikuje zamítnutí nulové hypotézy ve prospěch hypotézy alternativní s pravděpodobností 95%. Při vyhodnocení parametru Rz se stejnou nulovou hypotézou a použitím stejného testu odpovídala P hodnota rovněž 0,000. Je tedy zřejmé, že jakost povrchu tvarové dutiny ovlivňuje jakost povrchu polymerních výrobků. Tato skutečnost je rovněž viditelná v grafu závislosti drsnosti povrchu polymerního výrobku na použité tvarové dutině na (Obr. 7.8).



Obr. 7.8 Závislost drsnosti Ra polymerních výrobků na drsnosti tvarové dutiny

Jak lze z Obr. 7.8 vidět, při použití tvarových dutin s odlišnou drsností povrchu Ra dosahují polymerní vzorky rovněž odlišných drsností povrchu Ra . Při podrobném zkoumání, je možné vidět, že použitím tvarových dutin s vyšší kvalitou (nižší Ra) se drsnost povrchu polymerních výrobků začíná velmi podobat a to především u tvarových dutin č. 1 až č. 5, což potvrdil i provedený dendrogram (Obr. 7.6). Z tohoto důvodu byla předchozí nulová hypotéza modifikována a postupně byl testován menší počet souborů, jak znázorňuje Tab. 7.11.

Tab. 7.11 Kruskal-Wallisuv test pro nové nulové a alternativní hypotézy

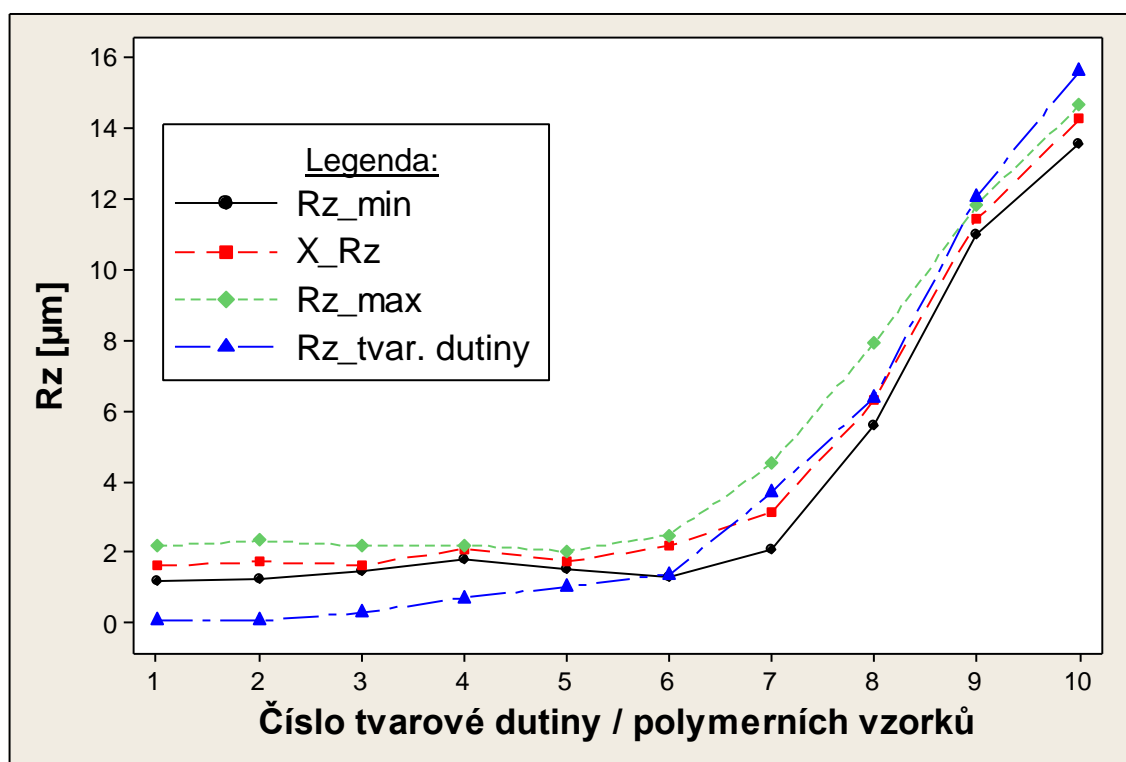
Nulová hypotéza:	Alternativní hypotéza	Výsledek
$H_0 = \tilde{X}_1^{Ra} = \tilde{X}_2^{Ra} = \dots = \tilde{X}_9^{Ra}$	$H_A = NON$	$P = 0,000 \Rightarrow P < \alpha$
$H_0 = \tilde{X}_1^{Ra} = \tilde{X}_2^{Ra} = \dots = \tilde{X}_8^{Ra}$	$H_A = NON$	$P = 0,000 \Rightarrow P < \alpha$
$H_0 = \tilde{X}_1^{Ra} = \tilde{X}_2^{Ra} = \dots = \tilde{X}_7^{Ra}$	$H_A = NON$	$P = 0,000 \Rightarrow P < \alpha$
$H_0 = \tilde{X}_1^{Ra} = \tilde{X}_2^{Ra} = \dots = \tilde{X}_6^{Ra}$	$H_A = NON$	$P = 0,000 \Rightarrow P < \alpha$
$H_0 = \tilde{X}_1^{Ra} = \tilde{X}_2^{Ra} = \dots = \tilde{X}_5^{Ra}$	$H_A = NON$	$P = 0,273 \Rightarrow P > \alpha$

Z výsledků lze vidět, že pokud je tento statistický test proveden pouze pro polymerní vzorky vyrobené pomocí tvarových dutin č. 1 až č. 5, nezamítám nulovou hypotézu a je možno tvrdit, že s pravděpodobností 95 % nezamítám rovnost mediánů drsností povrchu Ra pro polymerní vzorky č. 1 až č. 5.

Při zahrnutí ostatních polymerních vzorků (č. 6 až č. 9) do tohoto testu je z Tab. 7.11 zřejmé, že nulovou hypotézu zamítám ve prospěch hypotézy alternativní a nelze se dále bavit o rovnosti jejich mediánu.

Tento test tedy prokázal, že výsledné drsnosti povrchu polymerních vzorků při použití leštěné (č. 1) a broušené (č. 5) tvarové dutiny, jsou velmi podobné a liší se pouze odchylkou způsobenou náhodnou chybou, přičemž nelze zamítnout shodu mediánů drsností povrchu.

Ověření výsledku bylo provedeno pomocí parametru drsnosti Rz , kdy P hodnota Kruskal-Wallisova testu mezi drsnostmi povrchu polymerních výrobků při použití tvarových dutin č. 1 a č. 5, byla stanovena $P = 0,290 \Rightarrow P > \alpha$. Nelze tedy zamítnout shodu mediánů těchto dvou souborů, což lze vidět i na grafickém vyjádření v Obr. 7.9.



Obr. 7.9 Závislost drsnosti Rz polymerních výrobků na drsnosti tvarové dutiny

Tento experiment dokazuje, že i když jsou tvarové dutiny lapované a leštěné, jakost povrchu polymerních výrobků nemusí dosahovat stejných kvalit. V další části je tato dizertační práce zaměřená na posouzení určitých vlivů, které mohou zvýšit či naopak snížit drsnost povrchu Ra a Rz polymerních výrobků. V první části se tento experiment věnuje určení vlivu technologických podmínek na jakost povrchu vstříkovaných výrobků.

7.3 Vliv vstřikovacího tlaku na jakost povrchu polymerního výrobku

Tento experiment byl zkoumán při vstřikování do ocelových tvarových dutin, jejichž využití je v praxi u vstřikovacích forem nejčastější v porovnání s ostatními nástrojovými materiály. Naměřená data byla nejprve zkontrolována na odlehle hodnoty pomocí boxplotových diagramů. Ani při měření tohoto experimentu nedošlo k naměření vychýlených hodnot či chyb měření a mohlo se tak dále přejít ke kontrole normálního rozdělení.

7.3.1 Test normality

Použitá metoda: **Anderson -Darling**

H_0 : Data pochází ze základního souboru s normálním rozdělením

H_A : Data pochází z jiného souboru s jiným rozdělením s možností omylu $1 - \alpha = 0,05$

Hodnoty pravděpodobností P všech souborů jsou zobrazeny v Tab. 7.12.

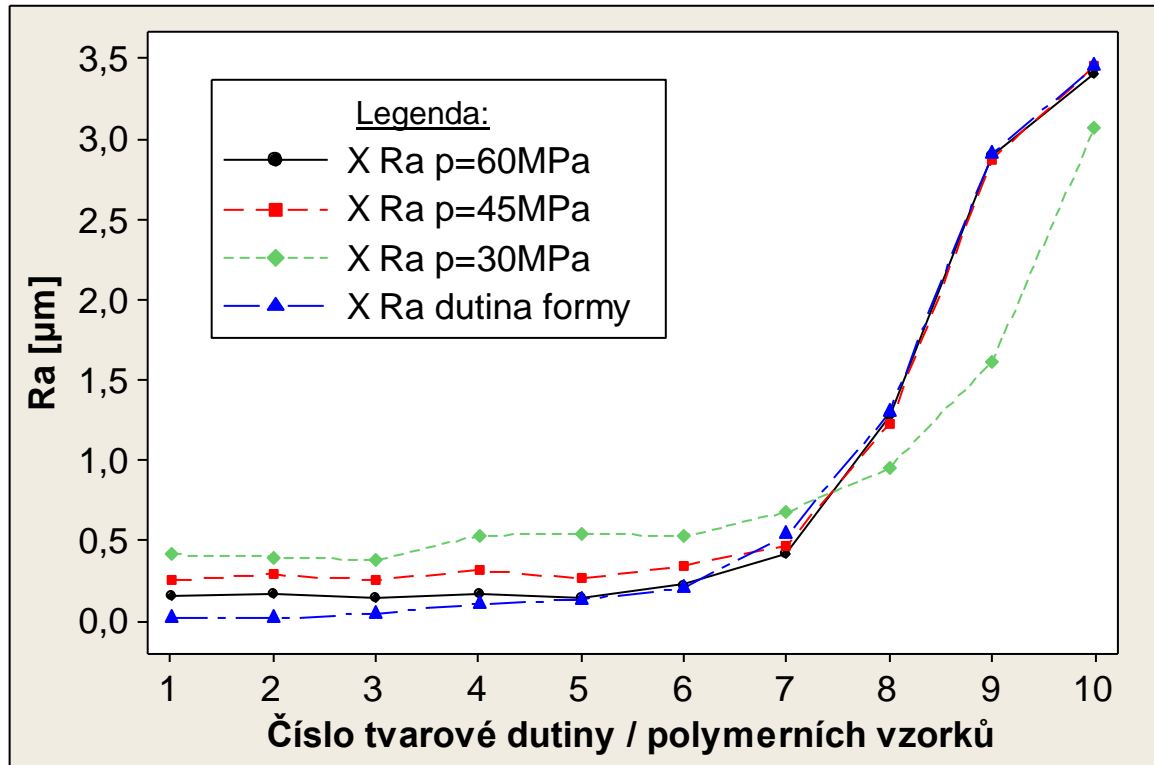
Tab. 7.12 Hodnoty pravděpodobností P pro test normality souborů Ra a Rz polymerních vzorků – vliv vstřikovacího tlaku

Č. vzorků - 30MPa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota P pro Ra	0,609	0,487	0,280	0,574	0,524	0,699	0,754	0,342	0,749	0,426
Platná hypotéza	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀
Hodnota P pro Rz	0,246	0,798	0,112	0,243	0,555	0,696	0,920	0,215	0,162	0,059
Platná hypotéza	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀
Č. vzorků - 45MPa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota P pro Ra	0,669	0,804	0,189	0,231	0,585	0,641	0,255	0,417	0,378	0,150
Platná hypotéza	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀
Hodnota P pro Rz	0,665	0,734	0,132	0,132	0,654	0,850	0,569	0,268	0,869	0,503
Platná hypotéza	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀
Č. vzorků - 60MPa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota P pro Ra	0,930	0,284	0,732	0,679	0,497	0,129	0,460	0,130	0,961	0,461
Platná hypotéza	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀
Hodnota P pro Rz	0,517	0,164	0,671	0,311	0,183	0,631	0,880	0,151	0,578	0,090
Platná hypotéza	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀	H₀

Hodnoty P všech souborů splňují podmínku pro nezamítnutí nulové hypotézy $P > \alpha$ a lze tedy tvrdit, že všechny soubory pochází ze základního souboru s normálním rozdělením s pravděpodobností 95 %.

7.3.2 2D hodnocení drsnosti povrchu

Statisticky zpracovaná data byla použita pro konstrukci grafu závislosti drsnosti povrchu Ra na vstřikovacím tlaku (Obr. 7.10).



Obr. 7.10 Závislost drsnosti povrchu Ra na změně vstřikovacího tlaku

Z grafu lze pozorovat, že hodnota vstřikovacího tlaku má jistý vliv na jakost povrchu polymerních výrobků. Při nižší hodnotě vstřikovacího tlaku není polymerní tavenina schopna kopírovat dokonalý povrch lapovaných a leštěných tvarových dutin a tyto velmi přesné dokončovací operace se tak jeví jako zbytečné. Tato skutečnost byla statisticky potvrzena pomocí dendrogramu a následného testu shodnosti mediánů. Z důvodu heterogenity rozptylů nemohla být použita metoda ANOVA a byl použit test neparametrický, hodnotící mediány jednotlivých souborů.

Použitá metoda: **Kruskal-Wallis**

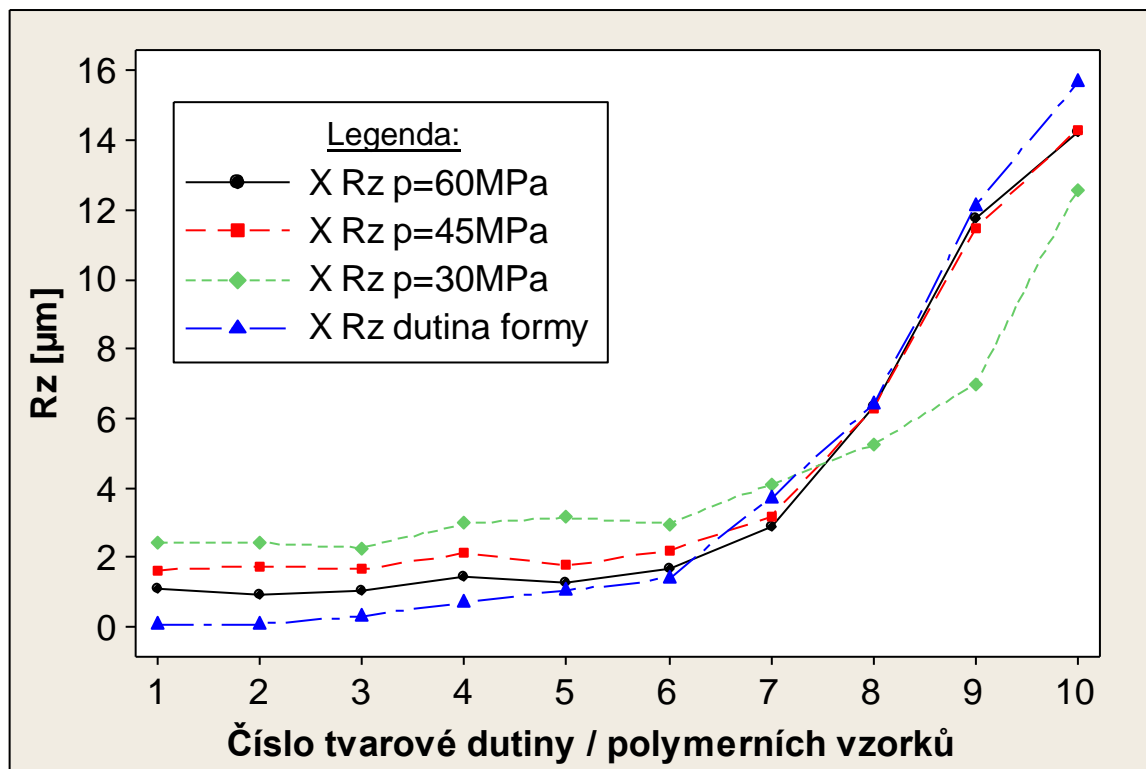
Pro každou jednotlivou tvarovou dutinu (č. 1 až č. 10) byla položena nulová hypotéza o rovnosti mediánů jednotlivých souborů:

$$H_0 = \tilde{X}_{P=30-(1-10)}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{P=45-(1-10)}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{P=60-(1-10)}^{Ra(Rz)} \quad (7)$$

$$H_A = NON$$

Hodnota pravděpodobností P byla programem MINITAB vyhodnocena na $P = 0,000$. Mohu tedy s pravděpodobností 95% tvrdit, že zamítám nulovou hypotézu o rovnosti mediánu drsností Ra polymerních vzorků, při použití odlišných vstřikovacích tlaku, ve prospěch hypotézy alternativní.

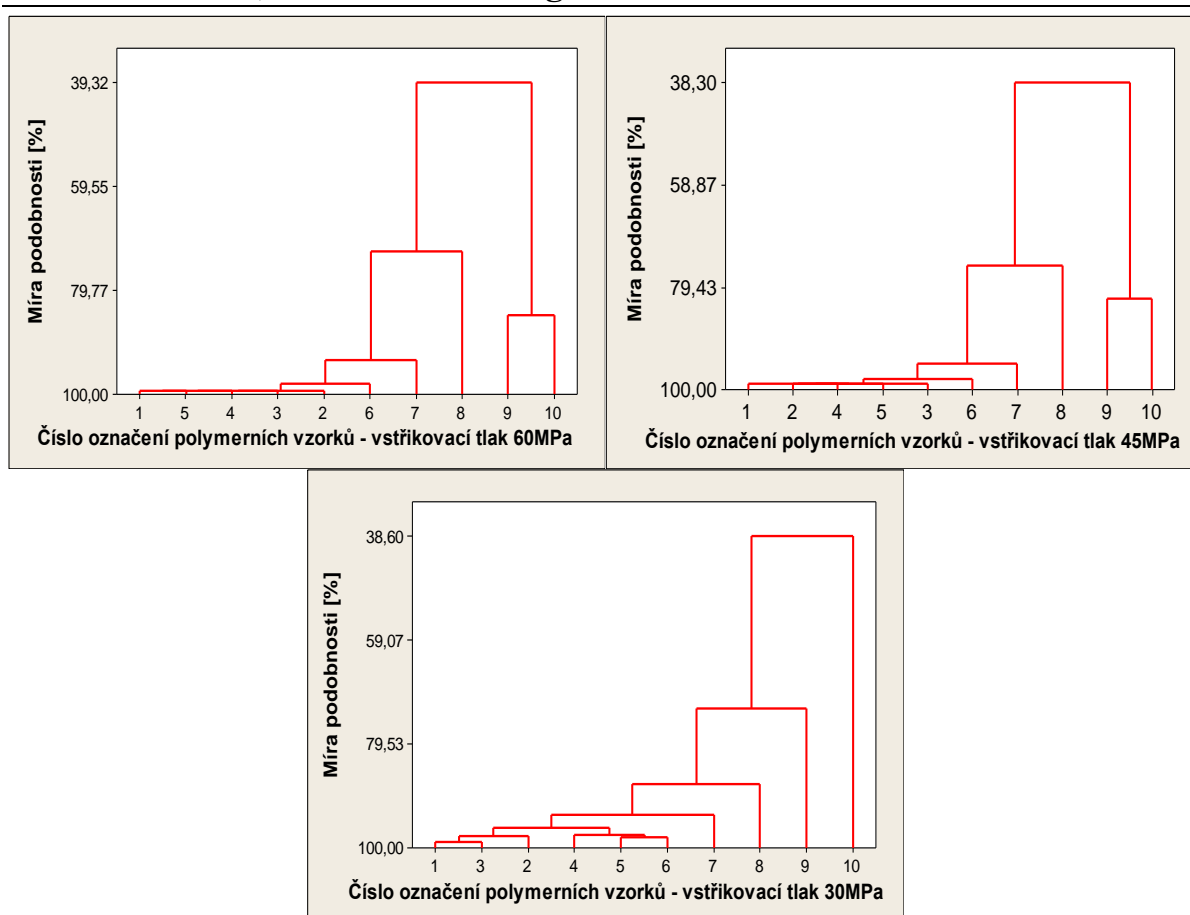
V případě použití tvarových dutin č. 2 až č. 10 byla vyhodnocena hodnota pravděpodobnosti taktéž $P = 0,000$, z čehož plyne, že opět zamítám nulovou hypotézu o rovnosti mediánů souborů. Stejných výsledku pak bylo dosaženo u parametru drsnosti Rz . Lze tedy říci, že při použití totožné tvarové dutiny je výsledná drsnost povrchu Ra a Rz polymerních výrobků odlišná, pokud použijeme různé vstřikovací tlaky. Ze statistického hlediska tak lze konstatovat, že vstřikovací tlak má významný vliv na jakost povrchu polymerního výrobku.



Obr. 7.11 Závislost drsnosti povrchu Rz na změně vstřikovacího tlaku

Stejně jako v případě hodnocení parametru Ra i u parametru Rz bylo dosaženo u nižšího tlaku (30 MPa) lepších povrchů polymerních výrobků při použití tvarových dutin s horší jakostí povrchu (č. 8 až č. 10). Tento jev je způsoben nedostatečně velkým tlakem, který nezatlačí polymerní taveninu do vyššího profilu drsnosti u soustružených tvarových dutin. Lze tak předpokládat, že v tomto případě je nižší vstřikovací tlak spíše výhodný.

Dále si lze v Obr. 7.10 a Obr. 7.11 povšimnout, že při použití materiálu ABS Magnum 3453, nedosahují polymerní výrobky zdaleka tak vysoké kvality jako tvarové dutiny a to zejména v oblasti použití lapovaných a leštěných dutin, a také že kvalita povrchu polymerních výrobků při použití leštěné a broušené tvarové dutiny je velmi podobná. Z tohoto důvodu byly zkonstruovány dendrogramy pro porovnání jednotlivých souborů drsností Ra .



Obr. 7.12 Dendrogramy vlivu vstřikovacího tlaku

Jak lze z Obr. 7.12 vidět, při použití vstřikovacích tlaků 45 a 60 MPa se sobě nejvíce podobají právě soubory drsností povrchu Ra při použití leštěných, lapovaných a broušených tvarových dutin. U vstřikovacího tlaku 30 MPa již nedochází k tak velké míře podobnosti mezi tvarovými dutinami č. 1 až č. 5, zřejmě z důvodu nedokonalého kopírování profilu povrchu tvarové dutiny polymerní taveninou. Tento test byl proveden pro zjištění vhodnosti či nevhodnosti použití leštěné tvarové dutiny v porovnání s tvarovou dutinou broušenou, jejíž výroba je časově méně náročná a několikanásobně levnější. Z tohoto důvodu byly drsnosti povrchu polymerních výrobků při použití těchto tvarových dutin testovány na shodnost mediánů Ra a Rz pomocí neparametrického testu:

Použitá metoda: **Kruskal-Wallis**

Nulová a alternativní hypotéza:

$$H_0 = \tilde{X}_{P=30(45,60)-1}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{P=30(45,60)-5}^{Ra(Rz)} \quad H_A = NON \quad (8)$$

Výsledky pro jednotlivé vstřikovací tlaky jsou zobrazeny v Tab. 7.13.

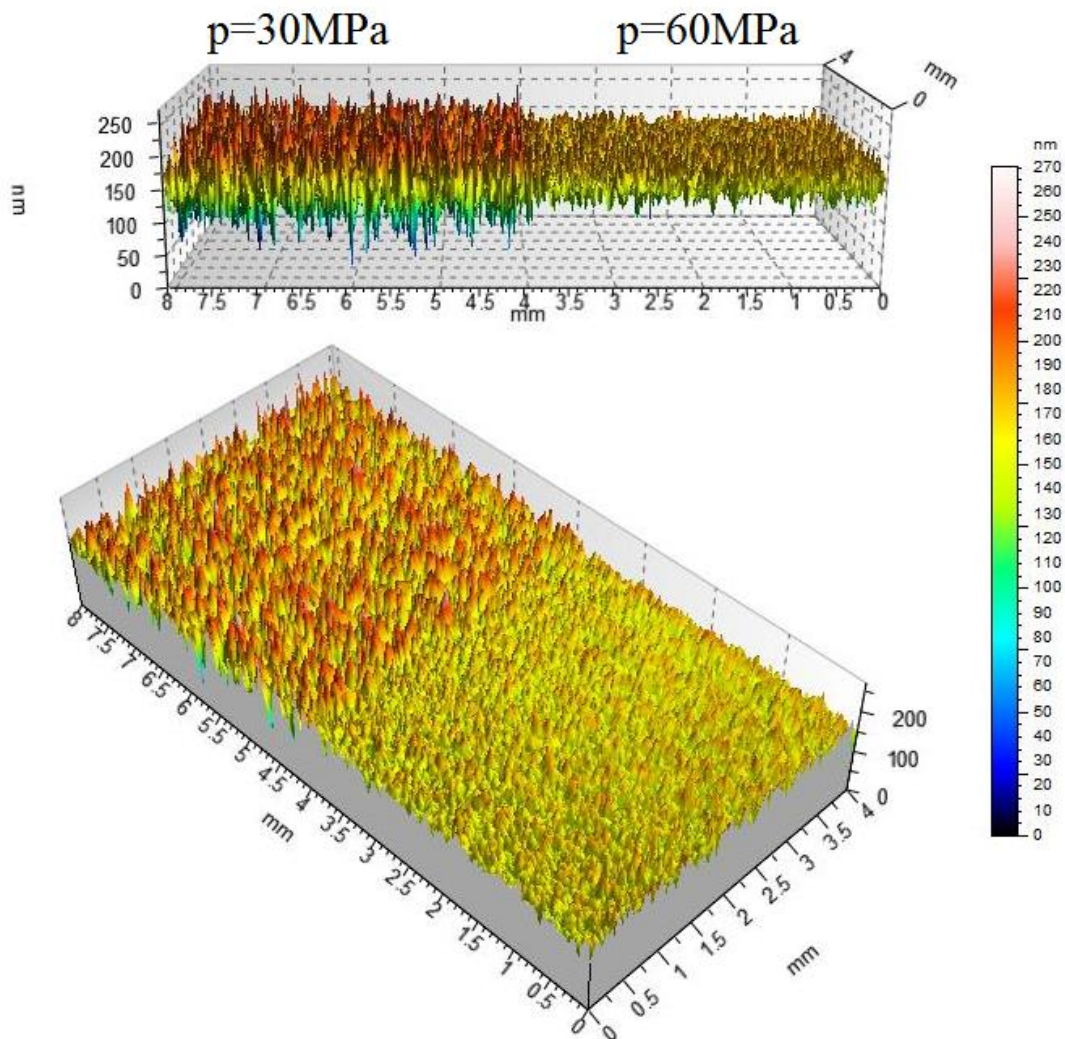
Tab. 7.13 Hodnoty pravděpodobnosti P pro odlišné vstřikovací tlaky při použití tvarové dutiny č. 1 a č. 5

Vstřikovací tlak	30 MPa	45 MPa	60 MPa
P hodnota pro Ra	0,000	0,545	0,096
P hodnota pro Rz	0,005	0,290	0,051

Nulová hypotéza popisující shodu mediánů drsností povrchu R_a a R_z polymerních výrobků z ABS Magnum 3453, při použití leštěné tvarové dutiny (č. 1) a broušené tvarové dutiny (č. 5), byla zamítnuta pouze v případě vstřikování tlakem 30MPa. Při takto nízkém vstřikovacím tlaku tavenina nekopírovala povrch ani jedné tvarové dutiny a tvořila si povrch nezávisle na kvalitě povrchu formy. V případě použití vyšších vstřikovacích tlaků nulovou hypotézu zamítnout nelze, neboť $P > \alpha$ a lze tak tvrdit, že dochází k určité podobnosti či dokonce shodnosti mediánů souborů. Je tedy zřejmé, že dokončovací operace lapování a leštění jsou při použití polymerního materiálu ABS Magnum 3453 a zvolených podmínkách vstřikování poměrně nadbytečné.

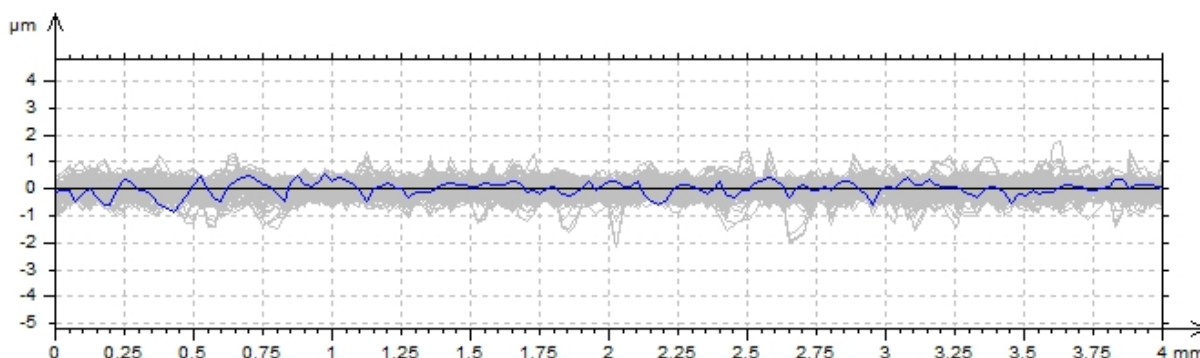
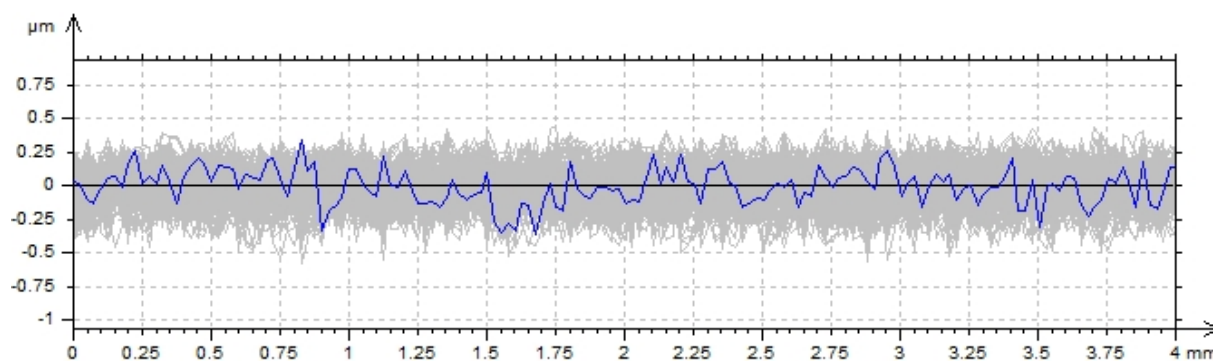
7.3.3 3D hodnocení drsnosti povrchu

3D bezkontaktní metoda měření povrchu byla použita zejména pro ověření správnosti údajů naměřených kontaktní 2D metodou a pro porovnání 3D profilu povrchů při použití odlišných tlaků. Z důvodu časové náročnosti měření byl hodnocen povrch polymerních vzorků při použití tvarové dutiny č. 1, pro vstřikovací tlaky 30 MPa a 60 MPa. 3D profily povrchů jsou zobrazeny v Obr. 7.13.



Obr. 7.13 3D profil povrchu při vstřikovacím tlaku 30 a 60 MPa

Ze zobrazených 3D profilů lze vidět, že použitím tlaku 30 MPa dochází k vytvoření zcela odlišného povrchu v porovnání s tlakem 60 MPa. Zatímco povrch u tlaku 30 MPa je tvořen vysokými výstupky a nízkými prohlubněmi, povrch u tlaku 60 MPa dosahuje nízkých a poměrně rovnoměrných výstupků a prohlubní. Velikost výstupků a prohlubní je znázorněna graficky na měřítku každého z profilu a rovněž si je lze prohlédnout na 2D řezech touto plochou (Obr. 7.14 a Obr. 7.15).

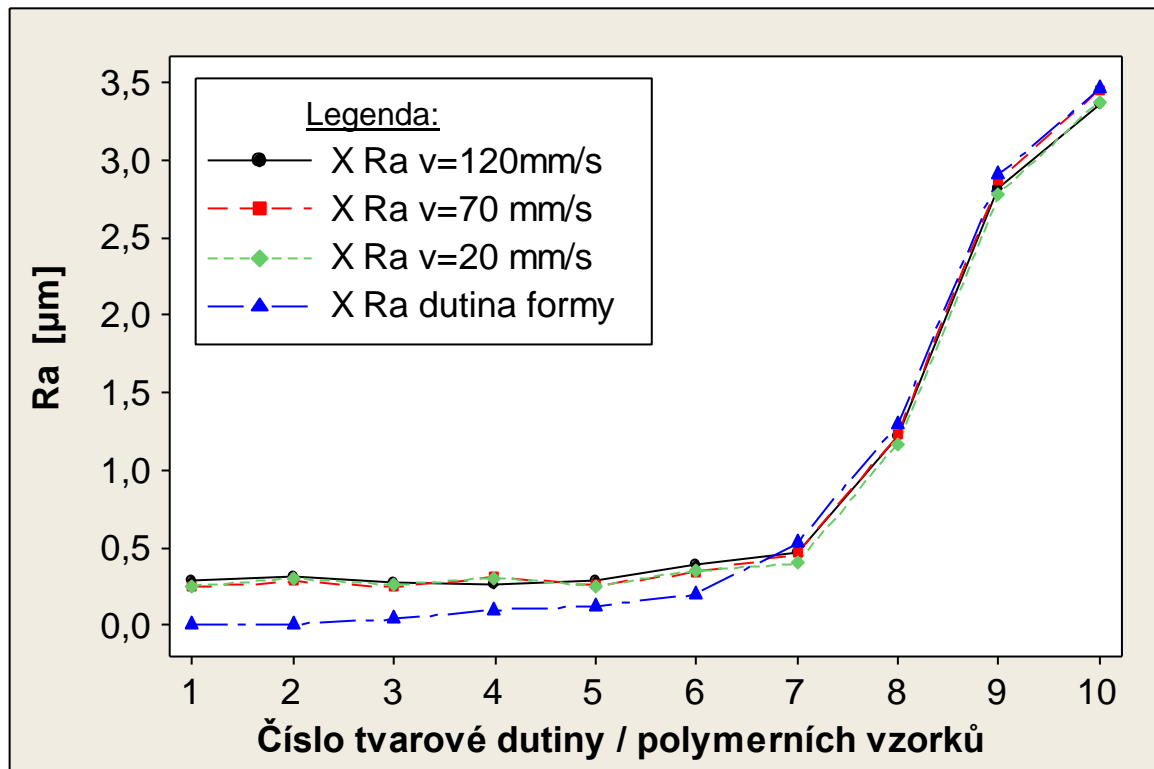
*Obr. 7.14 2D řez v ose X 3D profilu povrchu při vstřikovacím tlaku 30MPa**Obr. 7.15 2D řez v ose X 3D profilu povrchu při vstřikovacím tlaku 60MPa*

Tyto 2D řezy byly provedeny z 3D profilu povrchu směrem ke středu zkušební vzorku, tedy ve směru měření 2D dotykového profiloměru. Opět lze z měřítka povrchu jasně vidět značný rozdíl mezi výškou profilu u tlaku 30 a 60 MPa. Hodnoty naměřené 3D a 2D metodou jsou srovnatelné a lze tedy říci, že 3D bezkontaktní metoda ověřila správnost předchozích měření.

Z Tab. 7.14 lze vidět, že všechna naměřená data pochází ze základního souboru a mají normální rozdělení s pravděpodobností 95 %. Statisticky vyhodnocená data pomocí mediánu jsou zobrazena v Obr. 7.16.

7.4.2 2D hodnocení drsnosti povrchu

Statisticky zpracovaná data v podobě mediánů byla následně zanesena do grafu závislosti parametrů drsnosti Ra a Rz na změně vstřikovací rychlosti (Obr. 7.16 a Obr. 7.17).



Obr. 7.16 Závislost drsnosti povrchu Ra na změně vstřikovací rychlosti

Hodnoty drsnosti povrchu Ra polymerních vzorků při vstřikování odlišnými vstřikovacími rychlostmi dosahují velmi podobných výsledků při použití jednotlivých tvarových dutin. Lze tedy říci, že změna vstřikovací rychlosti neovlivňuje jakost povrchu tak silně jako změna vstřikovacího tlaku. Tuto skutečnost bylo nutné statisticky potvrdit pomocí neparametrického testu, z důvodu heterogenity rozptylu.

Použitá metoda: **Kruskal-Wallis**

Nulová a alternativní hypotéza:

$$H_0 = \tilde{X}_{v=20-(1-10)}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{v=70-(1-10)}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{v=120-(1-10)}^{Ra(Rz)} \quad (9)$$

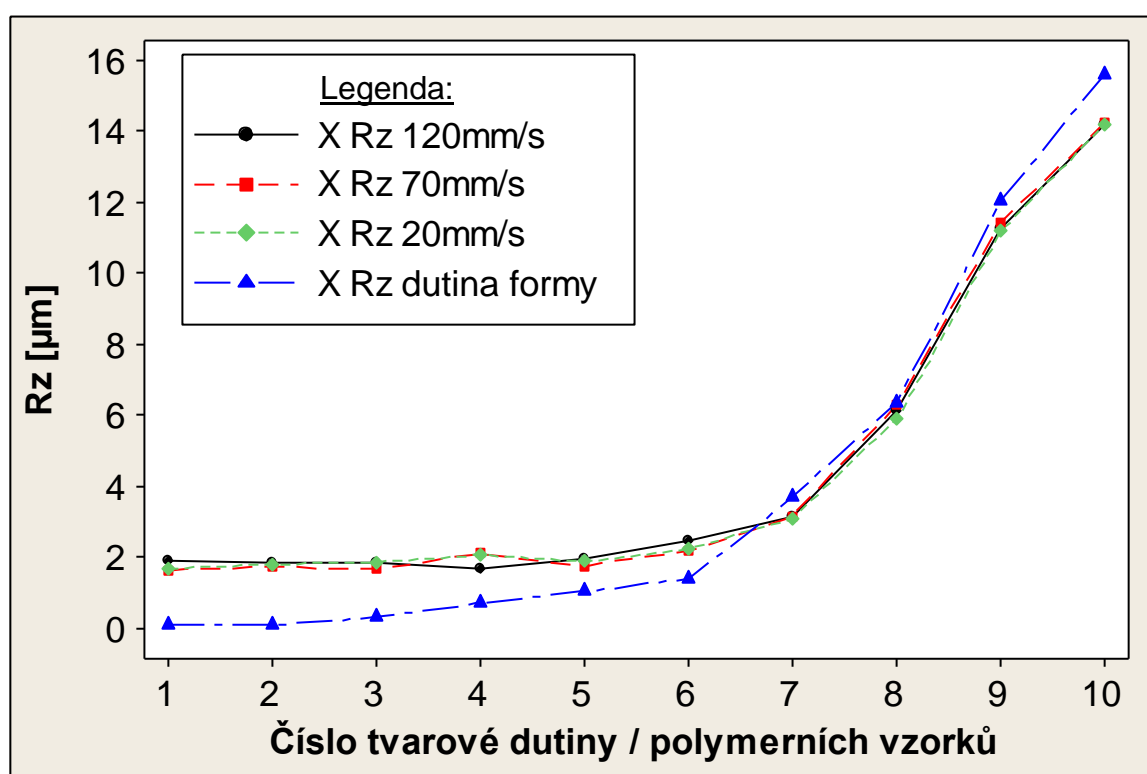
$$H_A = \text{NON}$$

Byly tedy porovnávány mediány drsností povrchu Ra a Rz při použití shodné tvarové dutiny při vstřikovací rychlosti 20, 70 a 120 mm/s. Výsledné hodnoty pravděpodobností P z tohoto testu jsou vypsány v Tab. 7.15.

Tab. 7.15 Hodnoty pravděpodobnosti P pro Kruskal-Wallisuv test při odlišných vstř. rychlostech

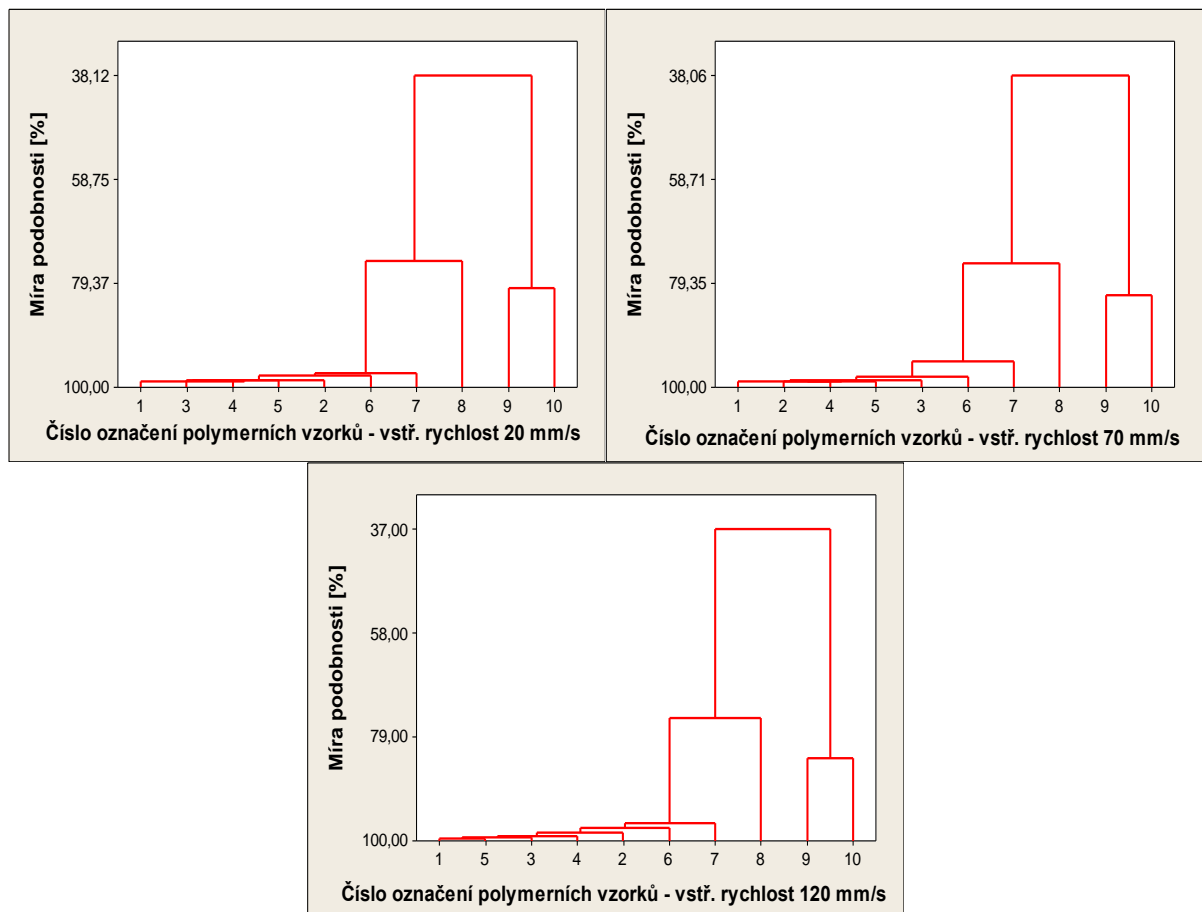
Číslo dutiny	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P hodnota pro Ra	0,008	0,233	0,087	0,006	0,036	0,019	0,034	0,089	0,058	0,002
P hodnota pro Rz	0,096	0,777	0,303	0,000	0,170	0,015	0,780	0,384	0,006	0,777

Z tabulky lze vidět, že ve většině případů je P hodnota pro drsnosti povrchu Ra a Rz vyšší než α a nelze tedy zamítnout nulovou hypotézu ve prospěch hypotézy alternativní s možností omylu 5 %. Lze tedy tvrdit, že jednotlivé soubory naměřené při použití shodné tvarové dutiny, jsou si velmi podobné či dokonce shodné a vliv vstřikovací rychlosti nemá zásadní vliv na drsnost povrchu polymerních výrobků. Velmi podobný průběh má parametr drsnosti Rz .



Obr. 7.17 Závislost drsnosti povrchu Rz na změně vstřikovací rychlosti

Z Obr. 7.16 a Obr. 7.17 lze ovšem také pozorovat, že i v tomto případě, kdy docházelo ke změně vstřikovací rychlosti, se hodnoty drsnosti Ra a Rz při použití leštěné tvarové dutiny (č. 1) a broušené tvarové dutiny (č. 5) velmi podobají. Tato skutečnost byla dále zkoumána pomocí dendrogramů.



Obr. 7.18 Dendrogramy drsností R_a polymerních vzorků pro odlišné vstřikovací rychlosti

Jak lze z dendrogramů vidět největší shodu podobnosti dosahují zejména polymerní vzorky vyrobené pomocí tvarových dutin č. 1 až č. 5. Míra shody při použití vstřikovacích tlaků 20, 70 i 120 mm/s se u těchto souborů pohybovala v hodnotách přes 99 %. Z tohoto důvodu bylo nutné porovnat, zda se časově i ekonomicky nákladné leštění či lapování projeví na drsnosti povrchu polymerních výrobků ABS Magnum 3453, či postačí pouze tvarové dutiny brousit. Nehomogenita rozptylů jednotlivých souborů neumožnila použít parametrický test ANOVA.

Použitá metoda: **Kruskal-Wallis**

Nulová a alternativní hypotéza:

$$H_0 = \tilde{X}_{v=20(70,120)-1}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{v=20(70,120)-5}^{Ra(Rz)} \quad H_A = \text{NON} \quad (10)$$

Hodnoty pravděpodobností P použitého testu se zvolenými hypotézami jsou pro jednotlivé vstřikovací rychlosti vypsány v Tab. 7.16.

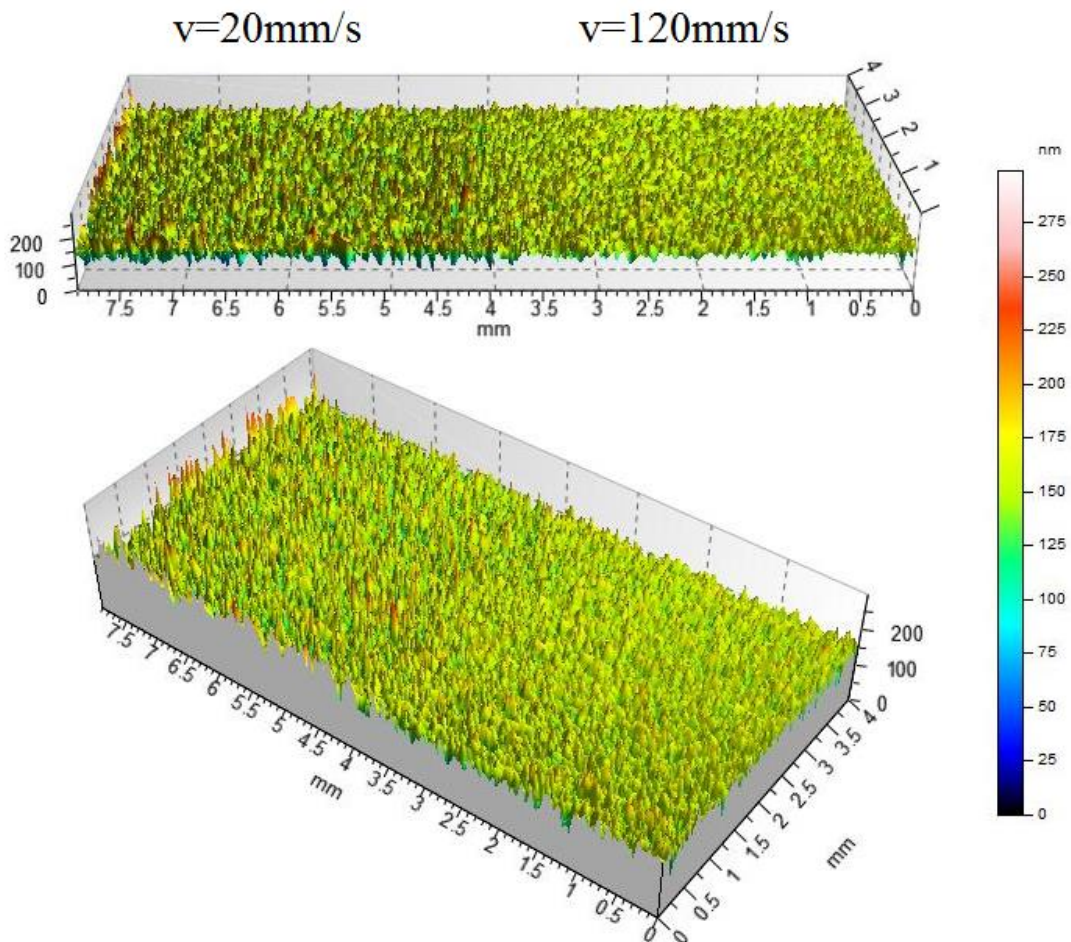
Tab. 7.16 Hodnoty pravděpodobností P pro odlišné vstřikovací rychlosti při použití tvarové dutiny č. 1 a č. 5

Vstřikovací rychlost	20 mm/s	70 mm/s	120 mm/s
P hodnota pro R_a	0,821	0,545	1,000
P hodnota pro R_z	0,364	0,290	0,597

Z tabulky je viditelné, že P hodnoty jsou větší než α a nelze tedy zamítnout nulovou hypotézu popisující shodnost mediánů jednotlivých souborů s možností omylu $\alpha = 0,05$. Lze tedy říci, že v případě použití materiálu ABS Magnum 3453 je drsnost povrchu polymerních výrobků velmi podobná či stejná při použití leštěné a pouze broušené tvarové dutiny.

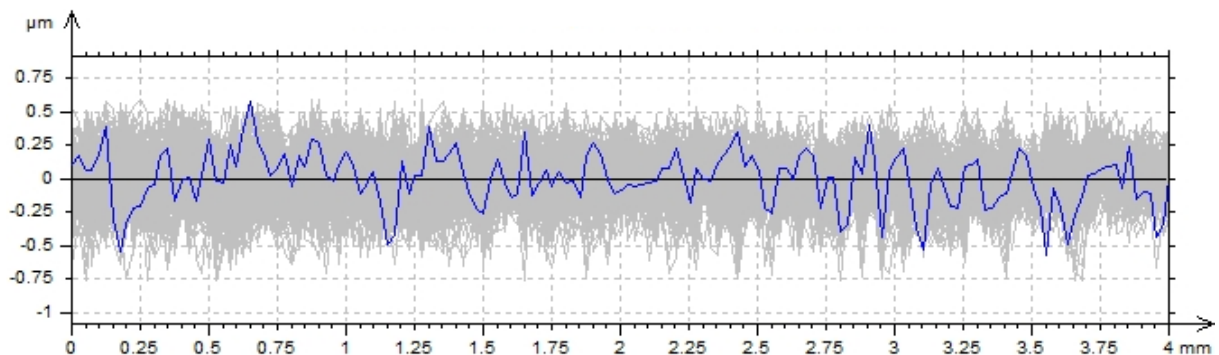
7.4.3 3D hodnocení drsnosti povrchu

Hodnocení parametrů drsnosti R_a a R_z pomocí 2D kontaktního drsnoměru neprokázalo tak významný vliv vstřikovací rychlosti na jakost povrchu polymerních výrobků v porovnání se vstřikovacím tlakem. Toto tvrzení proto bylo ověřeno pomocí vysoce kvalitní 3D bezkontaktní metody. Pro tento experiment byly použity polymerní vzorky vyrobené pomocí tvarové dutiny č. 2 při vstřikovací rychlosti 20 a 120 mm/s.

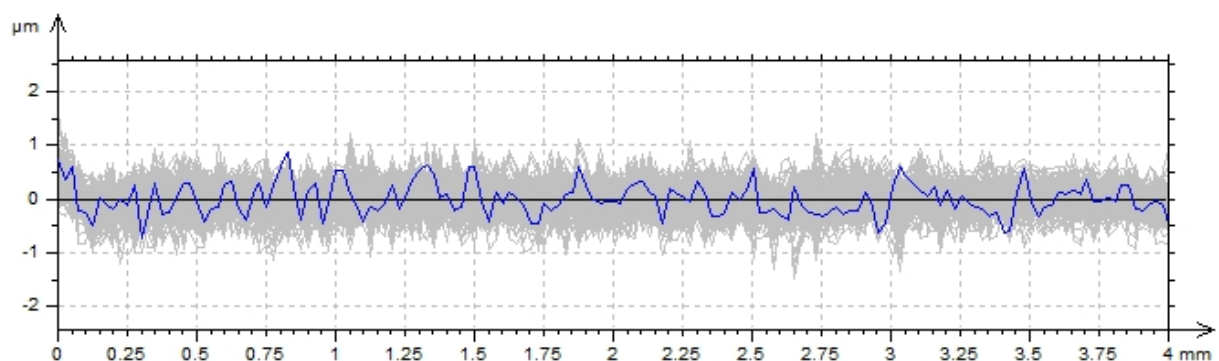


Obr. 7.19 3D profil povrchu při vstřikovacím rychlosti 20 a 120 mm/s

Z Obr. 7.19 lze vidět, že profily povrchu při vstřikovací rychlosti 20 a 120 mm/s se podobají. V případě nižší vstřikovací rychlosti dochází v určitých místech profilu k vyšším výstupkům v porovnání s vyšší vstřikovací rychlostí, nicméně průměrná hodnota drsnosti povrchu těchto povrchu se velmi podobala a taktéž se dobře shodovala s hodnotami naměřenými na kontaktním drsnoměru. Z barevné škály stupnice si lze povšimnout, že nejvíce na obou površích převládá zelená barva, která charakterizuje vzájemnou podobnost. Totéž si lze povšimnout na 2D řezech z 3D profilu povrchu, které byly provedeny ve směru X tedy ve směru měření drsnosti povrchu pomocí kontaktní metody.



Obr. 7.20 2D řez v ose X 3D profilu povrchu při vstřikovací rychlosti 20 mm/s



Obr. 7.21 2D řez v ose X 3D profilu povrchu při vstřikovací rychlosti 120 mm/s

I přesto, že software vyhodnotil řezy těchto dvou povrchu v odlišných měřítkách, lze si povšimnout, že oba profily se nejčastěji pohybují ve stejném intervalu (cca -0,75 až 0,75 μm). Lze tedy říci, že i tato 3D metoda potvrdila předchozí tvrzení o nepříliš silném vlivu vstřikovací rychlosti na drsnost povrchu vstřikovaných tenkostěnných a rovinných polymerních výrobků.

7.5 Vliv dotlaku na jakost povrchu polymerního výrobku

V tomto experimentu byly zkoumány celkem tři dotlaky při vstřikování do ocelových tvarových dutin a to v hodnotách 30, 45 a 60 MPa. Vyšší dotlak nebylo možné nastavit z důvodu přetékání taveniny do dělicí roviny.

7.5.1 Test normality

V první fázi statistického hodnocení byly zkontrolovány odlehlé hodnoty pomocí boxplotových diagramů a rovněž proběhla kontrola normálního rozdělení.

Použitá metoda: **Anderson -Darling**

H_0 : Data pochází ze základního souboru s normálním rozdělením

H_A : Data pochází z jiného souboru s jiným rozdělením s možností omylu $1 - \alpha = 0,05$

Hodnoty pravděpodobností P všech souborů jsou zobrazeny v Tab. 7.17.

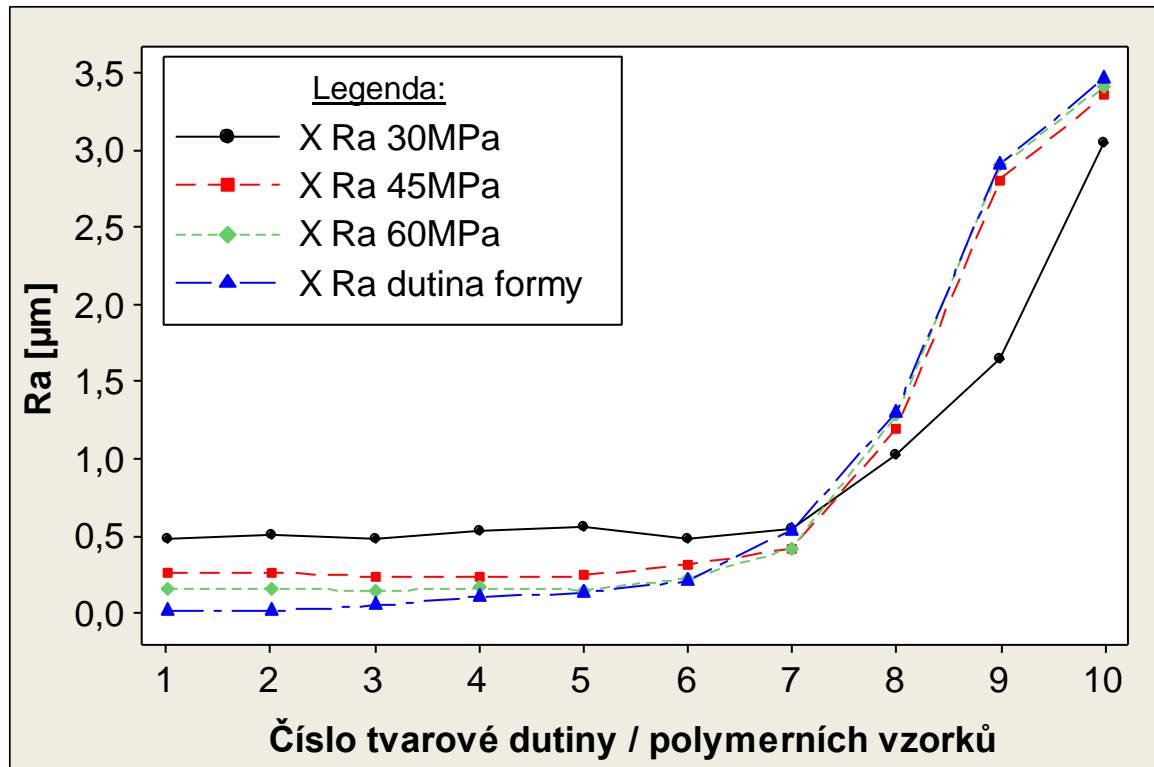
Tab. 7.17 Hodnoty pravděpodobností P pro test normality souborů R_a a R_z polymerních vzorků – vliv dotlaku

Č. vzorků – 30 MPa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota P pro R_a	0,166	0,383	0,547	0,704	0,81	0,195	0,320	0,692	0,677	0,288
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Hodnota P pro R_z	0,599	0,622	0,425	0,315	0,235	0,241	0,119	0,737	0,684	0,530
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Č. vzorků – 45MPa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota P pro R_a	0,680	0,762	0,245	0,303	0,538	0,754	0,319	0,680	0,616	0,145
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Hodnota P pro R_z	0,844	0,295	0,128	0,226	0,311	0,199	0,738	0,756	0,454	0,818
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Č. vzorků – 60MPa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota P pro R_a	0,930	0,284	0,732	0,679	0,497	0,129	0,460	0,130	0,961	0,461
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Hodnota P pro R_z	0,517	0,164	0,671	0,311	0,183	0,631	0,436	0,151	0,576	0,090
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0

Z výsledných hodnot pravděpodobnosti P lze vidět, že všechny jsou větší nežli α , která je rovna 0,05. Lze tedy tvrdit, že data pochází s pravděpodobností 95% ze základního souboru s normálním rozdělením.

Statisticky vyhodnocené mediány drsností povrchu R_a jednotlivých souborů jsou vykresleny v Obr. 7.22.

7.5.2 2D hodnocení drsnosti povrchu

Obr. 7.22 Závislost drsnosti povrchu R_a na změně dotlaku

Při použití materiálů ABS Magnum 3453 nevykázal žádný polymerní vzorek stejné kvality jako leštěné, lapované či broušené tvarové dutiny. Použitím nižších dotlaků se drsnost povrchu R_a polymerních výrobků ještě více zhoršila. Nejhorší kvalita povrchu byla dosažena při poměrně nízkém dotlaku 30MPa, u něhož však stále probíhala bezproblémová výroba celistvého polymerního vzorku. Tento trend je velice podobný jako při experimentu se změnou vstřikovacího tlaku. Vyšší dotlak a s ním spojený vstřikovací tlak, tak zaručují výrobu s vyšší kvalitou povrchu, což je statisticky potvrzeno i neparametrickým testem:

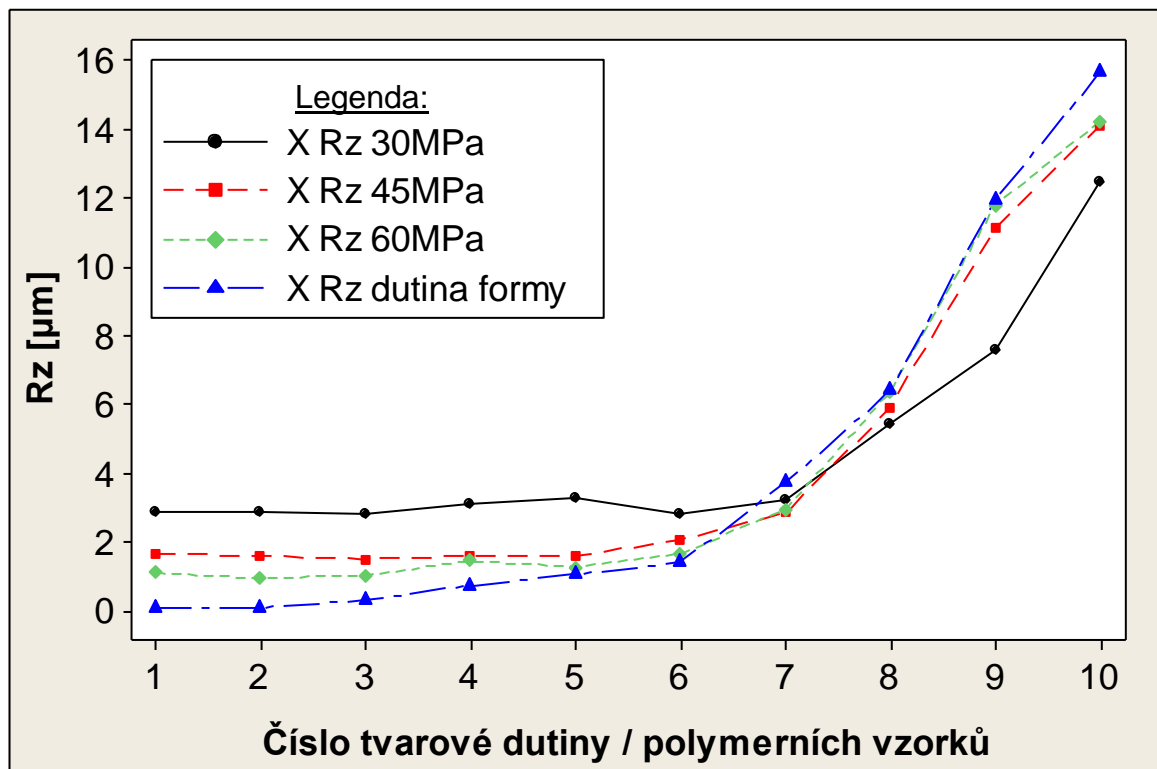
Použitá metoda: **Kruskal-Wallis**

Nulová a alternativní hypotéza:

$$H_0 = \tilde{X}_{hp=30}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{hp=45}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{hp=60}^{Ra(Rz)} \quad (11)$$

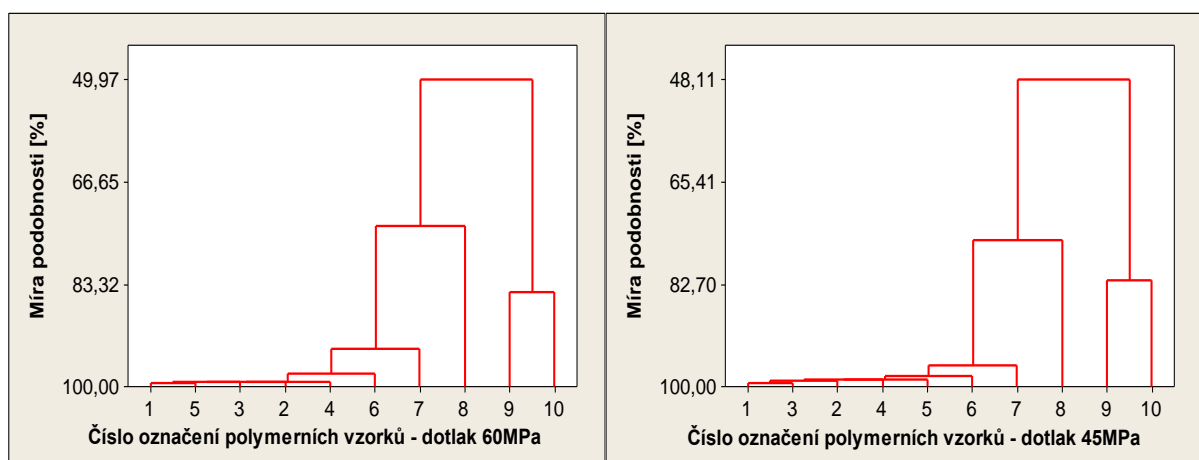
$$H_A = \text{NON}$$

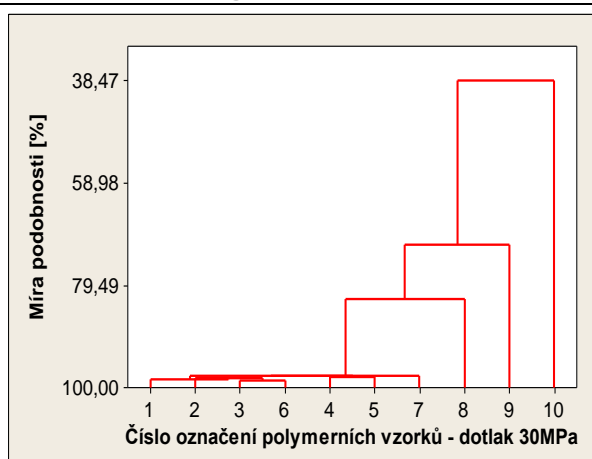
Pro všechny tvarové dutiny byla vyhodnocena hodnota pravděpodobnosti $P = 0,000$. S pravděpodobností 95 % tak lze tvrdit, že zamítám shodu mediánů jednotlivých souborů a mohu tvrdit, že dotlak má statisticky významný vliv na jakost povrchu polymerních výrobků. Tvzení o silném vlivu vstřikovacího tlaku potvrzuje i vyhodnocení parametru drsnosti R_z (Obr. 7.23).



Obr. 7.23 Závislost drsnosti povrchu Rz na změně dotlaku

I v případě dotlaku 30 MPa bylo naměřeno u vzorků vyrobených na soustružených tvarových dutinách (č. 6 - 10) lepší jakost povrchu v porovnání s vyššími dotlaky. Tento fakt je zřejmě způsoben nedostatečným vtačením polymerní taveniny do vysokého profilu povrchu tvarové dutiny a nedochází tak ke kopírování povrchu. Důležitějším faktorem v Obr. 7.22 a Obr. 7.23 je ovšem fakt, že drsnosti Ra a Rz se opět velmi podobají při použití tvarové dutiny broušené (č. 5) a leštěné (č. 1), přičemž výroba leštěné tvarové dutiny trvala několikanásobně déle a také výrobní cena byla vyšší. Podobnost dat jednotlivých souborů byla zkoumána pomocí dendrogramů (Obr. 7.24).





Obr. 7.24 Dendrogramy drsností Ra polymerních vzorků pro odlišné dotlaky

Z přiložených dendrogramů lze jasně vidět, že největší shody podobnosti je dosaženo u prvních pěti souborů. Míra podobnosti pro dotlak 45 a 60 MPa činila pro těchto pět souborů hodnotu nad 99 %. U nižšího dotlaku již tato podobnost klesá. Ověření zda lze považovat drsnost plochy Ra a Rz polymerních vzorků při použití leštěné a pouze broušené tvarové dutiny za podobné či shodné, bylo provedeno pomocí neparametrického testu.

Použitá metoda: **Kruskal-Wallis**

Nulová a alternativní hypotéza:

$$H_0 = \tilde{X}_{hp=30(45,60)-1}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{hp=30(45,60)-5}^{Ra(Rz)} \quad H_A = \text{NON} \quad (12)$$

Hodnoty pravděpodobností P pro tento test byly stanoveny pro všechny dotlaky použité při vstřikování a jsou vypsány v Tab. 7.18.

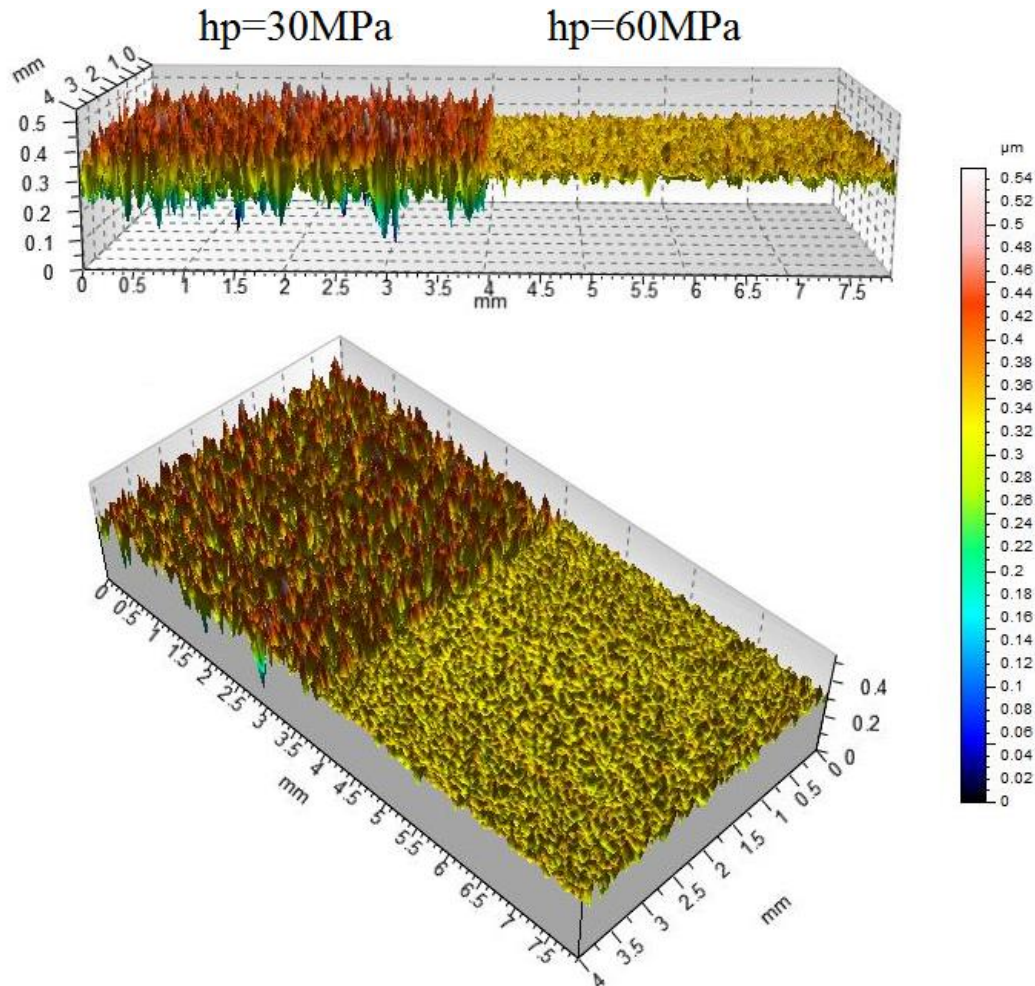
Tab. 7.18 Hodnoty pravděpodobností P pro odlišné dotlaky při použití tvarové dutiny č. 1 a č. 5

Dotlak	30 MPa	45 MPa	60 MPa
P hodnota pro Ra	0,000	0,051	0,096
P hodnota pro Rz	0,013	0,821	0,051

Z Tab. 7.18 lze vidět, že zamítám nulovou hypotézu o rovnosti mediánů pouze v případě použití dotlaku s hodnotou 30 MPa. Jak již bylo zmíněno, při použití tohoto dotlaku nedocházelo ke kopírování profilu drsnosti povrchu tvarové dutiny a polymerní tavenina si tak tvořila povrch bez větší závislosti na použité tvarové dutině. Při větším prozkoumání si lze ovšem povšimnout, že i u tohoto dotlaku se drsnosti povrchu Ra i Rz liší při použití dutiny 1 a 5 pouze v desetínách či setinách mikrometrů. Při použití vyššího dotlaku ovšem nelze zamítnout nulovou hypotézu popisující rovnost mediánů jednotlivých souborů s možností omylu $1 - \alpha = 0,05$. Lze tedy tvrdit, že povrchy polymerních vzorků jsou velmi podobné či dokonce shodné, přičemž samotná výroba broušené a leštěné tvarové dutiny jsou časově i ekonomicky ve zcela jiných úrovních.

7.5.3 3D hodnocení drsnosti povrchu

Předchozí statistické vyhodnocení prokázalo s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$, že byla zamítnuta shoda mediánů drsností při použití totožné tvarové dutiny a jiných dotlacích při vstřikování. Tento experiment byl proveden zejména z důvodu ověření těchto tvrzení, porovnání kvality měření 2D a 3D a také pro grafické znázornění rozdílnosti jednotlivých profilů povrchu.

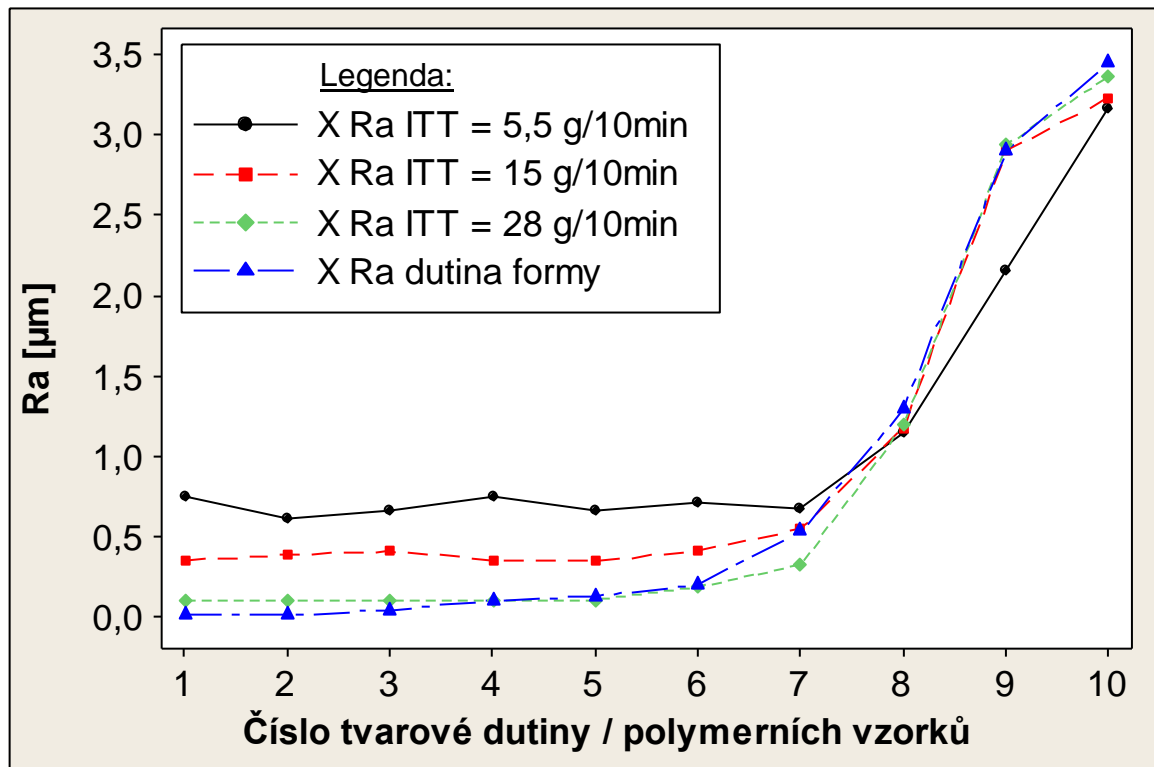


Obr. 7.25 3D profil povrchu při dotlaku 30 a 60MPa – ocelová dutina č. 2

Z Obr. 7.25 lze pozorovat, že profil povrchu při použití nižšího dotlaku 30 MPa je několikanásobně vyšší v porovnání s dotlakem 60 MPa. Profil povrchu je tvořen vysokými výstupky a velmi nízkými prohlubněmi, přičemž povrch tvarové dutiny, na které byly tyto výrobky vytvořeny, má mnohonásobně vyšší kvalitu a lze tedy tvrdit, že při takto nízkém dotlaku materiál vůbec nekopíruje povrch tvarové dutiny vstřikovací formy a vytváří si tak povrch zcela nezávisle na dutině. Naopak dotlak 60 MPa zaručuje vyšší kvalitu, která ovšem také nedosahuje kvality tvarové dutiny. Stejné kvality by tak mohlo být dosaženo zvýšením vstřikovacího tlaku a dotlaku, které již ovšem nebyly z konstrukčních možností použité vstřikovací formy možné. I v tomto případě se naměřená data z 2D a 3D metody velmi podobají.

7.6.2 2D hodnocení drsnosti povrchu

Po kontrole normálního rozdělení byla data statisticky vyhodnocena pomocí parametru medián a následně byla zanesena do grafů závislosti drsnosti povrchu polymerních výrobků na indexu toku taveniny a drsnosti povrchu tvarové dutiny (Obr. 7.26).



Obr. 7.26 Závislost drsnosti povrchu Ra na ITT

Z grafu lze vidět, že index toku taveniny, respektive viskozita použitých materiálů ABS Magnum, ovlivňuje jakost povrchu polymerních výrobků v nemalé míře. Polymerní materiál s ITT = 5,5 g/10min takřka vůbec nekopíruje profil povrchu tvarové dutiny u velmi přesně dokončovaných tvarových dutin (č. 1 – 7) ale ani u soustružených. Totéž lze konstatovat pro materiál lépe tekoucí s ITT = 15 g/10min. Pouze při použití tvarových dutin soustružených kde byla drsnost povrchu naměřena $Ra > 1,2 \mu\text{m}$, tedy u tvarových dutin označených číslem 8, 9 a 10 docházelo k určitému kopírování povrchu. V tomto případě docházelo u materiálu s nejnižším ITT dokonce k určitému zlepšení povrchu z pohledu drsnosti Ra. To lze vysvětlit horší zatékavostí materiálu, kdy tento materiál nedokázal zcela vyplnit vysoký profil povrchu po technologii soustružení.

Vliv indexu toku taveniny na jakost povrchu polymerních materiálů byl testován pomocí neparametrického testu z důvodu vyhodnocení dat mediánem.

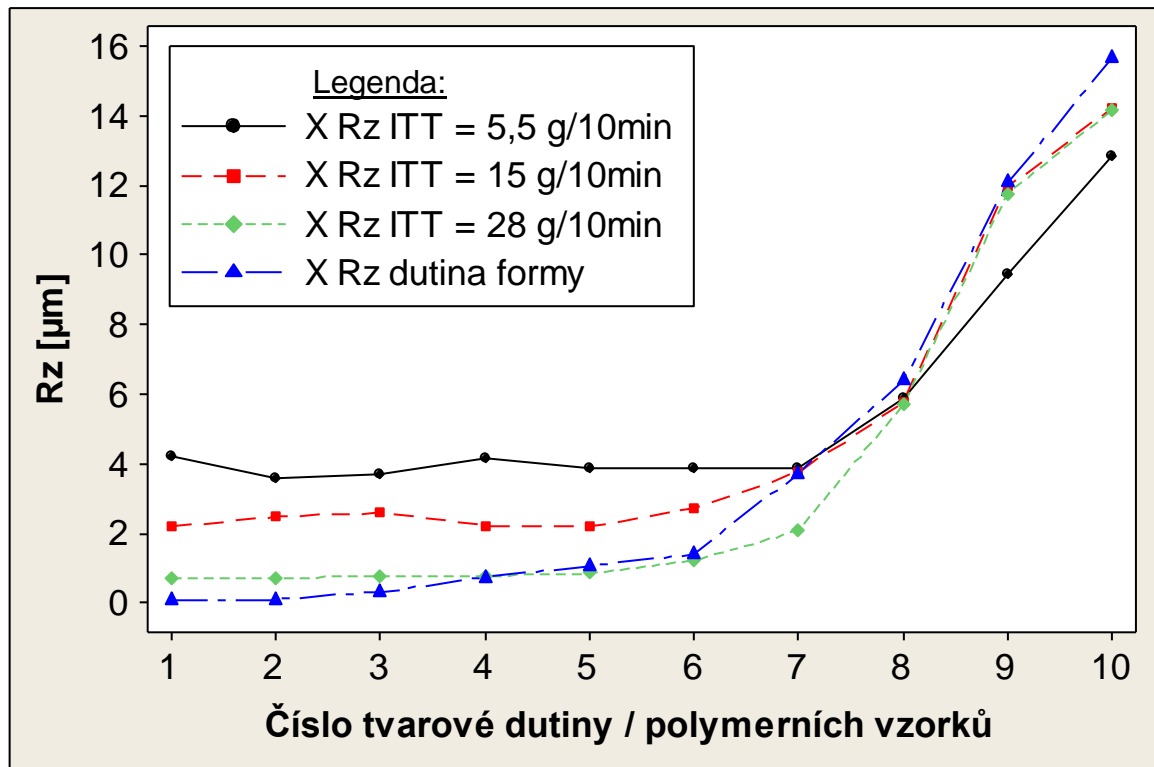
Použitá metoda: **Kruskal-Wallis**

Nulová a alternativní hypotéza:

$$H_0 = \tilde{X}_{ITT=5,5}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{ITT=15}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{ITT=28}^{Ra(Rz)} \quad (13)$$

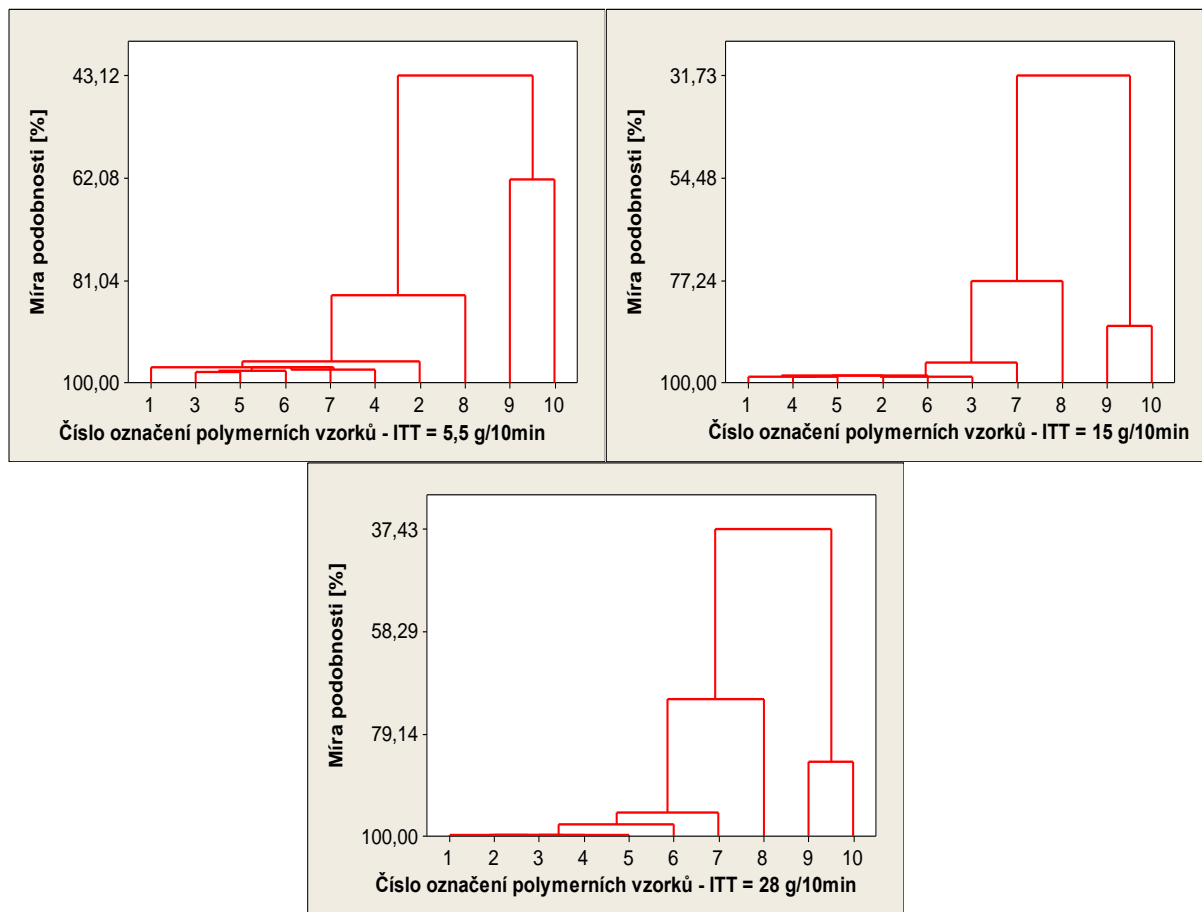
$$H_A = \text{NON}$$

Nulová hypotéza byla tedy položena tak, že porovnávala drsnost povrchu výrobků tří polymerních materiálů s odlišným ITT při použití totožné tvarové dutiny. Při použití kterékoliv tvarové dutiny byla stanovena hodnota pravděpodobnosti $P = 0,000$. Lze tedy konstatovat, že zamítám nulovou hypotézu o rovnosti mediánů souborů s pravděpodobností 95% a index toku taveniny (viskozita) má významný vliv na drsnost povrchu Ra a Rz polymerních výrobků. Velmi podobný trend, který potvrzuje toto tvrzení a u něhož vyšel neparametrický test Kruskal-Wallis stejně, tedy hodnotami $P = 0,000$, byl pozorován u parametru drsnosti Rz . Statisticky vyhodnocená data drsnosti Rz jednotlivých materiálů jsou zobrazeny v Obr. 7.27.



Obr. 7.27 Závislost drsnosti povrchu Rz na ITT

I v případě použití materiálů s odlišným indexem toku taveniny lze pozorovat, že se soubory drsností Ra a Rz při použití tvarové dutiny č. 1 a č. 5 velmi podobají. Z tohoto důvodu byly sestaveny dendrogramy, které porovnávají míru podobnosti jednotlivých souborů



Obr. 7.28 Dendrogramy drsností R_a polymerních vzorků pro materiály s odlišným ITT

Z přiložených dendrogramů lze vidět, že největší míra podobnosti je u všech materiálů (lišících se ITT) dosahována u souborů s označením 1 až 5. Jde tedy o soubory drsností povrchu R_a polymerních vzorků vyrobených pomocí leštěných, lapovaných a broušených tvarových dutin. Míra podobnosti u materiálu s ITT = 15 a 28 g/10min dosahuje hodnot nad 99%. U materiálu s ITT = 5,5 g/10min již klesá tato shoda na hodnoty pohybující se kolem 97%. Lze tak předpokládat, že nízká hodnota ITT způsobuje nedokonalé kopírování velmi kvalitních povrchů a také, že u tohoto materiálu nebude výsledná drsnost výrobku příliš závislá na použité tvarové dutině. Pro ověření vhodnosti použití leštění a lapování tvarových dutin u těchto materiálů byl použit neparametrický test z důvodu použití mediánů.

Použitá metoda: **Kruskal-Wallis**

Nulová a alternativní hypotéza:

$$H_0 = \tilde{X}_{1-ITT=5,5}^{Ra(Rz)} (15, 28) = \tilde{X}_{5-ITT=5,5}^{Ra(Rz)} (15, 28) \quad (14)$$

$$H_A = \text{NON}$$

Nulová hypotéza byla položena tak, aby srovnávala mediány drsností povrchu R_a a R_z při použití tvarové dutiny leštěné (č. 1) a broušené (č. 5). Výsledné hodnoty pravděpodobností P pro jednotlivé materiály jsou vypsány v Tab. 7.20.

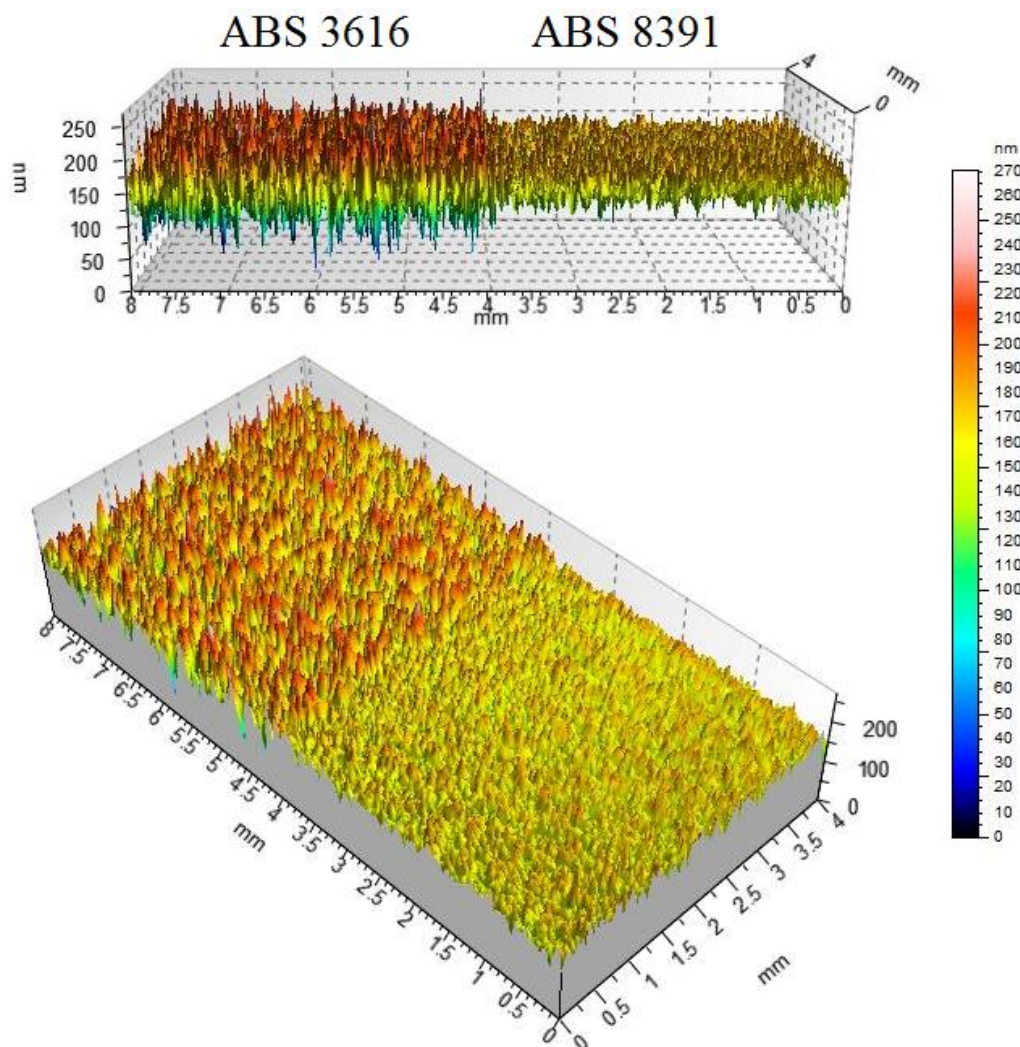
Tab. 7.20 Hodnoty pravděpodobností P pro odlišné dotlaky při použití tvarové dutiny č. 1 a č. 5

ITT materiálu ABS	5,5 g/10min	15 g/10min	28 g/10min
P hodnota pro R_a	0,008	0,762	0,762
P hodnota pro R_z	0,000	0,406	0,081

Z výsledných hodnot pravděpodobností P lze vidět, že pro materiály s $ITT = 15$ a 28 g/10min nezamítám shodu parametrů drsnosti R_a a R_z . Lze tak říci, že výsledný povrch polymerního výrobku při použití leštěné a pouze broušené tvarové dutiny je velmi podobný či dokonce stejný. Pro tyto dva použité materiály tak není příliš ekonomicky a časově výhodné použít leštěné a lapované tvarové dutiny, neboť nejsou schopny kopírovat tak kvalitní povrch. Naopak pro materiál s nízkou hodnotou indexu toku taveniny $5,5$ g/10min tuto nulovou hypotézu o rovnosti mediánů zamítám, což potvrzuje předchozí domněnku o malé závislosti drsnosti polymerního výrobku na drsnosti tvarové dutiny v případě použití tohoto materiálu. To může být vysvětleno nízkou zatékavostí taveniny polymerního materiálu do profilu povrchu tvarové dutiny a vytvoření specifického povrchu.

7.6.3 3D hodnocení drsnosti povrchu

I v případě tohoto experimentu byly z časových důvodů vybrány pro měření pouze dva vzorky. Pro srovnání byly použity vzorky vyrobené na tvarové dutině č. 1 z materiálu ABS Magnum 3616 (ITT = 5,5g/10min) a ABS Magnum 8391 (ITT = 28g/10min). 3D profily povrchů jsou zobrazeny v Obr. 7.29.



Obr. 7.29 3D profil povrchu materiálu ABS Magnum 3616 a 8391

Z naměřených 3D profilů povrchu lze opět vidět velký rozdíl mezi charakterem povrchu zvolených materiálů. Zatímco materiál s nižší ITT ABS 3616 vykazuje nepřiliš rovnoměrnou strukturu vysokých výstupků a nízkých prohlubní, materiál s vysokou viskozitou ABS 8391 tvořil při vstřikování pravidelnou strukturu s poměrně nízkým profilem povrchu. Rozdíl lze vidět nejen na výšce profilu, ale také na barevné škále vykreslených 3D povrchů vzorků. Zřetelný rozdíl lze pozorovat i při porovnání 2D řezů z těchto profilů, které jsou uvedeny v příloze IV a V. Hodnoty parametrů drsnosti z 3D měření pro tyto měřené materiály se velmi podobaly hodnotám naměřeným na kontaktním drsnoměru a lze tedy říci, že tento experiment potvrdil předchozí tvrzení o vlivu indexu toku taveniny na jakost povrchu polymerních výrobků.

7.7 Vliv nadmolekulární struktury na jakost povrchu polymerních výrobků

Tato část byla rozdělena do tří dílčích experimentů v závislosti na použitém materiálu tvarové dutiny. Odlišná tepelná vodivost materiálu dutiny může mít za následek různou velikost krystalické fáze jednotlivých semikrystalických polymerních materiálů, což může vést k vytvoření odlišného povrchu s různou drsností povrchu. V tomto experimentu byly použity nástrojové materiály ocel, dural a měď, které jsou popsány v kapitole 6.3.

7.7.1 Ocel ČSN 19552.4

Test normality

Použitá metoda: **Anderson -Darling**

H_0 : Data pochází ze základního souboru s normálním rozdělením

H_A : Data pochází z jiného souboru s jiným rozdělením s možností omylu $1 - \alpha = 0,05$

Hodnoty pravděpodobnosti pro zvolené materiály jsou vypsány v Tab. 7.21.

Tab. 7.21 Hodnoty pravděpodobnosti P pro test normality souborů R_a a R_z polymerních vzorků – vliv ITT – ocel

Č. vzorku – PMMA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota P pro R_a	0,606	0,43	0,87	0,428	0,517	0,429	0,509	0,880	0,097	0,673
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Hodnota P pro R_z	0,561	0,155	0,453	0,516	0,375	0,822	0,752	0,604	0,162	0,683
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Č. vzorku – PC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota P pro R_a	0,494	0,426	0,307	0,688	0,055	0,859	0,482	0,636	0,875	0,135
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Hodnota P pro R_z	0,844	0,807	0,161	0,790	0,639	0,052	0,26	0,154	0,687	0,158
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Č. vzorku – PA66	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota P pro R_a	0,174	0,607	0,883	0,424	0,910	0,429	0,649	0,550	0,746	0,084
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Hodnota P pro R_z	0,159	0,176	0,360	0,849	0,520	0,354	0,110	0,545	0,486	0,115
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Č. vzorku – PP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota P pro R_a	0,261	0,103	0,724	0,166	0,694	0,716	0,854	0,758	0,900	0,846
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Hodnota P pro R_z	0,517	0,624	0,811	0,302	0,520	0,287	0,366	0,881	0,474	0,352
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0

Z tabulky je zcela zřejmé, že všechny soubory patří do základních souborů s normálním rozdělením s možností omylu $1 - \alpha = 0,05$.

Hodnocení krystalinity

Krystalinita amorfních materiálů PC a PMMA se při měření blížila k nule, není tedy nutné u těchto materiálů statisticky hodnotit krystalickou fázi, kterou skoro vůbec neobsahují. Hodnoty krystalinity semikrystalických polymerních materiálů PP a PA66, naměřené po vstříkovaní do ocelových tvarových dutin, jsou zobrazeny v Tab. 7.22.

Tab. 7.22 Hodnoty krystalinity PP a PA66 při použití ocelové tvarové dutiny

PP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Krystalinita [%]	40,23	42,91	42,50	37,90	39,26	39,63	43,86	40,80	41,68	39,63
Arit. průměr	40,84		Sm. odch.		1,86					
PA 66	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Krystalinita [%]	20,24	16,25	20,20	17,46	16,01	18,45	16,89	20,41	19,91	19,99
Arit. průměr	18,58		Sm. odch.		1,79					

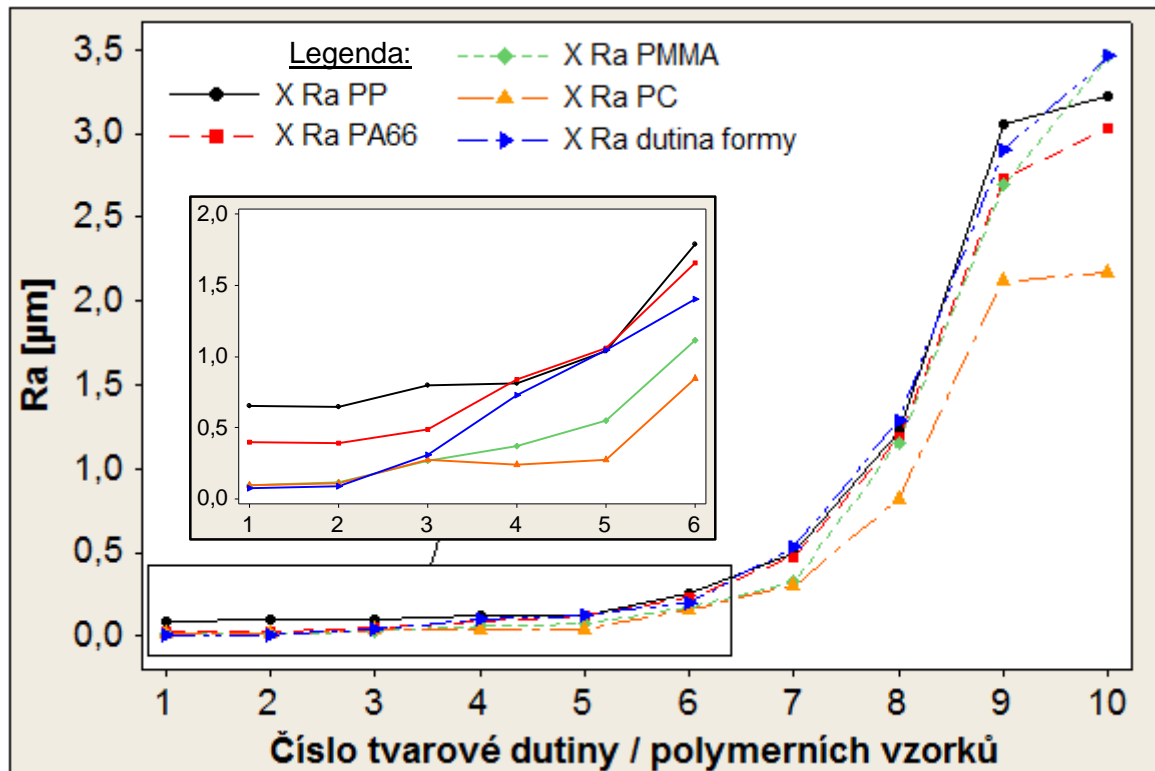
Průměrná hodnota krystalinity činila u PP 40,84 %. V praxi jsou běžně používané i materiály PP s vyšší hodnotou krystalického podílu. Pro tento experiment je ovšem tato hodnota dostačující, neboť bylo předpokládáno, že hodnota krystalického podílu druhého semikrystalického materiálu PA 66 bude nižší a bude tedy možno porovnat vliv velikosti krystalické fáze na jakost povrchu polymerních výrobků. Hodnota krystalinity PA 66 byla naměřena zhruba poloviční v porovnání s PP a to 18,58 %.

2D hodnocení drsnosti povrchu

Po kontrole odlehlých hodnot, normálního rozdělení a měření krystalinity byla data statisticky vyhodnocena pomocí mediánů a zanesena do grafů závislosti drsnosti povrchu R_a polymerních výrobku na nadmolekulární struktuře.

Tab. 7.23 Drsnost povrchu R_a pro materiály PC, PMMA, PA66 a PP - ocel

Dutina f.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_a [μm]	0,007	0,010	0,041	0,099	0,126	0,199	0,531	1,290	2,902	3,456
PC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_a [μm]	0,011	0,014	0,035	0,038	0,041	0,157	0,301	0,823	2,119	2,173
PMMA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_a [μm]	0,011	0,010	0,032	0,058	0,075	0,171	0,324	1,156	2,691	3,458
PA 66	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_a [μm]	0,033	0,029	0,051	0,090	0,118	0,228	0,473	1,184	2,729	3,028
PP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_a [μm]	0,088	0,100	0,098	0,118	0,125	0,249	0,499	1,229	3,054	3,228



Obr. 7.30 Závislost drsnosti povrchu Ra na nadmolekulární struktuře - ocel

Jak lze z přiloženého grafu pozorovat, jakost povrchu polymerního výrobku je jistým způsobem ovlivněna výběrem polymerního materiálu a také jeho nadmolekulární strukturou. Z vloženého detailu drsnosti polymerních vzorků při použití tvarové dutiny č. 1 až č. 6 jde vidět, že amorfnní polymerní materiály (PC a PMMA) dosahují velmi podobných drsností povrchu Ra jako použité tvarové dutiny. Naopak materiály semikrystalické (PP = 40,84 % a PA66 = 18,58 % krystalické fáze) vykazují drsnost povrchu v mnoha případech i více než 10x horší.

Z tabulky hodnot drsností povrchu Ra polymerních vzorků pro odlišné polymerní materiály (Tab. 7.23) lze vidět, že drsnosti povrchu jsou podobné až při použití tvarové dutiny č. 7 či č. 8. Z tohoto důvodu byla položena nulová a alternativní hypotéza, srovnávající shodnost mediánů jednotlivých polymerních materiálů při použití totožné tvarové dutiny. Z důvodu nehomogenity rozptylu byla data vyhodnocena pomocí mediánu a byl použit neparametrický test.

Použitá metoda: **Kruskal-Wallis**

Nulová a alternativní hypotéza:

$$H_0 = \tilde{X}_{PC(1-10)-ocel}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{PMMA(1-10)-ocel}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{PA66(1-10)-ocel}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{PP(1-10)-ocel}^{Ra(Rz)}$$

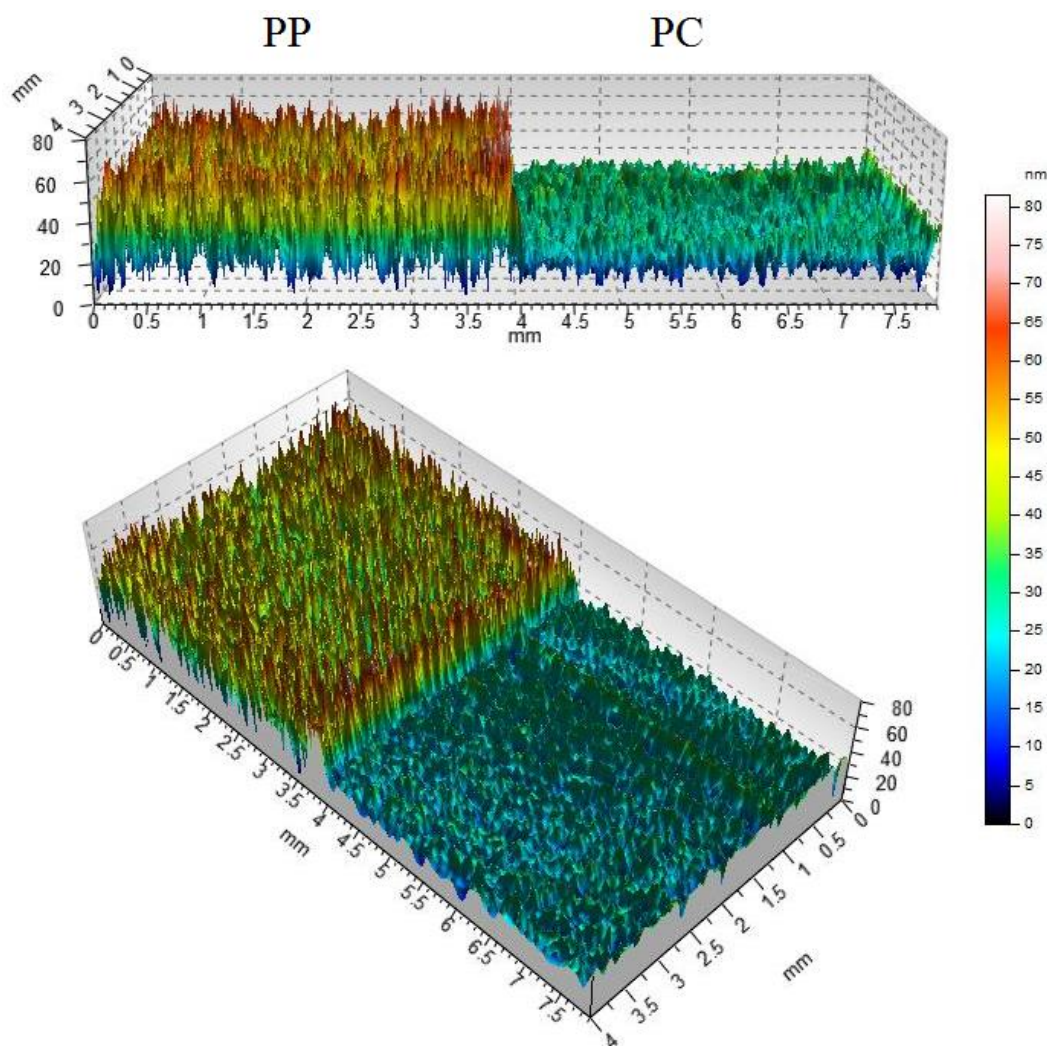
$$H_A = \text{NON} \quad (15)$$

Hodnoty pravděpodobnosti pro všechny nulové hypotézy byly vyhodnoceny shodně a to $P = 0,000$. Zamítám tedy nulovou hypotézu popisující rovnost mediánů ve prospěch hypotézy alternativní s pravděpodobností 95 %.

Lze tak říci, že nadmolekulární struktura vybraných polymerních materiálů má statisticky významný vliv na jakost povrchu polymerních výrobků při použití ocelových tvarových dutin.

3D hodnocení drsnosti povrchu

Pro tento experiment bylo použito pouze dvou reprezentujících vzorků. Z důvodu porovnání povrchu amorfního a semikrystalického polymerního materiálu byl vybrán materiál PC zastupující amorfní polymery s hodnotou krystalinity blíží se nule a PP zastupující semikrystalické polymerní materiály s hodnotou krystalinity 40,84 %.



Obr. 7.31 3D profil povrchu materiálu PP a PC – ocelová dutina č. 1

Porovnáním jednotlivých charakterů profilů povrchu amorfního a semikrystalického polymerního materiálu při použití shodných technologických podmínek vstřikování a shodné tvarové dutiny lze vidět, že semikrystalický materiál PP dosahuje zcela jiného povrchu než materiál amorfní. Výška profilu materiálu PP je nejméně dvakrát vyšší v porovnání s materiálem PC, což může být přisuzováno tvorbě krystalické fáze při chladnutí taveniny v dutině vstřikovací formy, při které tento materiál nedokázal zcela okopírovat povrch tvarové dutiny.

Provedené testy potvrdily, že data pochází ze základního souboru s normálním rozdělením neboť hodnota $P > \alpha \Rightarrow$ nezamítám nulovou hypotézu.

Hodnocení krystalinity

Krystalinita semikrystalických polymerních vzorků vyrobených pomocí duralových tvarových dutin byla měřena stejnými podmínkami jako u vzorků vyrobených na ocelových tvarových dutinách a je popsána v kapitole 6.2. Výsledky statisticky vyhodnocených dat jsou vypsány v Tab. 7.25.

Tab. 7.25 Hodnoty krystalinity PP a PA66 při použití duralové tvarové dutiny

PP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Krystalinita [%]	39,06	39,57	37,92	39,19	39,47	39,12	38,23	38,61	38,54	38,94
Arit. průměr	38,87		Sm. odch.		0,01					
PA 66	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Krystalinita [%]	23,61	20,67	23,90	23,01	25,64	24,97	23,48	23,16	23,29	23,63
Arit. průměr	23,54		Sm. odch.		0,02					

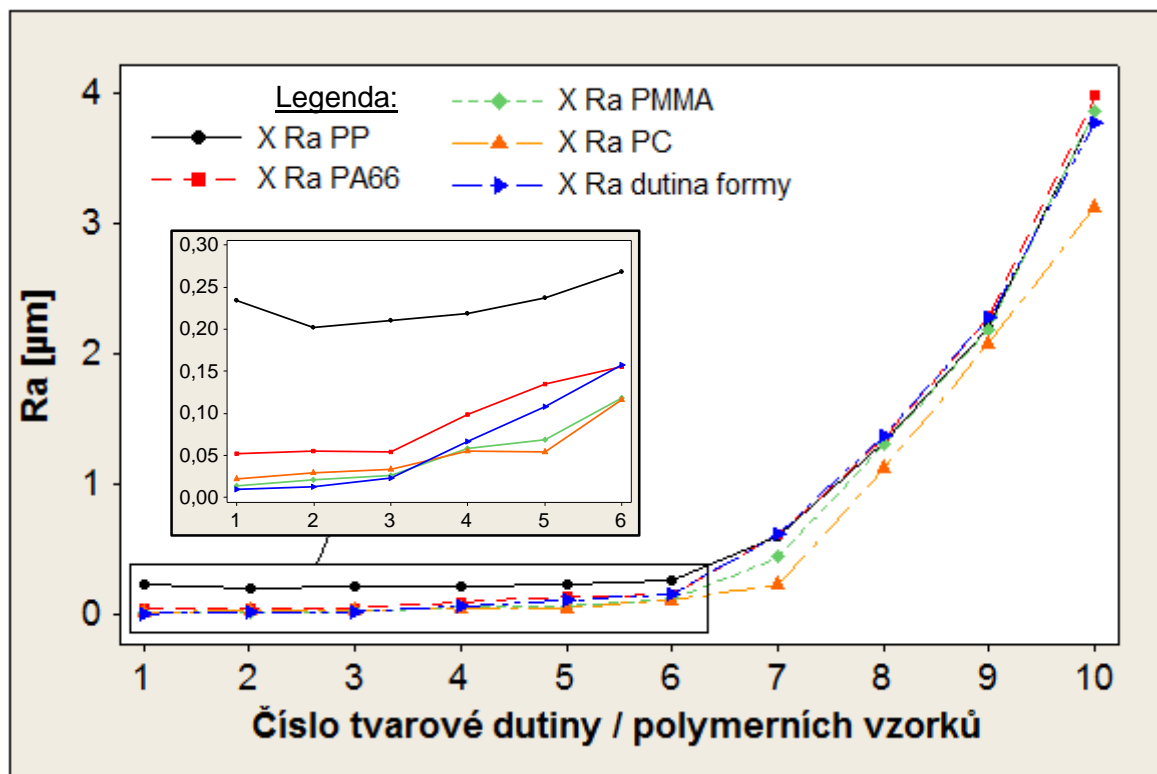
Z Tab. 7.25 jde vidět, že hodnota krystalinity, při použití duralu jako materiálu tvarových dutin, je u materiálu PP zhruba dvakrát vyšší v porovnání s PA66. Při porovnání krystalinity těchto materiálů vstříkovaných do ocelových dutin (Tab. 7.22), lze konstatovat, že krystalinita u PA66 se zvýšila poměrně výrazně. Naopak hodnota u PP se mírně snížila, ale je srovnatelná s krystalinitou naměřenou u ocelových tvarových dutin.

2D hodnocení drsnosti povrchu

Naměřená data drsností povrchu R_a a R_z naměřené pomocí 2D kontaktního drsnoměru, byla vyhodnocena pomocí mediánu a zanesena do grafu závislosti drsnosti povrchu R_a polymerních vzorků na nadmolekulární struktuře.

Tab. 7.26 Drsnost povrchu R_a pro materiály PC, PMMA, PA66 a PP - dural

Dutina f.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_a [μm]	0,010	0,013	0,024	0,067	0,108	0,158	0,618	1,349	2,275	3,771
PC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_a [μm]	0,023	0,029	0,034	0,055	0,054	0,117	0,226	1,122	2,084	3,128
PMMA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_a [μm]	0,014	0,021	0,027	0,058	0,068	0,118	0,441	1,304	2,190	3,864
PA 66	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_a [μm]	0,053	0,055	0,054	0,099	0,135	0,155	0,612	1,345	2,288	3,976
PP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_a [μm]	0,234	0,202	0,211	0,219	0,237	0,268	0,608	1,327	2,205	3,859



Obr. 7.32 Závislost drsnosti povrchu Ra na nadmolekulární struktuře - dural

Z Obr. 7.32 je patrné, že při použití duralových tvarových dutin platí stejné zákonitosti, které byly stanoveny při použití ocelových tvarových dutin. Nejvyšších hodnot drsností Ra bylo naměřeno u materiálu PP s nejvyšším obsahem krystalické fáze. Mírně lépe pak byla dosažena drsnost povrchu Ra vzorků u materiálu PA66, jehož krystalická fáze rovněž není nulová, tak jak tomu je u amorfních materiálů PC a PMMA, u nichž byla vyhodnocena nejlepší jakost povrchu.

Určité rozdíly při vstřikování do totožné tvarové dutiny v závislosti na typu polymerního materiálu lze rovněž pozorovat z vyhodnocených dat v Tab. 7.26. Z tohoto důvodu byl proveden Kruskal-Wallisův test popisující shodu mediánů drsností Ra a Rz vzorků čtyř polymerních materiálů při použití totožné tvarové dutiny.

Použitá metoda: **Kruskal-Wallis**

Nulová a alternativní hypotéza:

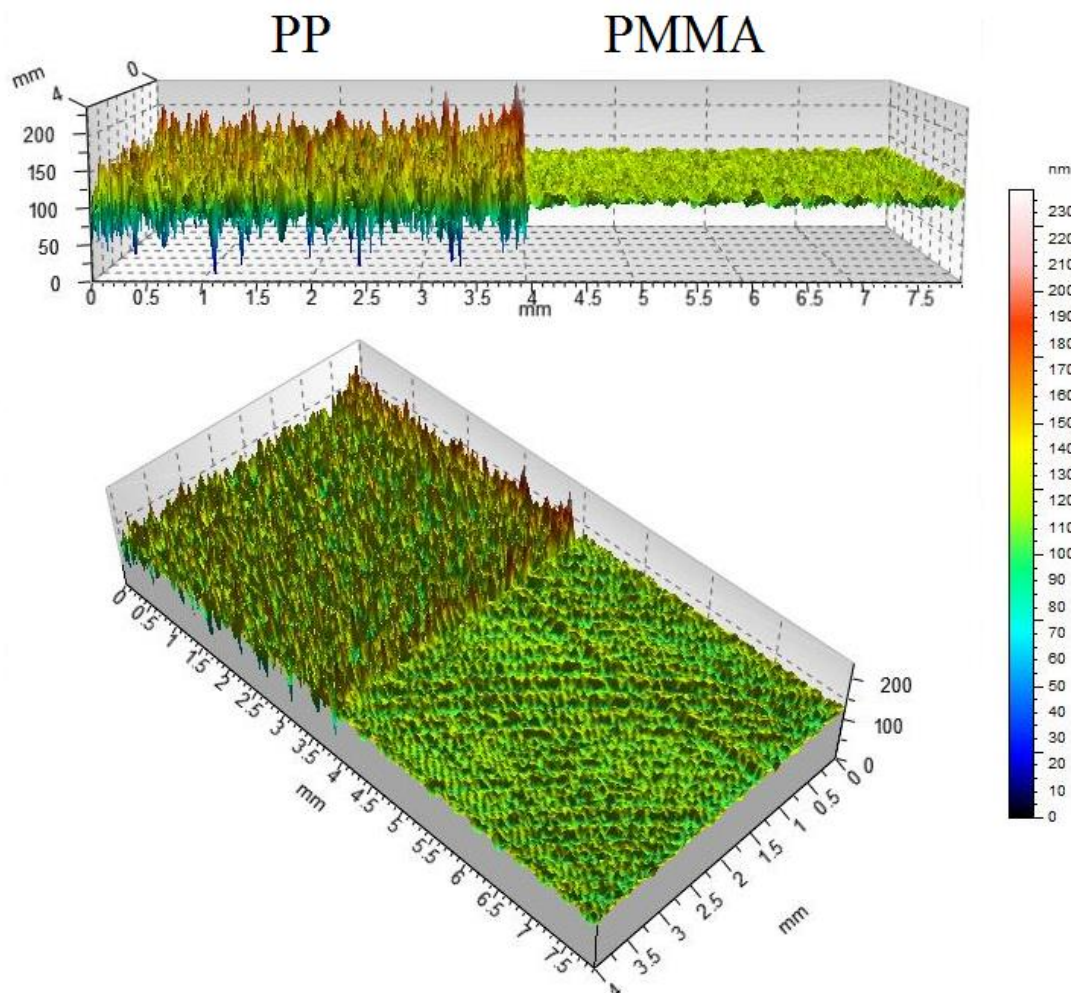
$$H_0 = \tilde{X}_{PC(1-10)-dural}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{PMMA(1-10)-dural}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{PA66(1-10)-dural}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{PP(1-10)-dural}^{Ra(Rz)}$$

$$H_A = \text{NON} \quad (16)$$

Všechny hodnoty pravděpodobností P byly vyhodnoceny hodnotou 0,000 a to pro všechny tvarové dutiny. Hodnota $P < \alpha \Rightarrow$ zamítám nulovou hypotézu o rovnosti mediánů ve prospěch hypotézy alternativní s pravděpodobností 95%. Lze tedy říci, že drsnost povrchu Ra a Rz u duralových tvarových dutin je rovněž statisticky významně závislá na nadmolekulární struktuře polymerů. Parametr drsnosti Rz potvrzující tato tvrzení je vyhodnocen formou grafu v příloze II.

3D hodnocení drsnosti povrchu

Měření 3D profilu povrchu bylo u duralových tvarových dutin provedeno na polymerních vzorcích z materiálu PP a PMMA, které byly vstříkovány do tvarové dutiny č. 1, tedy leštěné dutiny. Tyto dva materiály byly vybrány zejména z důvodu předchozího 2D měření, kde byl vyhodnocen poměrně velký rozdíl v jakosti povrchu vzorků při použití totožné tvarové dutiny.



Obr. 7.33 3D profil povrchu materiálu PP a PMMA – duralová dutina č. 1

Z přiloženého Obr. 7.33 a zejména z předního pohledu, který výrazněji vykresluje výšku profilu povrchu těchto materiálů, je očividné, že semikrystalický materiál PP vykazuje mnohem vyšší výstupky a nižší prohlubně v porovnání s amorfním materiálem PMMA. Při detailním hodnocení pomocí barevného měřítka těchto povrchu, lze vidět, že hodnoty materiálu PP jsou několikanásobně vyšší v porovnání s poměrně nízkým profilem materiálu PMMA. Naměřené hodnoty 3D a 2D spolu velmi dobře korelují a lze tedy konstatovat, že i 3D měření prokázalo vliv nadmolekulární struktury na jakost povrchu polymerních materiálů při použití duralových tvarových dutin.

Porovnání 2D řezů z těchto 3D profilů v ose X tedy v ose shodné s měřením 2D kontaktní metodou je možné v Příloze VIII a IX.

7.7.3 Měď ČSN 423001

Tento nástrojový materiál byl vybrán z důvodu dvakrát vyšší tepelné vodivosti v porovnání s duralem a až šestkrát vyšší v porovnání s ocelí. Lze tak očekávat, že i v případě tohoto materiálu dojde k určitým změnám v hodnotě krystalické fáze semikrystalických polymerů.

Test normality

Použitá metoda: **Anderson -Darling**

H_0 : Data pochází ze základního souboru s normálním rozdělením

H_A : Data pochází z jiného souboru s jiným rozdělením s možností omylu $1 - \alpha = 0,05$

Hodnoty pravděpodobnosti pro zvolené materiály jsou vypsány v Tab. 7.27.

Tab. 7.27 Hodnoty pravděpodobností P pro test normality souborů R_a a R_z polymerních vzorků – vliv ITT - měď

Č. vzorku-PMMA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota P pro R_a	0,748	0,479	0,579	0,834	0,839	0,481	0,201	0,598	0,415	0,911
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Hodnota P pro R_z	0,247	0,481	0,148	0,760	0,545	0,374	0,838	0,930	0,395	0,971
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Č. vzorku – PC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota P pro R_a	0,436	0,733	0,319	0,076	0,352	0,513	0,633	0,120	0,163	0,719
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Hodnota P pro R_z	0,487	0,063	0,627	0,579	0,911	0,089	0,465	0,918	0,349	0,268
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Č. vzorku – PA66	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota P pro R_a	0,509	0,524	0,892	0,503	0,580	0,165	0,985	0,120	0,098	0,848
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Hodnota P pro R_z	0,418	0,084	0,756	0,580	0,294	0,183	0,341	0,060	0,168	0,107
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Č. vzorku – PP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota P pro R_a	0,160	0,239	0,947	0,262	0,227	0,235	0,298	0,227	0,296	0,894
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Hodnota P pro R_z	0,051	0,718	0,832	0,123	0,801	0,251	0,903	0,053	0,059	0,138
Platná hypotéza	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0

Z tabulky je zcela zřejmé, že všechny soubory patří do základních souborů s normálním rozdělením neboť hodnota $P > \alpha \Rightarrow$ nezamítám H_0 .

Hodnocení krystalinity

I v případě vstřikování polymerních vzorků na tvarových dutinách z mědi byly vzorky podrobeny testu krystalinity pro zjištění, zda materiál vstřikovací formy ovlivňuje velikost krystalické fáze. Měření probíhalo stejnými podmínkami jako u oceli a duralu a je popsáno v kapitole 6.2. Výsledné hodnoty jsou zobrazeny v Tab. 7.28.

Tab. 7.28 Hodnoty krystalinity PP a PA66 při použití měděné tvarové dutiny

PP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Krystalinita [%]	38,75	37,58	38,77	38,73	37,91	38,44	37,92	37,52	37,85	37,64
Arit. průměr	38,11		Sm. odch.		0,01					
PA 66	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Krystalinita [%]	23,68	21,64	21,23	21,03	21,66	22,67	21,14	22,10	21,81	21,60
Arit. průměr	21,86		Sm. odch.		0,01					

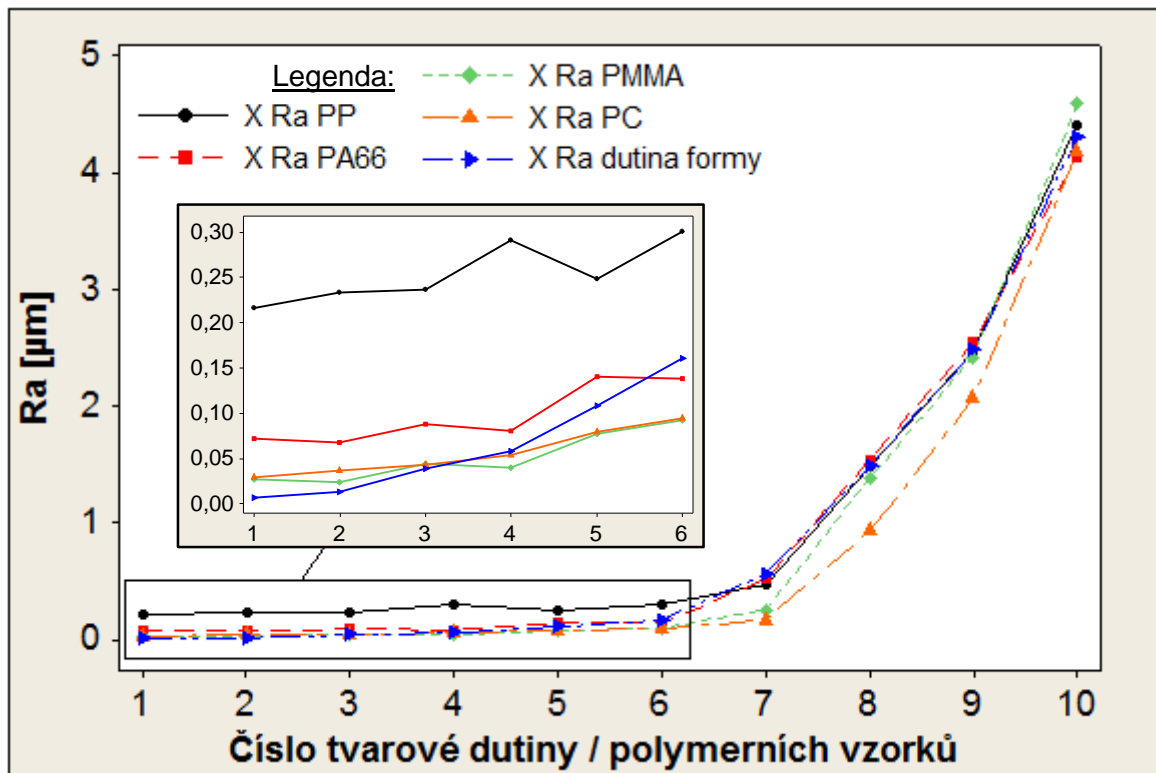
Po vyhodnocení krystalické fáze si lze povšimnout stejné zákonitosti při vstřikování do měděných forem, tak jako při vstřikování do duralu a oceli. Materiál PP má hodnotu krystalické fáze takřka dvakrát vyšší než materiál PA66. V porovnání s použitím ostatních nástrojových materiálů se při použití mědi razantněji zvýšila hodnota krystalické fáze u PA66, kdežto krystalinita PP se mírně snížila, ale je srovnatelná s použitím ostatních nástrojových materiálů.

2D hodnocení drsnosti povrchu

Po vyhodnocení krystalinity semikrystalických polymerních materiálů byly vzorky měřeny pomocí drsnoměru Form Talysurf 50. Parametry drsnosti R_a a R_z byly následně statisticky vyhodnoceny pomocí mediánů a zaneseny do grafu (Obr. 7.34).

Tab. 7.29 Drsnost povrchu R_a pro materiály PC, PMMA, PA66 a PP - měď

Dutina f.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_a [μm]	0,008	0,013	0,039	0,085	0,109	0,161	0,559	1,847	2,476	4,304
PC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_a [μm]	0,030	0,037	0,043	0,054	0,079	0,095	0,169	0,928	2,061	4,186
PMMA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_a [μm]	0,027	0,024	0,044	0,040	0,078	0,093	0,254	1,381	2,420	4,594
PA 66	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_a [μm]	0,072	0,069	0,088	0,081	0,141	0,139	0,517	1,538	2,547	4,132
PP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_a [μm]	0,216	0,233	0,237	0,291	0,249	0,300	0,477	1,492	2,463	4,411



Obr. 7.34 Závislost drsnosti povrchu Ra na nadmolekulární struktuře – měď

Z grafu závislosti drsnosti povrchu Ra polymerních výrobků na typu polymerního materiálu při použití měděných tvarových dutin lze vidět, že semikrystalické polymerní materiály vykazují při použití stejné tvarové dutiny několikanásobně vyšší hodnotu drsnosti Ra . Zejména pak materiál PP, který obsahuje nejvyšší procento krystalické fáze, zcela nekopíroval velmi kvalitní povrch tvarových dutin, a povrch tvarové dutiny začal kopírovat až u soustružených tvarových dutin.

Ze statisticky vyhodnocených dat Tab. 7.29 si lze povšimnout, že kromě amorfního materiálu PMMA a PC nedochází u velmi kvalitně dokončených tvarových dutin (č. 1 - 5) ke kopírování jejich povrchu. Důkaz o silném vlivu typu polymerního materiálu na jakost povrchu byl prověřen pomocí nulových a alternativních hypotéz.

Použitá metoda: **Kruskal-Wallis**

Nulová a alternativní hypotéza:

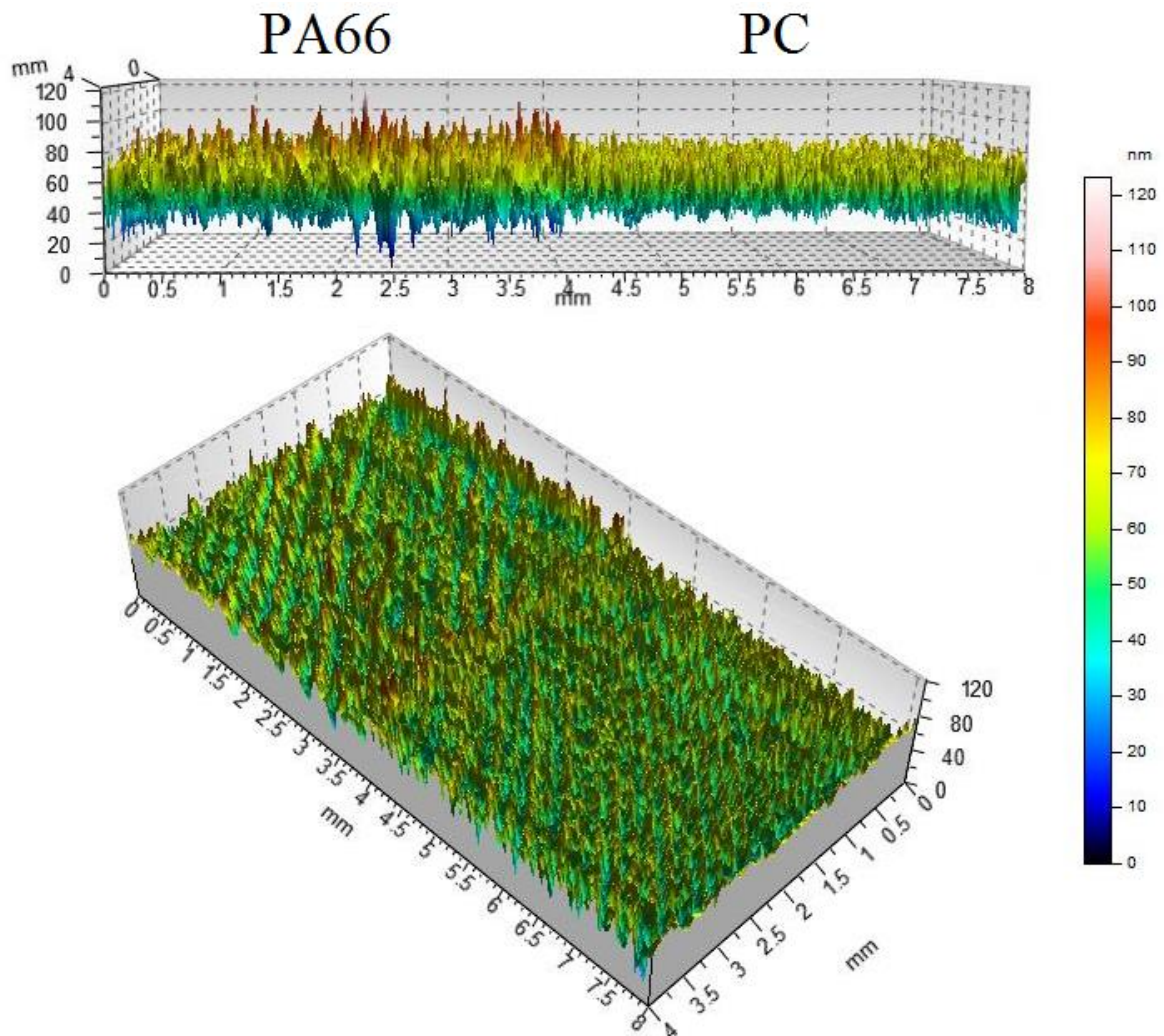
$$H_0 = \tilde{X}_{PC(1-10)-měď}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{PMMA(1-10)-měď}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{PA66(1-10)-měď}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{PP(1-10)-měď}^{Ra(Rz)}$$

$$H_A = \text{NON} \quad (17)$$

I v případě použití měděných tvarových dutin byla hodnota pravděpodobnosti vyhodnocena $P = 0,000$ při použití všech tvarových dutin. Nulová hypotéza je tedy zamítnuta ve prospěch hypotézy alternativní neboť $P < \alpha$. U měděných tvarových dutin, tak lze vyvodit stejný závěr jako u ocelových a duralových a to takový, že drsnost polymerních výrobků je silně závislá na nadmolekulární struktuře polymeru a také na velikosti krystalické fáze.

3D hodnocení drsnosti povrchu

Hodnocení 3D povrchu polymerních vzorků při použití měděných tvarových dutin posloužilo zejména pro porovnání výsledků dosažených měření kontaktní metodou. Jako reprezentující vzorky pro toto porovnání byly vybrány vzorky polymerního materiálu PA66 a PC, které byly vyrobeny na leštěné tvarové dutině. Porovnání profilů se shodným měřítkem je zobrazeno v Obr. 7.35.



Obr. 7.35 3D profil povrchu materiálu PA66 a PC – měděná dutina č. 1

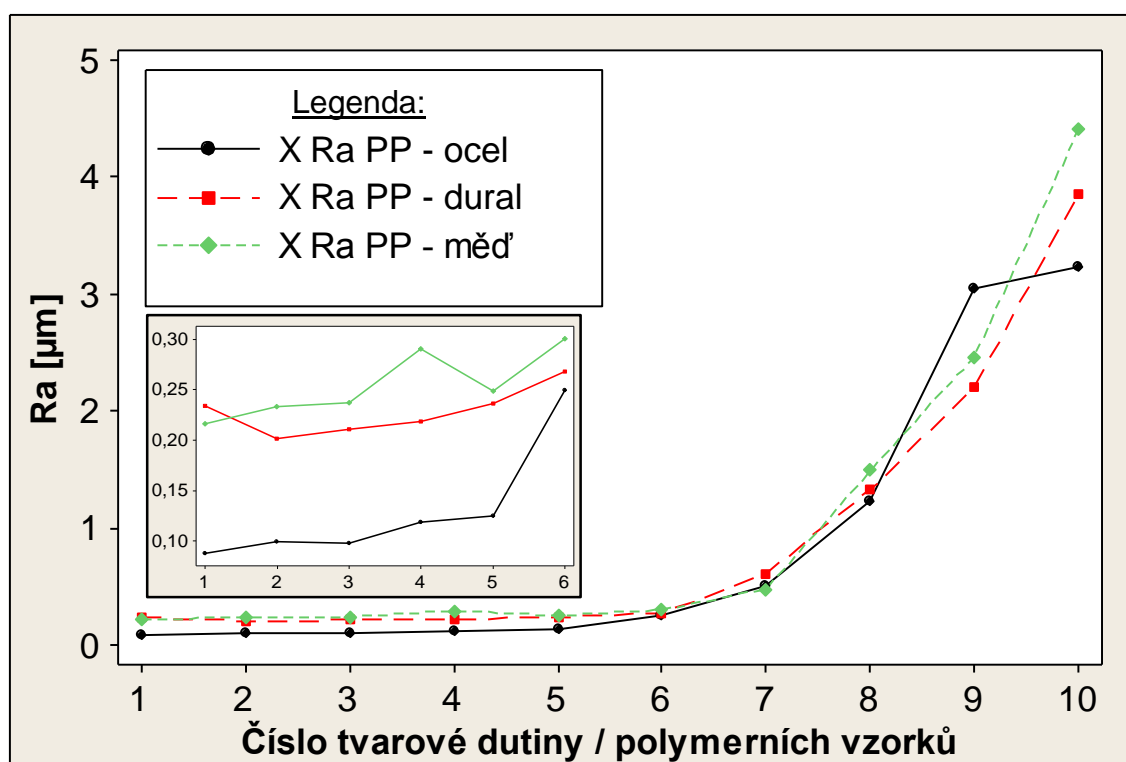
Z příložených detailů profilu povrchu jde dobře vidět, že při použití totožné tvarové dutiny (měď – č. 1), vykazuje amorfnní polymerní materiál PC nižších výstupků i prohlubní v profilu, je tedy zřejmé, že tento materiál dosahuje i nižší drsnosti R_a a R_z v porovnání se semikrystalickým materiálem PA 66. Naměřené hodnoty velmi dobře korelují s hodnotami naměřenými 2D kontaktním profiloměrem a lze tak i v tomto případě potvrdit předchozí tvrzení o poměrně silném vlivu typu polymerního materiálu (amorfnní, semikrystalický) na drsnost povrchu polymerního výrobku.

7.8 Vliv materiálu tvarové dutiny na jakost povrchu polymer- ních výrobků

Tento experiment byl proveden zejména s ohledem na možnosti použití odlišných materiálů v konstrukci vstřikovací formy. Z široké škály možností použití nástrojových materiálů byl vybrán materiál ocel, měď a dural. Jejich vlastnosti jsou podrobně popsány v kapitole 6.3, stejně jako technologické podmínky vstřikování jednotlivých polymerních materiálů, které jsou popsány v kapitole 6.5.3. Hodnoty byly kontrolovány na normální rozdělení pomocí Anderson-Darlingova testu. Tyto testy jsou pro všechny materiály vyhodnoceny v Tab. 7.21, Tab. 7.24 a Tab. 7.27.

7.8.1 Materiál PP

Hodnota krystalinity se u tohoto materiálu pohybovala při použití ocelové, duralové a měděné tvarové dutiny v poměrně úzkém intervalu. Nejvyšší hodnota krystalické fáze byla vyhodnocena při použití ocelových tvarových dutin 40,84 %. Mírný pokles byl pak pozorován při použití duralu – 38,87 % a mědi – 38,18 %. Lze tedy tvrdit, že použití odlišného materiálu dutiny vstřikovací formy může mít za následek změnu velikosti krystalické fáze, ale v případě materiálu PP ji ovlivňuje pouze mírně.



Obr. 7.36 Závislost drsnosti povrchu R_a na materiálu tvarové dutiny - PP

Z Obr. 7.36 lze vidět, že se drsnost povrchu R_a polymerních výrobků z materiálu PP při použití odlišných materiálů tvarové dutiny liší, a to zejména u velmi přesně dokončených tvarových dutin (č. 1 - 5). V oblasti použití tvarových dutin s vyššími hodnotami drsnosti povrchu R_a již nedochází k tak významné změně.

Tato skutečnost lze podrobně vidět v detailu grafu ale také v Tab. 7.30, ve které jsou vypsány mediány jednotlivých souborů. V této tabulce jsou rovněž vypsány mediány drsností tvarových dutin z oceli, duralu a mědi. Po bližším prozkoumání si lze povšimnout, že hodnoty drsností Ra tvarových dutin všech nástrojových materiálů se podobají a liší se zejména u velmi přesných dokončovací operací pouze v setinách mikrometru.

Tab. 7.30 Hodnoty drsností Ra polymerních vzorku PP a tvarových dutin

Ocel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
* Ra dutiny	0,007	0,010	0,041	0,099	0,126	0,199	0,531	1,290	2,902	3,456
* Ra vzorek	0,088	0,100	0,098	0,119	0,126	0,249	0,499	1,229	3,054	3,228
Dural	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
* Ra dutiny	0,010	0,013	0,024	0,067	0,108	0,158	0,618	1,349	2,275	3,771
* Ra vzorek	0,234	0,202	0,211	0,219	0,237	0,268	0,608	1,327	2,205	3,859
Měď	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
* Ra dutiny	0,008	0,013	0,039	0,085	0,109	0,161	0,559	1,847	2,476	4,304
* Ra vzorek	0,216	0,233	0,237	0,291	0,249	0,300	0,477	1,492	2,463	4,411

*Všechny hodnoty jsou uvedeny v μm

Pro statistickou kontrolu vlivu materiálu tvarové dutiny na jakost povrchu PP výrobků byl použit neparametrický test, z důvodu nerovnosti rozptylů.

Použitá metoda: **Kruskal-Wallis**

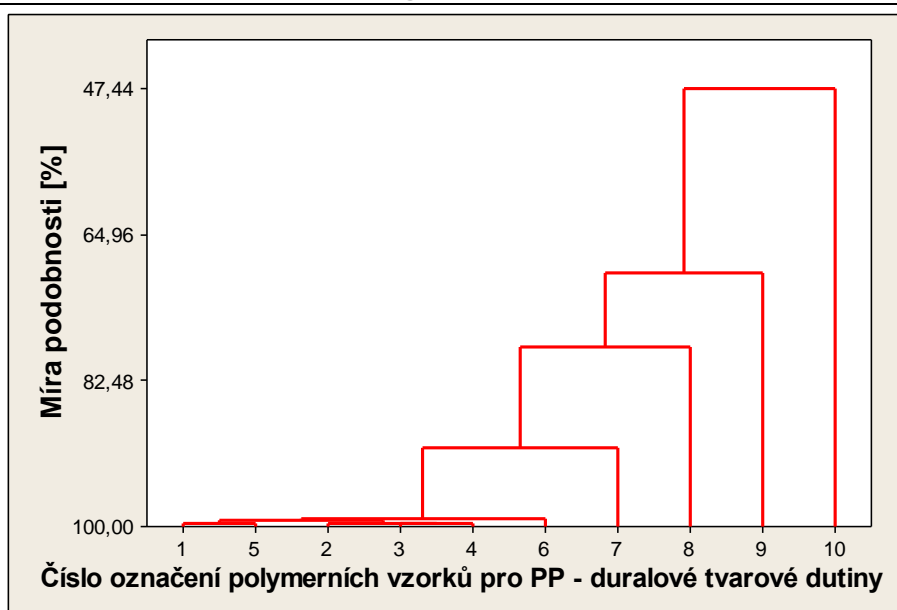
Nulová a alternativní hypotéza:

$$H_0 = \tilde{X}_{PP-ocel(1-10)}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{PP-dural(1-10)}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{PP-měď(1-10)}^{Ra(Rz)} \quad (18)$$

$$H_A = \text{NON}$$

Tento test byl použit pro všechny soubory drsností Ra a Rz polymerních výrobků při použití všech deseti tvarových dutin z odlišných materiálů, přičemž hodnota pravděpodobnosti všech testů byla vyhodnocena na $P = 0,000$. Jelikož $P < \alpha$ zamítám nulovou hypotézu o rovnosti mediánů jednotlivých souborů a mohu tvrdit, že materiál tvarové dutiny má statisticky významný vliv na drsnost povrchu polymerních výrobků z polypropylenu.

Z příloženého grafu (Obr. 7.36) lze vidět, že dochází k velké podobnosti drsnosti povrchu Ra u materiálu PP, při použití tvarové dutiny č. 1 až č. 5, a to u všech materiálů tvarových dutin. Z tohoto důvodu byly zkonstruovány a prostudovány dendrogramy ukazující míru podobnosti jednotlivých souborů.

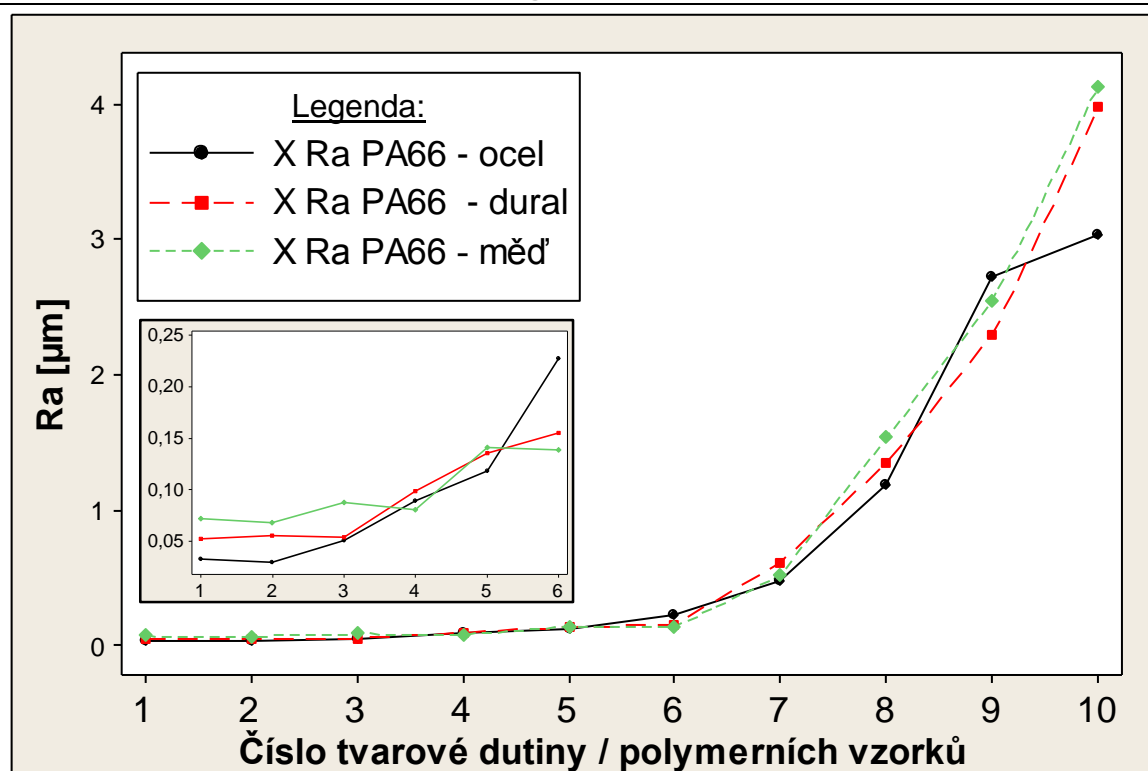


Obr. 7.37 Dendrogram materiálu PP pro duralové tvarové dutiny

Z přiloženého dendrogramu pro duralové tvarové dutiny lze vidět, že největší míru podobnosti dosahuje drsnost povrchu polymerních vzorků při použití tvarových dutin č. 1 a č. 5. Nicméně i při použití tvarových dutin č. 2, 3 a 4 bylo dosaženo vysoké míry podobnosti s těmito dutinami. Pro materiály formy ocel a měď byly vyhodnoceny tyto míry podobnosti velmi podobně. Kruskal-Wallisův test shodu mediánů souborů č. 1 a 5 zamítnul, nicméně z přiloženého dendrogramu, detailu grafu či vyhodnocených hodnot lze vidět, že rozdíly mezi použitím jednotlivých tvarových dutin se liší pouze v desetínách či spíše setinách mikrometrů, a je tak velmi důležité u tohoto materiálu přemýšlet nad výhodností či nevýhodností použití leštění a lapování jako dokončovacích operací tvarové dutiny.

7.8.2 Materiál PA66

Krystalická fáze tohoto polymerního materiálu se při použití odlišných nástrojových materiálů lišila výrazněji v porovnání s PP. Nejnižší hodnota byla vyhodnocena při vstřikování do tvarových dutin z oceli 18,58 %. Při použití měděných a duralových tvarových dutin narostla krystalická fáze, zřejmě z důvodu vyšší tepelné vodivosti těchto materiálů. U měděných tvarových dutin byla hodnota krystalinity pro tento materiál 21,86 % a u duralových až 23,54 %. Rozdíl mezi ocelí a duralem je tak poměrně výrazný a lze říci, že u tohoto polymerního materiálu měl nástrojový materiál větší vliv na velikost krystalické fáze než u PP.



Obr. 7.38 Závislost drsnosti povrchu Ra na materiálu tvarové dutiny – PA66

Jak lze z grafu vidět, hodnoty drsností Ra se při použití odlišných materiálů tvarových dutin liší a to zejména v oblasti, kdy byly použity velmi přesně dokončované tvarové dutiny (č. 1 – 3). Při použití tvarových dutin s horší jakostí povrchu již nedochází k tak razantním odchýlkám, což je patrné i z příložené Tab. 7.31.

Tab. 7.31 Hodnoty drsností Ra polymerních vzorku PA 66 a tvarových dutin

Ocel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
* Ra dutiny	0,007	0,010	0,041	0,099	0,126	0,199	0,531	1,290	2,902	3,456
* Ra vzorek	0033	0,030	0,051	0,090	0,118	0,228	0,473	1,184	2,729	3,028
Dural	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
* Ra dutiny	0,010	0,013	0,024	0,067	0,108	0,158	0,618	1,349	2,275	3,771
* Ra vzorek	0,052	0,055	0,054	0,099	0,135	0,155	0,611	1,345	2,288	3,976
Měď	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
* Ra dutiny	0,008	0,013	0,039	0,085	0,109	0,161	0,559	1,847	2,476	4,304
* Ra vzorek	0,072	0,068	0,088	0,081	0,141	0,139	0,517	1,538	2,547	4,132

*Všechny hodnoty jsou uvedeny v μm

V praxi jsou vstřikovací formy nejčastěji broušeny, lapovány a leštěny. Je tedy důležité ověřit, jak nástrojový materiál ovlivňuje drsnost povrchu polymerních výrobků a to zejména při použití tvarových dutin č. 1 až č. 5. Tento vliv byl hodnocen pomocí neparametrického testu, neboť nebyla dosažena shodnost rozptylů a nemohla být použita parametrická ANOVA, založená na hodnocení průměrů.

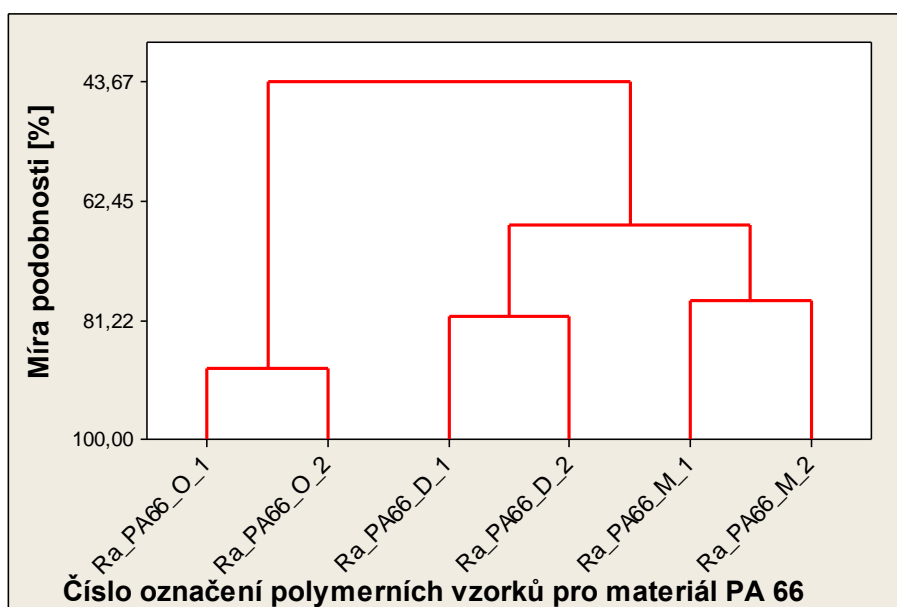
Použitá metoda: **Kruskal-Wallis** Nulová a alternativní hypotéza:

$$H_0 = \tilde{X}_{PA66-ocel(1-10)}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{PA66-dural(1-10)}^{Ra(Rz)} = \tilde{X}_{PA66-měd'(1-10)}^{Ra(Rz)} \quad (19)$$

$$H_A = \text{NON}$$

Z provedených testů bylo zjištěno, že pro všechny soubory drsností povrchu Ra a Rz polymerních vzorků při použití jednotlivých tvarových dutin, byla hodnota pravděpodobnosti rovna $P = 0,000$. Nejdůležitější je tento údaj zejména pro tvarové dutiny č. 1 až č. 5, neboť lze říci, že u těchto přesně dokončených tvarových dutin dochází ke statisticky významnému vlivu materiálu tvarové dutiny na jakost povrchu polymerních výrobků u materiálu PA66.

Ze zkonstruovaného grafu (Obr. 7.38) závislosti lze vidět, že drsnost povrchu Ra při použití tvarové dutiny č. 1 a č. 2 jsou velmi podobné a to u všech materiálů tvarových dutin přičemž výrobní doba a cena lapované dutiny (č. 2) je výrazně nižší v porovnání s leštěnou (č. 1). Pro zjištění míry podobnosti těchto souborů byl vytvořen dendrogram.



Obr. 7.39 Dendrogram materiálu PA 66 pro tvarové dutiny č. 1 a 2

Největší míry podobnosti v tomto souboru vždy dosahují tvarové dutiny č. 1 a 2 stejných materiálů formy. Tato skutečnost vedla k nutnosti provést statistický test o shodnosti mediánů jednotlivých souborů.

Použitá metoda: **Kruskal-Wallis** Nulová a alternativní hypotéza:

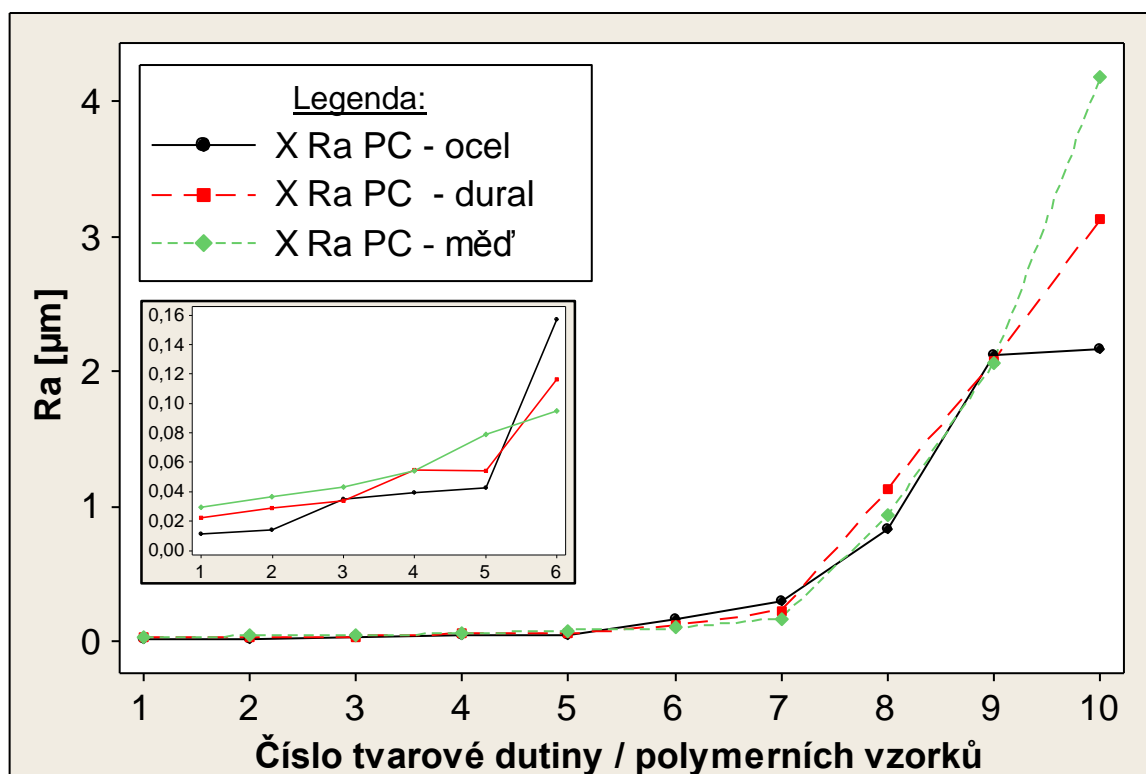
Tab. 7.32 Kruskal-Wallisuv test materiálu PA66 pro dutiny č. 1 a 2

Nulová hypotéza:	Alternativní hypotéza	Ocel	Dural	Měď
		Hodnota pravděpodobnosti P		
$H_0 = \tilde{X}_1^{Ra} = \tilde{X}_2^{Ra}$	$H_A = \text{NON}$	0,089	0,096	0,290
$H_0 = \tilde{X}_1^{Rz} = \tilde{X}_2^{Rz}$	$H_A = \text{NON}$	0,762	0,290	0,112

Jak lze vidět z Tab. 7.32 všechny hodnoty pravděpodobnosti P byly vyhodnoceny jako větší než $\alpha = 0,05$. $P > \alpha \Rightarrow$ nezamítám nulovou hypotézu o rovnosti mediánů souborů drsností polymerních výrobků při použití tvarové dutiny 1 a 2 a to u všech použitých materiálů formy. Lze tedy říci, že v případě materiálu PA66 není příliš výhodné dokončovat tvarovou dutinu leštěním, neboť tento materiál není schopen kopírovat tak vysoce kvalitní povrch dutiny vstříkovací formy.

7.8.3 Materiál PC

Materiál polykarbonát byl do tohoto experimentu zařazen zejména pro svou amorfni strukturu. V porovnání s předchozími semikrystalickými materiály nemusí tento materiál podléhat tak silně vlivu materiálu tvarové dutiny na drsnost povrchu polymerního výrobku. Vyhodnocená naměřená data drsností povrchu R_a v podobě mediánu jsou zobrazena v Obr. 7.40.



Obr. 7.40 Závislost drsnosti povrchu R_a na materiálu tvarové dutiny – PC

Z grafu závislosti drsnosti povrchu R_a polymerních vzorků na materiálu tvarové dutiny pro polymerní materiál PC a zejména z jeho detailu, lze vidět, že předchozí domněnka spojená s nadmolekulární strukturou polymerních materiálů nebyla příliš pravdivá. I u tohoto polymerního materiálu lze vidět již z grafické závislosti, že dochází k určitým rozdílům při použití ocelové, duralové či měděné tvarové dutiny, což potvrzují i statisticky vyhodnocená data v Tab. 7.33.

Tab. 7.33 Hodnoty drsností Ra polymerních vzorku PC a tvarových dutin

Ocel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
*Ra dutiny	0,007	0,010	0,041	0,099	0,126	0,199	0,531	1,290	2,902	3,456
*Ra vzorek	0,011	0,014	0,035	0,039	0,043	0,157	0,301	0,832	2,119	2,173
Dural	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
*Ra dutiny	0,010	0,013	0,024	0,067	0,108	0,158	0,618	1,349	2,275	3,771
*Ra vzorek	0,023	0,029	0,034	0,055	0,054	0,117	0,2260	1,122	2,083	3,128
Měď'	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
*Ra dutiny	0,008	0,013	0,039	0,085	0,109	0,161	0,559	1,847	2,476	4,304
*Ra vzorek	0,029	0,037	0,043	0,054	0,079	0,095	0,168	0,928	2,061	4,186

*Všechny hodnoty jsou uvedeny v μm

Po důkladném zhlédnutí hodnot mediánů jednotlivých souborů v Tab. 7.33 Tab. 7.33 byl proveden test popisující shodu mediánů jednotlivých souborů.

Použitá metoda: **Kruskal-Wallis**

Nulová a alternativní hypotéza:

$$H_0 = \tilde{X}_{PC-ocel}^{Ra(Rz)}(1-10) = \tilde{X}_{PC-dural}^{Ra(Rz)}(1-10) = \tilde{X}_{PC-měď'}^{Ra(Rz)}(1-10) \quad (20)$$

$$H_A = \text{NON}$$

Tento test opět zamítl nulovou hypotézu o shodě mediánů souborů drsností Ra a Rz polymerních vzorků při použití tvarových dutin (ocel, dural, měď') se stejným označením s pravděpodobností 95%, neboť hodnota pravděpodobnosti byla pro všechny testované tvarové dutiny stanovena $P = 0,000$. Lze tedy tvrdit, že vliv materiálu tvarové dutiny má statisticky významný vliv na drsnost povrchu polymerních výrobku z PC.

Z detailu vloženého grafu závislosti drsnosti polymerních vzorků na materiálu tvarové dutiny lze vidět, že tento materiál velmi dobře kopíruje všechny tvarové dutiny všech použitých materiálů formy. V případě tohoto materiálů bylo dosaženo podobné kvality u tvarové dutiny č. 1 a 2, jako v případě PA66 a je tedy nezbytné provést test shodnosti mediánů jednotlivých souborů.

Použitá metoda: **Kruskal-Wallis**

Nulová a alternativní hypotéza:

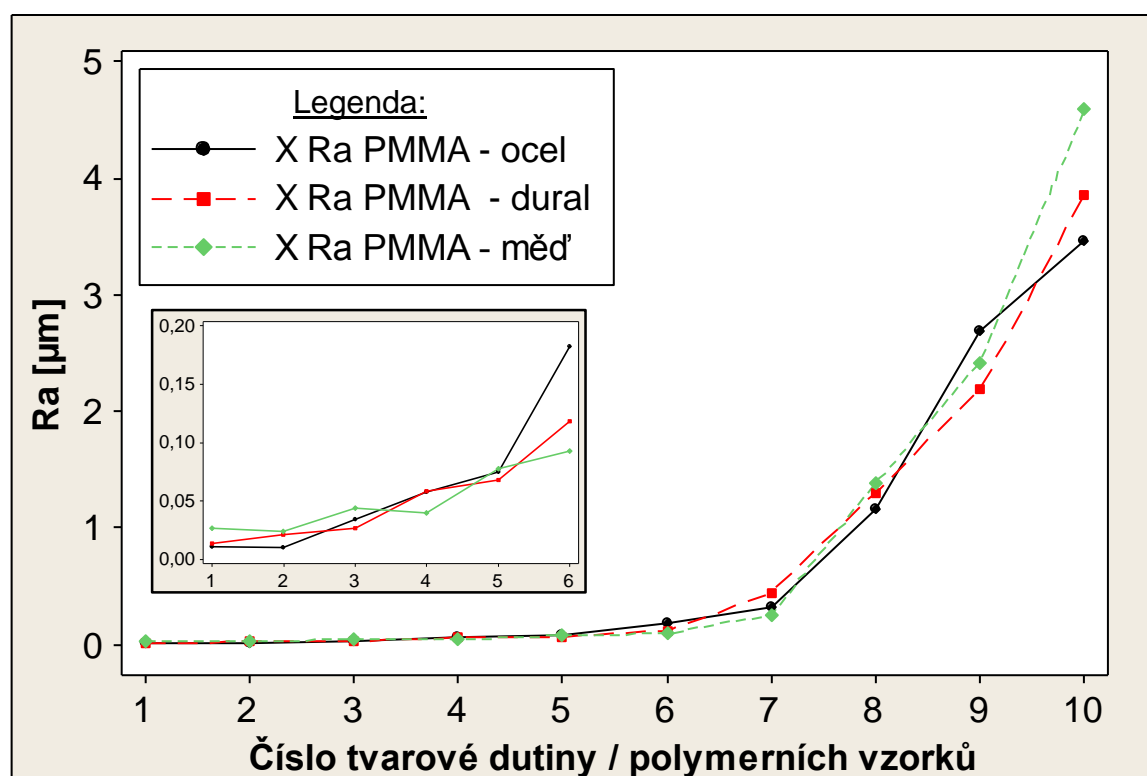
Tab. 7.34 Kruskal-Wallisuv test materiálu PA66 pro dutiny č. 1 a 2

Nulová hypotéza:	Alternativní hypotéza	Ocel	Dural	Měď'
		Hodnota pravděpodobnosti P		
$H_0 = \tilde{X}_1^{Ra} = \tilde{X}_2^{Ra}$	$H_A = \text{NON}$	0,226	0,112	0,005
$H_0 = \tilde{X}_1^{Rz} = \tilde{X}_2^{Rz}$	$H_A = \text{NON}$	0,450	0,791	0,000

Z tabulky výsledků hodnot pravděpodobnosti lze vidět, že v případě použití oceli a duralu jako tvarových dutin nelze zamítnout shodu drsnosti povrchu R_a a R_z polymerních výrobku z materiálu PC, které byly vstříkovány na těchto dutinách s označením 1 a 2. Při použití měděných tvarových dutin byla tato hypotéza zamítnuta s pravděpodobností 95%. Z výsledku v Tab. 7.29 lze ovšem vidět, že rozdíl v drsnosti povrchu R_a polymerních vzorků mezi použitím leštěné a laponované měděné tvarové dutiny je pouze minimální a liší se v setinách mikrometrů.

7.8.4 Materiál PMMA

Polymerní materiál PMMA byl zvolen jako druhý zástupce amorfních polymerních materiálů. Po kontrole normálního rozdělení byly hodnoty statisticky vyhodnoceny pomocí mediánu a zaneseny do grafu závislosti drsnosti povrchu R_a polymerních výrobků na materiálu tvarové dutiny Obr. 7.41.



Obr. 7.41 Závislost drsnosti povrchu R_a na materiálu tvarové dutiny – PMMA

Z vyobrazeného grafu lze pozorovat, že vliv materiálu tvarové dutiny se u amorfního materiálu PMMA projevoval zejména v oblasti použití tvarových dutin s vyšší hodnotou drsnosti povrchu R_a . Na druhou stranu i v oblasti použití velmi přesně dokončených tvarových dutin dochází k určitým odchylkám u jednotlivých materiálů tvarových dutin. Toho si lze rovněž povšimnout v Tab. 7.35, ve které jsou přehledně vypsána statisticky vyhodnocená data pomocí mediánu.

Tab. 7.35 Hodnoty drsností Ra polymerních vzorku PMMA a tvarových dutin

Ocel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
* Ra dutiny	0,007	0,010	0,041	0,099	0,126	0,199	0,531	1,290	2,902	3,456
* Ra vzorek	0,011	0,010	0,034	0,058	0,075	0,182	0,324	1,156	2,691	3,458
Dural	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
* Ra dutiny	0,010	0,013	0,024	0,067	0,108	0,158	0,618	1,349	2,275	3,771
* Ra vzorek	0,014	0,021	0,027	0,058	0,068	0,118	0,441	1,304	2,190	3,864
Měď'	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
* Ra dutiny	0,008	0,013	0,039	0,085	0,109	0,161	0,559	1,847	2,476	4,304
* Ra vzorek	0,027	0,024	0,044	0,040	0,078	0,093	0,254	1,382	2,420	4,594

*Všechny hodnoty jsou uvedeny v μm

Z vyhodnocených dat lze usuzovat, že při použití materiálu PMMA nedochází k tak razantním změnám drsnosti jako u semikrystalických materiálů PP a PA66. Nicméně i u tohoto materiálu se objevují určité odchylky. Z tohoto důvodu byl proveden test popisující shodu mediánů jednotlivých souborů při použití třech odlišných materiálů vstřikovací formy. Ani v tomto případě nemohl být použit parametrický test ANOVA z důvodu nerovnosti rozptylů.

Použitá metoda: **Kruskal-Wallis**

Nulová a alternativní hypotéza:

$$H_0 = \tilde{X}_{PMMA-ocel}^{Ra(Rz)}(1-10) = \tilde{X}_{PMMA-dural}^{Ra(Rz)}(1-10) = \tilde{X}_{PMMA-měď'}^{Ra(Rz)}(1-10) \quad (21)$$

$$H_A = \text{NON}$$

Hodnota pravděpodobnosti byla stanovena pro všechny porovnávané soubory drsnosti povrchu Ra i Rz při použití jednotlivých tvarových dutin shodně a to $P = 0,000$. Jelikož $P < \alpha \Rightarrow$ zamítám nulovou hypotézu o rovnosti souborů s pravděpodobností omylu $1 - \alpha = 0,05$. Lze tedy říci, že stejně jako pro všechny předchozí zkoumané materiály i materiál PMMA je závislý na materiálu vstřikovací formy. Z tabulek a grafů lze rovněž vidět, že zejména v oblasti velmi přesně dokončených tvarových dutin vychází drsnost povrchu polymerních výrobků nejhůře při použití měděné tvarové dutiny a následně duralové.

Po detailním prozkoumání detailu Obr. 7.41 lze vidět, že drsnost povrchu Ra PMMA vzorků při použití leštěné dutiny (č. 1) a lapované dutiny (č. 2) se určitým způsobem podobají. Z tohoto důvodu byl sestrojen a prozkoumán dendrogram těchto souborů, který určil vysokou míru podobnosti mezi soubory č. 1 a 2, což vedlo k položení nulové a alternativní hypotézy.

Použitá metoda: **Kruskal-Wallis**

Nulová a alternativní hypotéza:

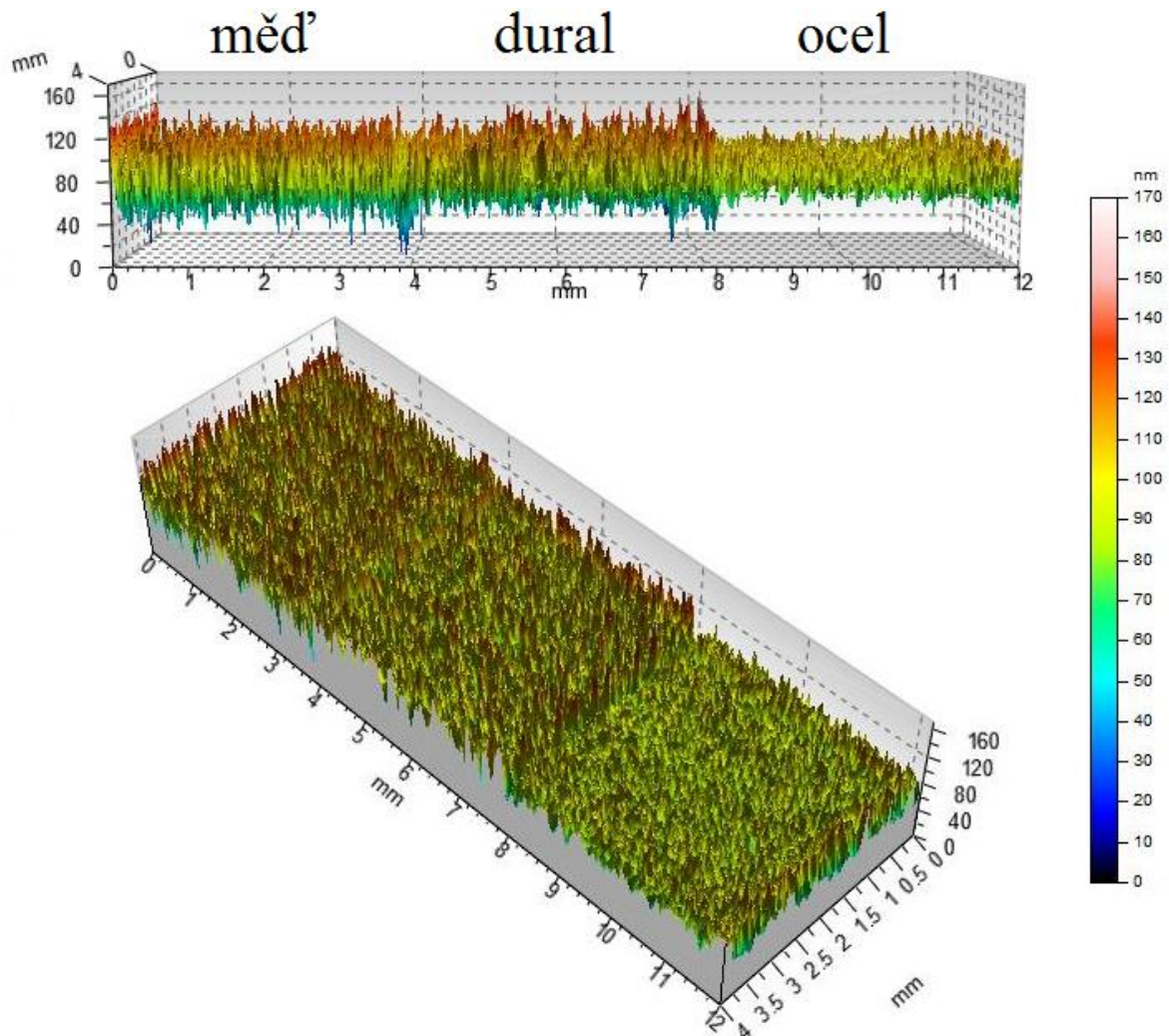
Tab. 7.36 Kruskal-Wallisuv test materiálu PMMA pro dutiny č. 1 a 2

Nulová hypotéza:	Alternativní hypotéza	Ocel	Dural	Měď'
		Hodnota pravděpodobnosti P		
$H_0 = \tilde{X}_1^{Ra} = \tilde{X}_2^{Ra}$	$H_A = \text{NON}$	0,226	0,001	0,307
$H_0 = \tilde{X}_1^{Rz} = \tilde{X}_2^{Rz}$	$H_A = \text{NON}$	0,705	0,000	0,070

Z Tab. 7.36 lze vidět, že drsnost povrchu Ra při použití měděné či ocelové tvarové dutiny č. 1 a č. 2 se statisticky podobají neboť $P > \alpha \Rightarrow$ nezamítám nulovou hypotézu. Při použití duralových tvarových dutin byla shoda mediánů zamítnuta ve prospěch alternativní s možností omylu $\alpha = 0,05$. Nicméně z příložené Tab. 7.35 je vidět, že hodnoty drsností Ra se při použití duralových dutin liší pouze v setinách mikrometrů. Lze tedy říci, že drsnost povrchu polymerních vzorků, po vstřikování do leštěné a lapované tvarové dutiny, je velmi podobná či dokonce shodná a drahá dokončovací operace leštění je v případě materiálu PMMA poměrně nevýhodná.

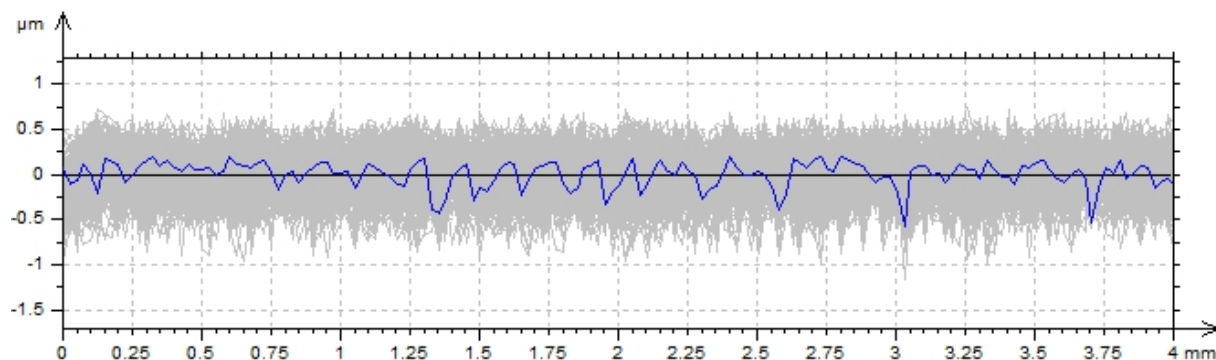
7.8.5 3D hodnocení drsnosti povrchu

Pro hodnocení 3D povrchu byly vybrány vzorky polymerního materiálu PP vyrobené na ocelových, duralových a měděných tvarových dutinách s označením 1 (leštěné). Tyto tvarové dutiny se svou drsností povrchu Ra nejvíce podobají.

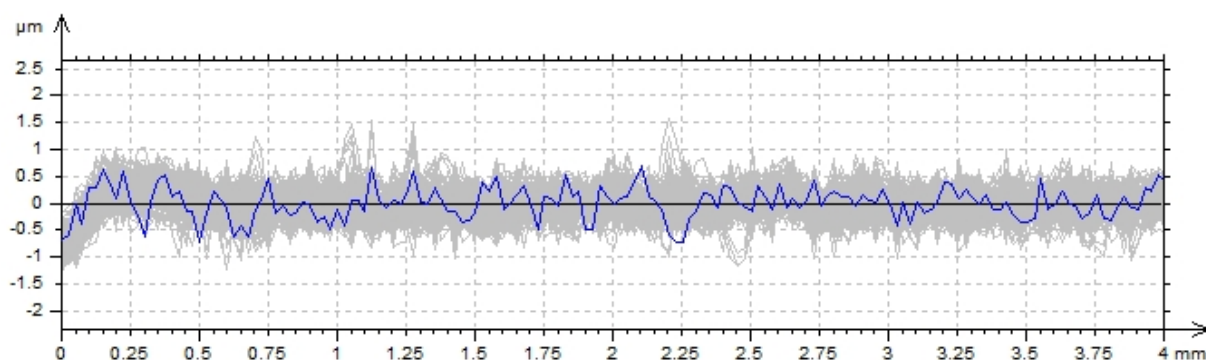


Obr. 7.42 3D profil povrchu materiálu PP Syntegum 1020 pro měď, dural a ocel

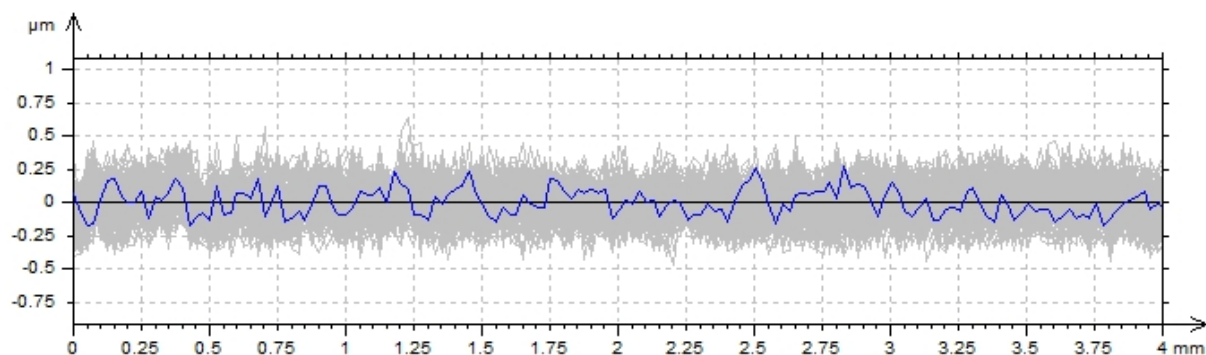
Z 3D profilu povrchu materiálu PP při použití materiálů formy měď, dural a ocel jde vidět, že polymerní vzorky vyrobené na ocelové tvarové dutině dosahují výrazně nižšího profilu povrchu v porovnání s ostatními materiály formy. Je zde také vidět, že při použití měděné a duralové tvarové dutiny je profil velmi podobný a je tak prokázána správnost měření 2D, u které byla tato podobnost také naměřena. Rozdíl ve výšce profilu drsnosti jednotlivých materiálů formy u materiálu PP jsou zobrazeny v Obr. 7.43 a Obr. 7.44 a Obr. 7.45.



Obr. 7.43 2D řez v ose X 3D profilu povrchu PP – měděná tvarová dutina



Obr. 7.44 2D řez v ose X 3D profilu povrchu PP – duralová tvarová dutina



Obr. 7.45 2D řez v ose X 3D profilu povrchu PP – ocelová tvarová dutina

Z řezů ve směru X tedy v řezu rovnoběžném ke směru toku taveniny od vtokového ústí, lze vidět, velké rozdíly mezi mědí, duralem a ocelí. Výška profilu při použití měděných a duralových tvarových dutin se u polymerních vzorků projevila takřka dvakrát vyšším profilem v porovnání s použitím ocelí. Hodnoty naměřené z 2D a 3D měření spolu velmi dobře korelují.

8 PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Oblasti využití polymerních výrobků se stále více rozšiřují. Rostoucí poptávka po výrobě nese rovněž nutnost zvyšovat efektivitu a snižovat náklady na samotnou výrobu. Vhodné určení dokončovacích operací, technologických podmínek, volba polymerního či nástrojového materiálu, případně reologické vlastnosti polymerního materiálu mohou silně ovlivnit nejen cenu výrobku, ale také jeho jakost povrchu. Přínos této disertační práce je shrnut v následujících bodech:

Hlavním přínosem pro vědu:

- Vhodný výběr technologických podmínek při obrábění zvolených nástrojových materiálů zajišťuje zkrácení výrobních časů při dosažení požadované drsnosti povrchu.
- Vhodná volba dokončovacích operací pro předem definované polymerní materiály může snížit cenu výroby tvarových dutin na více než polovinu a stejně tak i výrobní časy tvarových dutin při dosažení požadované drsnosti povrchu.
- Drsnost povrchu R_a a R_z vstříkovaných dílů je ovlivněna nastaveným vstříkovacím tlakem
- Drsnost povrchu R_a a R_z vstříkovaných dílů není příliš silně ovlivněna velikostí vstříkovací rychlosti
- Drsnost povrchu R_a a R_z vstříkovaných dílů je závislá na hodnotě dotlaku při vstříkování
- Drsnost povrchu R_a a R_z vstříkovaných dílů je závislá na viskozitě taveniny polymerního materiálu
- Drsnost povrchu R_a a R_z vstříkovaných dílů je ovlivněna typem nadmolekulární struktury polymerního materiálu
- Drsnost povrchu R_a a R_z je ovlivněna hodnotou krystalické fáze semikrystalických polymerních materiálů
- Drsnost povrchu R_a a R_z vstříkovaných dílů je silně závislá na nástrojovém materiálu vstříkovací formy

Stejně důležitým shledávám přínos práce i pro praxi:

- U většiny polymerních materiálů nedošlo k přesnému kopírování profilu povrchu tvarové dutiny při použitých technologických podmínkách
- U některých polymerních materiálu nejsou dokončovací operace leštění a lapování nezbytné neboť nejsou schopny kopírovat profil povrchu tvarové dutiny
- Krystalinita semikrystalických polymerních materiálů je závislá na nástrojovém materiálu vstříkovací formy

9 ZÁVĚR

Tato dizertační práce se zabývala nutností výzkumu odlišných vlivů, které mohou mít dopad na výslednou jakost povrchu polymerních výrobků a to zejména z pohledu parametrů drsnosti Ra a Rz . V počáteční fázi byly navrženy některé důležité faktory, které mohou mít dopad na jakost povrchu budoucího polymerního výrobku. Je zcela zřejmé, že v této dizertační práci nejsou obsaženy všechny vlivy, které mohou modifikovat strukturu povrchu vstřikovaných výrobků, neboť množství ovlivňujících faktorů je u vstřikování nepřehledné množství. Tato dizertace se tedy zaměřila na vlivy, které jsou při vstřikování běžně měněny či voleny a to na jakost povrchu tvarové dutiny, technologické podmínky vstřikování, vliv typu polymerního materiálu a jeho reologické vlastnosti a v neposlední řadě vliv materiálu tvarové dutiny vstřikovací formy. Důležitou částí této dizertační práce je rovněž určení vlivu dokončovacích technologií a zejména jejich technologických podmínek na jakost povrchu plastikářského nástroje, konkrétně vstřikovací formy. Tato studie byla primární částí a na ní navazovaly další zmíněné.

Jednotlivé dokončovací operace se liší nejen způsobem úběru třísky a dosažitelnou hodnotou kvality povrchu ale také časovou náročností a ekonomickými výdaji. Z naměřených hodnot drsnosti povrchu Ra a Rz dutin vstřikovací formy je zcela jasné, že při použití odlišných dokončovacích operací je dosaženo různých povrchů. Při použití shodné dokončovací operace ovšem velmi závisí na použitých technologických podmínkách. Drsnost povrchu ovlivňuje zejména hloubka úběru, velikost posuvu ale také řezná rychlost spojená s otáčkami nástroje či obrobku. Při zvyšující se hodnotě hloubky úběru a_p při soustružení či broušení roste i drsnost obráběného povrchu a to v některých případech i několikanásobně, jak bylo dokázáno v diplomové práci „Výzkum broušení dílů forem kotoučem z diamantu a kubického nitridu bóru - Jiří Čop – 2012“. Velký vliv má ovšem nejen hloubka úběru, ale rovněž rychlost posuvu v_f a to jak u soustružení, tak i broušení. Zvyšující se posuvová rychlost nástroje zapříčiňuje horší kvalitu povrchu, tedy vyšší hodnotu parametrů drsnosti Ra a Rz . Zvýšením otáček stroje a to například u technologie leštění bylo rovněž dosaženo odlišných drsností povrchů. V tomto případě platí, že s rostoucí hodnotou otáček (soustruhu, broušícího kotouče atd.) klesá parametr drsnosti Ra i Rz ovšem pouze do určité meze. Další parametr ovlivňující kvalitu povrchu je použití či nepoužití procesní kapaliny. Zejména u materiálů dural a měď byla procesní kapalina nutností, neboť docházelo k mazání těchto materiálů při dokončování, vlivem špatného odstranění třísky. Použitím kapaliny se snížilo tření nástroje o obrobek, zvýšil odvod tepla a třísky, což vedlo i k celkovému zlepšení jakosti povrchu.

Po výrobě tvarových dutin odlišnými dokončovacími metodami a podmínkami, byl vyhodnocen první vliv jakosti povrchu tvarové dutiny na jakost povrchu polymerních výrobků. Pro použitý materiál ABS Magnum 3453 bylo zjištěno, že ze statistického hlediska je jakost povrchu polymerních výrobků silně závislá na jakosti povrchu tvarové dutiny a to s pravděpodobností $1 - \alpha = 95\%$.

Druhým a velmi důležitým zjištěním u tohoto experimentu pak byla skutečnost, že nebyla zamítnuta shoda mediánů prvních pěti souborů drsností Ra a Rz . Tyto soubory drsností povrchu Ra a Rz polymerních vzorků byly vyrobeny na leštěných, lapovaných ale také broušených tvarových dutinách. Lze tedy říci, že v případě použití tohoto materiálu a nastavených technologických podmínkách není nezbytné, aby byly tvarové dutiny dokončeny lapováním a leštěním, neboť tento materiál není schopen kopírovat vysokou kvalitu těchto dutin a postačí tak pouze broušená tvarová dutina, jejíž výroba a pořizovací cena je několikanásobně nižší. Je ovšem nutné dodat, že se jedná o aplikaci zmíněných experimentů pouze na menších, tenkostěnných a rovinných vstřikovaných výrobcích.

Vliv technologických podmínek vstřikování na jakost povrchu polymerních výrobků byla rozdělena do třech dílčích experimentů v závislosti na měněné technologické podmínce. Měněny byly velmi důležité parametry vstřikovací tlak, vstřikovací rychlost a dotlak. Po statistickém vyhodnocení pomocí kontroly normálního rozdělení, dendrogramů a zejména testu Kruskal-Wallis s hypotézami porovnávacími shodnost mediánů, bylo dokázáno, že vstřikovací tlak a dotlak mají silný vliv na drsnost povrchu Ra a Rz polymerních výrobků. Nízké hodnoty tlaku a dotlaku způsobují velmi špatnou kvalitu povrchu z pohledu drsnosti Ra , která mnohonásobně převyšuje hodnotu drsnosti povrchu tvarové dutiny a nelze se tak bavit o kopírování profilu povrchu z dutiny na výrobek. Vstřikovací rychlost již tak silný vliv jako tlak a dotlak nemá. V mnoha případech došlo dokonce k nezamítnutí shody drsností povrchu při použití stejné tvarové dutiny a odlišných vstřikovacích rychlostí. Lze tedy tvrdit, že vliv vstřikovací rychlosti je při nastavených podmínkách a použitím materiálů statisticky zanedbatelný. Nicméně i v tomto experimentu bylo zaznamenáno, že drsnost povrchu Ra i Rz polymerních vzorků, při použití kteréhokoliv vstřikovacího tlaku, rychlosti či dotlaku, se velmi podobá při použití tvarové dutiny leštěné a broušené. Kruskal-Wallisuv test ve většině případů nezamítl shodu mediánů těchto souborů a lze tedy konstatovat, že pro použitý materiál ABS Magnum 3453 a pro použité technologické podmínky není ekonomicky výhodné tvarovou dutinu dokončovat pomocí velmi nákladného lapování či leštění, neboť tento materiál není zdaleka schopný kopírovat takto vysoce kvalitní povrchy dutiny vstřikovací formy.

Po hodnocení technologických podmínek vstřikování byl v dizertační práci více hodnocen vliv samotného polymerního materiálu na jakost povrchu budoucích výrobků. Z tohoto důvodu byl navržen vliv indexu toku taveniny (reologických vlastností polymerů) na drsnost povrchu Ra a Rz výrobků. Byly použity materiály s hodnotou ITT = 28, 15 a 5,5g/10min, které byly výrobcem uvedené jako vhodné pro technologii vstřikování. Tyto hodnoty byly nejprve kontrolovány na výtlačném reometru, přičemž naměřené hodnoty korelovaly s hodnotami uvedenými výrobcem. Naměřené hodnoty drsnosti Ra a Rz byly následně kontrolovány na vychýlené hodnoty boxplotovými diagramy a na normální rozdělení testem Anderson-Darling.

Po těchto kontrolách byly provedeny testy Kruskal-Wallis porovnávající shodu mediánů při použití totožné tvarové dutiny a tří polymerních materiálů lišících se indexem toku taveniny. Tyto testy zamítly hypotézu o rovnosti mediánů a potvrdily grafické vyjádření, které znázorňovalo silnou závislost drsnosti povrchu Ra a Rz na ITT polymerního materiálu. Polymerní materiál s nižší ITT vykazoval několikanásobně horší drsnost povrchu vzorků v porovnání s materiálem s vyšší ITT. I v tomto experimentu byla u všech polymerních materiálů prokázána velká podobnost drsnosti Ra a Rz vzorků při použití leštěné a broušené tvarové dutiny. Lze tedy říci, že pro všechny tři materiály je při zvolených podmínkách vstřikování poměrně zbytečné použít nákladné dokončovací operace při výrobě tvarových dutin, neboť tyto materiály nejsou schopny při vstřikování malých tenkostěnných a rovinných výrobků tuto vysokou kvalitu jakosti povrchu kopírovat.

Vliv nadmolekulární struktury byl posuzován dvěma amorfními (PC a PMMA) a dvěma semikrystalickými materiály (PP a PA66). V první fázi byla u semikrystalických polymerních materiálů vyhodnocena velikost krystalické fáze ve struktuře a to pro vzorky vstřikované do celkem tří materiálů tvarových dutin (ocel, dural, měď). Hodnota krystalinity byla naměřena při použití ocelových forem mírně vyšší pro PP ale výrazněji nižší pro PA66. Z těchto měření tak lze odvodit, že materiál vstřikovací formy ovlivňuje hodnotu krystalické fáze semikrystalických materiálů. Hodnoty drsností Ra a Rz pro všechny materiály tvarových dutin byly následně statisticky vyhodnoceny. U všech materiálů tvarových dutin (ocel, dural, měď) byly sledovány velmi podobné zákonitosti. Vzorky ze semikrystalických polymerních materiálů dosahovaly mnohem horších jakostí povrchu v porovnání s amorfními. Tato skutečnost byla ověřena i statisticky pomocí Kruskal-Wallisova testu. Materiál PP, který obsahoval téměř dvakrát vyšší procento krystalické fáze v porovnání s PA66, pak dosahoval nejhorší kvality a lze tedy říci, že nadmolekulární struktura ale také procento krystalické fáze silně ovlivňují jakost povrchu polymerních vzorků.

Poslední experiment této dizertační práce byl zaměřen na vliv kvality povrchu polymerních výrobků na materiálu tvarové dutiny. V tomto případě byly srovnávány materiály ocel, dural a měď, u kterých byla snaha dosáhnout dokončovacími operacemi podobných drsností povrchu Ra a Rz shodně označených tvarových dutin. Z výsledků drsnosti povrchu Ra a Rz použitých polymerních materiálů lze jasně vidět, že duralové a měděné tvarové dutiny a především ty s vysokou kvalitou povrchu (č. 1 - 5), dosahují horších jakostí povrchů (vyšších Ra a Rz) v porovnání s použitím ocelových tvarových dutin. Tato skutečnost byla potvrzena Kruskal-Wallisovými testy a je přisuzována vyšší tepelné vodivosti mědi a duralu, která zapříčinila rychlejší ochlazení polymerní taveniny a tím nedostatečné době pro zatečení taveniny do profilu povrchu tvarové dutiny a nepřesnému kopírování tohoto povrchu. Větších rozdílů při použití odlišných materiálů formy dosahovaly především semikrystalické polymerní materiály.

Drsnost povrchu Ra a Rz se při porovnání semikrystalických a amorfních polymerů v některých případech lišila i více než trojnásobně. Tento jev je také přisuzován rychlejšímu odvodu tepla z formy a nedokonalému srovnání krystalických řetězců v profilu povrchu polymerních výrobků. Amorfní materiály dosahovaly v tomto experimentu velmi dobrých výsledků a v podstatě téměř kopírovaly profil povrchu velmi přesně dokončených tvarových dutin. Ze statistického hlediska tak byl potvrzen vliv materiálu tvarové dutiny na jakost povrchu polymerního výrobku. I v tomto experimentu bylo nicméně dokázáno, že ani semikrystalické ani amorfní materiály nejsou schopny zcela kopírovat tvarovou dutinu leštěnou. Kruskal-Walissuv test u těchto materiálu potvrdil nezamítnutím nulové hypotézy, že drsnost povrchu Ra a Rz byla podobná při použití leštěné a lapované dutiny a lze tedy říci, že technologie leštění není při použití kteréhokoliv použitého polymerního materiálu příliš efektivní a ekonomická, neboť materiály nejsou schopny okopírovat vysokou kvalitu leštěné tvarové dutiny, jejíž výroba a zejména pořizovací náklady jsou v porovnání s ostatními dutinami mnohem vyšší.

Pro další výzkum v této oblasti by bylo vhodné zkonstruovat vstřikovací formu s temperací, která určitou mírou ovlivňuje chladnutí taveniny a tím i jakost povrchu budoucích polymerních výrobků. Rovněž by bylo vhodné tuto dizertaci rozšířit o větší počet zkoumaných polymerních materiálů či přidat některé další hodnotící kritéria jakosti povrchu jako je třeba lesklost, odrazivost, pohltivost, zbytkové napětí, materiálový podíl profilu či jiné. V oblasti nastavení vstřikovacích podmínek je v této oblasti také další řada faktorů, které mohou ovlivnit nejen jakost povrchu ale také mechanické vlastnosti polymerních výrobků.

LITERATURA

- [1] ADAMCZAK, S., JANECKI, D. Moderní metody měření tvaru a zvlnění povrchu strojních součástí. In I. International Congress of precision machining. Ústí nad Labem, Czech Republic : ÚTRV, J. E. Purkyne University. 2001. s. 9-21. ISBN 80-7044-358-8.
- [2] ALLROUNDER 470 H. *Arburg*. [online]. © 2016 [cit. 2016-01-14]. Dostupné z: http://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische_Daten/ARBURG_ALLROUNDER_470H_TD_680311_en_GB.pdf
- [3] BAJCIK, Š., MAJERIK, J. Meranie zvyškových napätí po brúsení vysoko-pevnostných ocelí pri vyšších rezných rýchlostiach. In Transfer 2008 : Využívanie nových poznatkov v strojárskkej praxi [CD-ROM]. 2008. vyd. Trenčín : Digital Graphic, 2008. ISBN 978-80-8075-356-6.
- [4] BAJCIK, Š., MAJERIK, J. Mikrogeometria obrobených povrchov a meranie jej charakteristik. In Transfer 2008 : Využívanie nových poznatkov v strojárskkej praxi [CD-ROM]. 2008. vyd. Trenčín : Digital Graphic, 2008. ISBN 978-80-8075-356-6.
- [5] BATORA, B. The functionality of machined surfaces and their influence. In Nove smery vo výrobných technológiach 2004 – VIIth International Scientific Conference. Prešov, Slovak Republic. FVT : TU in Prešov. 2004. s. 289-291. ISBN 80-8073-136-5.
- [6] BEAUMONT, J. P., NAGEL, R., SHERMAN, R. Successful injection molding process, design and simulation. Cincinnati: Hanser Gardner Publications. c2002. XIII. ISBN 3-446-19433-9. ISBN 15-699-0291-7
- [7] BELINA, K., BOZA, P., POSA, M. Investigation of the effect of surface finishing on injection moulding parts. 11th International conference on tools. Miskolc - Hungary. 2004. p.311-316
- [8] BĚHÁLEK, L., Hodnocení nadmolekulární struktury plastů. [online]. © 2015 [cit. 2015-12-12]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech/Morfologie.pdf>
- [9] BĚHÁLEK, L.: Polymery. [online]. © 2015 [cit. 2015-1-12]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>

- [10] Bezkontaktní měřicí metody v experimentální mechanice. *fsv.cvut.cz*. [online]. © 2009 [cit. 2016-02-12]. Dostupné z: <http://departments.fsv.cvut.cz/k102/doktorske-studium/bezkontaktni-merici-metody-v-experimentalni-mechanice?prezentace>
- [11] BOBČÍK, L. a kol. Formy pro zpracování plastů I.díl – Vstřikování termoplastů. 2. vyd. Brno: UNIPLAST, 1999.
- [12] BOBČÍK, L. a kol. Formy pro zpracování plastů II.díl – Vstřikování termoplastů. 2. vyd. Brno: UNIPLAST, 1999.
- [13] BUMBÁLEK, B., Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci. Citováno: 03/03/2015. Dostupný online: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf
- [14] BUMBÁLEK, L., PERNIKÁŘ, J., PATA, V. *Kontrola a měření*. Informatorium Praha, 2009. ISBN 978-80-7333
- [15] CORBBET, J., STEPHENSON, D. The control of surface integrity by precision machining and machine design. In I. International Congress of precision machining. Usti nad Labem, Czech Republic : UTRV, J. E. Purkyne University. 2001. s. 31-43. ISBN 80-7044-358-8.
- [16] ČECH, J., PERNIKÁŘ, J., PODANÝ, K. *Strojírenská metrologie*. 4. vyd. Brno: CERM, 2005. 175 s. ISBN 80-214-3070-2
- [17] ČSN ISO 2041/2010. *Vibrace, rázy a monitorování stavu – Slovník*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [18] ČSN EN ISO 4288:1999. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS), Struktura povrchu: Profilová metoda*. Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu.
- [19] ČSN EN ISO 4287:1999. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS), Struktura povrchu: Profilová metoda*. Termíny, definice a parametry struktury povrchu
- [20] ČSN ISO 16269-6:2007. *Statistická interpretace dat. Část 6: Stanovení statistických tolerančních intervalů*.

- [21] Evonik industries – product info. *Ledil*. [online]. © 2016 [cit. 2016-01-14]. Dostupné z: <http://www.ledil.com/sites/default/files/Documents/Technical/Material/PMMA%208N%20PLEXIGLAS-Datasheet.pdf>
- [22] GADELMAWLA, E. S., KOURA, M. M., MAKSOUD, T.M.A., ELEWA, I. M., SOLIMAN, H. H. Roughness parameters, *Journals of Materials Processing Technology*. Vol. 123, 2002. p. 133-145. Dostupný online: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602000602>
- [23] GRZESIK., W. *Advanced Machining Process of Metallic Materials*. 1st ed. 2008. ISBN 978-0080-5574-96
- [24] GROOVER, M. P. *Fundamentals of Modern Manufacturing - Materials, Processes and Systems*. 5th ed. 2012. ISBN 978-1-118-231463. USA
- [25] HOLEŠOVSKY, F. Výzkum a nové poznatky broušení. In *Nove poznatky v technologii a technologicke informace '05 : 1st International Conference of Technology Knowledge and Information [CD-ROM]*. 2005. vyd. KST,UTRV : UJEP, 2006. ISBN 80-7044-743-5
- [26] HOLEŠOVSKÝ, F. *Broušení a jeho vliv na vlastnosti povrchu*. VŠB-TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1644-9
- [27] KOČMAN, K. *Speciální technologie obrábění*. Brno : FSI VUT, 2004. ISBN 80-214-2562-8.
- [28] KOČMAN, K. *Technologické procesy obrábění*. Brno : Cerm, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2
- [29] KRYACHEK, V. M. Injection moulding (review), *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 43. 2004, p. 336 – 348. 1068-1302/04/0707-0336
- [30] LENFELD, P.: *Technologie vstřikování*. [online]. © 2015 [cit. 2016-01-12]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Impresum.html>
- [31] MADL, J., HOLEŠOVSKY, F. *Integrita obrobených povrchu z hlediska funkčních vlastností*. Miroslav Slama. 1. vyd. Usti nad Labem : UJEP, FVTM Usti n. Labem, 2008. 230 s. ISBN 978-80-7414-095-2.
- [32] MALÁČ, J.: *Gumárenská technologie – 2. Kaučuky*. [online]. © 2015 [cit. 2015-1-12]. Dostupné z: www.utb.cz/file/36214_1_1/

- [33] Materiálové listy mědi. *PX Precimet*. [online]. © 2016 [cit. 2016-01-23]. Dostupné z: <http://www.pxprecimet.ch/data/documents/fiches-techniques/EN/Cu-ETP.pdf>
- [34] Materiálové listy duralu. *Proal*. [online]. © 2016 [cit. 2016-01-23]. Dostupné z: <http://www.proal.cz/info/424222.htm>
- [35] Materiálový list PC Calibre 303EP-22. STYRON
- [36] Materiálový list PA 66 Technyl A205F. Rhodia
- [37] Materiálový list PP Syntegum 1020 AFV 00/HMFL. *LAMPLAST*.
- [38] Materiálový list ABS Magnum 3616. STYRON
- [39] Materiálový list ABS Magnum 3453. STYRON
- [40] Materiálový list ABS Magnum 8391. STYRON
- [41] Nástrojové materiály. *Bohdan Bolzano*. [online]. © 2015 [cit. 2016-01-23]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-prirucka/nastrojove-oceli/nastrojove-oceli-pro-praci-za-tepla/materialove-listy/materialovy-list-oceli-x37crmov5-1>
- [42] NESLUŠAN, M., aj. *Experimentální metody v trieskovom obrábání*. ZU ŽILINA, 2007. ISBN 978-80-7318-488-9
- [43] NOVÁK, M., HOLEŠOVSKÝ, F. Studium integrity broušeného povrchu, *Manufacturing and Industrial Engineering*. Prešov. 2008. p. 11-13. ISBN 1335-7972
- [44] PERNIKÁŘ, J., MUSIL, M. *Hodnocení jakosti povrchu kroužků valivých ložisek*. Strojírenská technologie, roč. XVI, č.5. UJEP Ústí nad Labem, 2011. s. 29-32. ISSN 1211-4162.
- [45] PERNIKÁŘ, J., TYKAL, M. *Strojírenská metrologie II*. 1. vyd. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-2

- [46] Plasty a kompozity, jejich vlastnosti a rozdělení, zkoušení a hodnocení plastů, aplikace plastů. *ksp.tul.cz*. [online]. © 2012 [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tzn/c3/MFI.pdf
- [47] Polymery. *vscht.cz*. [online]. © 2014 [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf>
- [48] Reologie. *ksp.tul.cz*. [online]. © 2014 [cit. 2016-01-08]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech/Reologie.pdf>
- [49] Reologické vlastnosti polymerů. *www.ft.utb.cz*. [online]. © 2014 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP2_lab_02.pdf
- [50] Roughness (2D) parameter . *olympus-ims*. [online]. © 2015 [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: http://www.olympus-ims.com/en/knowledge/metrology/roughness/2d_parameter/
- [51] STANEK, M., MANAS, D., MANAS, M., SUBA. O., Optimization of Injection Molding Process, International Journal of Mathematics and Computers Simulation. Vol.5. Issue5. 2011. p.413-421
- [52] ZHENG, R., TANNER, R. I., FAN, XI-JUN. Injection Molding – Integration of Theory and Modeling Methods. 2011. ISBN 978-3-642-21262-8
- [53] Značení neželezných kovů[online].[cit.2013-12-12]. Dostupný z WWW: http://www.ferona.cz/cze/katalog/nezelezne_kovy.php

SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

Publikace evidované v databázi Web of Science

1. ČOP, J., LUKOVICS, I.: Research of Grinding Material tools by Modern Grinding Wheels. *Key Engineering Materials*. 2014. vol. 581. p. 211 – 216. ISSN 1013-9826
2. LUKOVICS, I., ČOP, J.: Finishing Methods of Tools Functional Surfaces. *Key Engineering Materials*. 2014. vol. 581. p. 18 – 21. ISSN 1013-9826

Publikace evidované v databázi SCOPUS

1. LUKOVICS, I., ČOP, J., FOJTL, L., LUKOVICS, P., PATA, V.: Prediction of Surface Product Quality and Operation Reliability of Grinding Machines. *Manufacturing Technology*. 2014. vol 14. no. 2. p. 213-217. ISSN 1213-2489
2. BÍLEK, O., JAVOŘÍK, J., ČOP, J.: Comparative Machinability and Surface Integrity in Grinding of Titanium. *International Journal of Mechanics*. 2015. vol. 9. p. 43 – 52. ISSN: 19984448
3. ČOP, J., PATA, V., BÍLEK, O.: Influence of Technological Parameters on Surface Quality of Injection molded parts. *Key Engineering Materials*. 2016. vol. 686. p. 131 – 136. ISBN: 978-303835625-7
4. BÍLEK, O., BAĐUROVA J., ČOP, J.: A Study on the Grindigability of Engineering Plastics and Metals. *Key Engineering Materials*. 2016. vol. 686. p. 137 – 142. ISBN: 978-303835625-7
5. BÍLEK, O., ŽALUDEK, M., ČOP, J.: Cutting tool Performance in End Milling of Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Manufacturing Technology*. 2016. vol 16. no. 1. p. 12 - 16. ISSN 1213-2489
6. ČOP, J., FOJTL, L., BÍLEK, O., PATA, V. Influence of Finishing Operations and Melt Flow Index on Surface Quality of Injection Molded Parts. *Manufacturing Technology*. 2016. In print. ISSN 1213-2489

Ostatní publikace

1. BÍLEK, O., PÁČ, J., LUKOVICS, I., ČOP, J.: Cnc Machining: an Overview of Available Processors. *Development in machining technology*. Krakow. 2014. vol. 4. p. 118-125. ISBN 978-83-7242-765-6
2. LUKOVICS, I., ČOP, J., BÍLEK, O.: Finishing Machining of Tools Functional Surface. *Development in machining technology*. Krakow. 2014. vol. 4. p. 118-125. ISBN 978-83-7242-765-6

3. LUKOVICS, I., ČOP, J., LUKOVICS, P.: Provozní spolehlivost brousicích strojů. *Strojírenská technologie*. 2014. vol. XIX, no. 2. str. 96-100. ISSN 1211-4162
4. LUKOVICS, I., BÍLEK, O., ČOP, J.: Tools for High Speed Grinding. *SCIENTIFIC BULLETION, Serie C, Fascicle: Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology* 2013. vol. XXVII. p. 49 – 51. ISSN 1224-3264
5. LUKOVICS, I., ČOP, J. Hodnocení Kmitání Technologických Zařízení. *Strojírenská technologie* XVIII, no. 4 (2013). str. 254–258. ISSN 1211–4162.
6. ČOP, J., BÍLEK, O.: Effect of Finishing Operations on Surface Quality and Durability of Products. *Development in machining technology*. Krakow. 2015. vol. 5. p. 77 - 83. ISBN 978-83-7242-765-6
7. BÍLEK, O., ČOP, J.: Additive Manufacturing of Industrial Parts: A Method overview and Recent Applications. *Development in machining technology*. Krakow. 2015. vol. 5. p. 158 - 165. ISBN 978-83-7242-765-6
8. BÍLEK, O., PATA, V., ČOP, J., KUBIŠOVÁ, M. Mathematical methods of surface roughness evaluation of areas with a distinctive inclination. 5th International Conference on Surface Metrology. Poznan. In print. 2016

Mezinárodní konference

1. 7th International Congress on Precision Machining ICPM 2013, 3-5th October 2013, Miskolc, Maďarsko
2. Workshop and retraining for the Visegrad Countries, 1 – 2nd October 2013, Miskolc, Maďarsko
3. Nové poznatky v technologii a technologické informace ICTKI 2014, 29-30th January 2014, Litoměřice, Česká republika
4. 4th International Scientific Conference “Development in Machining” DIM 2014, 22 – 24th April, Cracow, Polsko
5. 5th International Scientific Conference “Development in Machining” DIM 2015, 22 – 24th April, Cracow, Polsko
6. Nové poznatky v technologii a technologické informace ICTKI 2014, 2-4th February 2016, Litoměřice, Česká republika

CV AUTORA

Jméno a příjmení, titul	Jiří Čop, Ing.
Datum a místo narození	3.2.1988, Znojmo
Adresa	Tasovice 429, Hodonice 671 25 Česká republika
Telefon	+420 602 390 567
E-mail	cop@ft.utb.cz
Státní příslušnost	česká

Vzdělání:

7/2012 – dosud	UTB ve Zlíně, Fakulta technologická <i>doktorský studijní program:</i> Procesní inženýrství <i>studijní obor:</i> Nástroje a Procesy
7/2010 – 6/2012	Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně <i>magisterský studijní program:</i> Procesní inženýrství <i>studijní obor:</i> Konstrukce technologických zařízení
7/2007 – 6/2010	UTB ve Zlíně, Fakulta technologická <i>bakalářský studijní program:</i> Procesní inženýrství <i>studijní obor:</i> Technologická zařízení
9/2003 – 6/2007	Střední průmyslová škola Jihlava <i>obor:</i> Strojírenství

Doplňující informace o vzdělání:

Bakalářská práce oceněna děkanem FT - UTB

Bakalářské i magisterské studium ukončeno s vyznamenáním

1. Místo v soutěži SVOČ - UTB 2015

Projektová činnost:

Spolukoordinátor stáží v rámci mobility CEEPUS III pro sítě: HR-0108, PL-0033, SK-0067, RO-0202

IGA 2013 – Polymerní kompozitní materiály a jejich zpracování, část C. – *Vliv jakosti povrchu plastikářského nástroje na jakost povrchu polymerního výrobku*

IGA 2014 – Výzkum polymerních kompozitních materiálů a jejich zpracovatelských nástrojů, část C. – *Výzkum vlivu materiálu vstřikovací formy na vlastnosti a jakost povrchu polymerních kompozitních materiálů*

VOUCHER 2014 – *Vývoj homogenního nosiče pro výrobu výsekových nástrojů a ochranných prvků z polymerního materiálu – konstrukce a výroba tlumících bloků*

IGA 2015 – Nové trendy v oblasti polymerních kompozitních materiálů a nástrojů pro jejich zpracování, část C. – *Výzkum vlivu reologických vlastností vybraného druhu polymeru na jakost polymerního výrobku*

IGA 2016 - Výzkum polymerních kompozitních materiálů a nástrojů pro jejich zpracování, část C. - *Výzkum vlivu nadmolekulární struktury vybraných druhů polymerů na jakost povrchu polymerního výrobku*

Studijní stáže:

- **Chorvatsko**, University of **Rijeka**, Faculty of Engineering, stáž v rámci CEEPUS III, **září 2013**
- **Slovensko**, University of Žilina in **Žilina**, Department of Machining and Automation, stáž v rámci CEEPUS III, **leden 2014, leden 2015**
- **Polsko**, **Cracow** University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, stáž v rámci CEEPUS III, **duben 2014, duben 2015**
- **Slovensko**, Technical University in **Zvolen**, Department of Manufacturing technology and Quality Management, stáž v rámci CEEPUS III, **květen 2014**
- **Rumunsko**, Technical University of **Cluj-Napoca**, Department of Engineering and Technologic Management, stáž v rámci CEEPUS III, **červen 2014, červen 2015**
- **Polsko**, **Poznan** University of Technology, Institute of Mechanical Technology, stáž v rámci CEEPUS III, **Leden 2016**
- **Slovensko**, Slovak University of Technology in **Bratislava**, Faculty of Materials Science and Technology STU, stáž v rámci CEEPUS III, **červen 2016**

Vedení cvičení v předmětech:

T1PR – Základy výrobních procesů
T1CD – Úvod do CAD
TQCD – Úvod do CAD
T9VKN – Výroba a kontrola náradí
T4ST2 – Strojírenská technologie 2
T8NPU – Navrhování prvků a uzlů
T2CD – Úvod do CAD
TQPK1 – Počítačová podpora konstrukce

Znalosti:**Jazykové**

Čeština – mateřský jazyk
Angličtina – středně pokročilý (B2)

Počítačové

Internet (email, www) – uživatelsky
Microsoft Office – uživatelsky
Microsoft Windows – uživatelsky
AutoCAD – pokročile
CATIA – uživatelsky
Siemens NX 10 – uživatelsky
Autodesk Moldflow Insight – uživatelsky
CadMould 3D-F – uživatelsky

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA PI: Závislost R_z na nadmolekulární struktuře - ocel

PŘÍLOHA PII: Závislost R_z na nadmolekulární struktuře - dural

PŘÍLOHA PIII: Závislost R_z na nadmolekulární struktuře – měď

PŘÍLOHA PIV: 2D řez v ose X 3D profilu povrchu pro materiál ABS Magnum 3616 – ocelová tvarová dutina č. 1

PŘÍLOHA PV: 2D řez v ose X 3D profilu povrchu pro materiál ABS Magnum 8391 – ocelová tvarová dutina č. 1

PŘÍLOHA PVI: 2D řez v ose X 3D profilu povrchu pro materiál PC Calibre 303EP – ocelová tvarová dutina č. 1

PŘÍLOHA PVII: 2D řez v ose X 3D profilu povrchu pro materiál PP Syntegum 1020 – ocelová tvarová dutina č. 1

PŘÍLOHA PVIII: 2D řez v ose X 3D profilu povrchu pro materiál PP Syntegum 1020 – duralová tvarová dutina č. 1

PŘÍLOHA PIX: 2D řez v ose X 3D profilu povrchu pro materiál PMMA Plexiglas 8N – duralová tvarová dutina č. 1

PŘÍLOHA PX: 2D řez v ose X 3D profilu povrchu pro materiál PA 66 Technyl A205F – měděná tvarová dutina č. 1

PŘÍLOHA PXI: 2D řez v ose X 3D profilu povrchu pro materiál PC Calibre 303EP-22 – měděná tvarová dutina č. 1

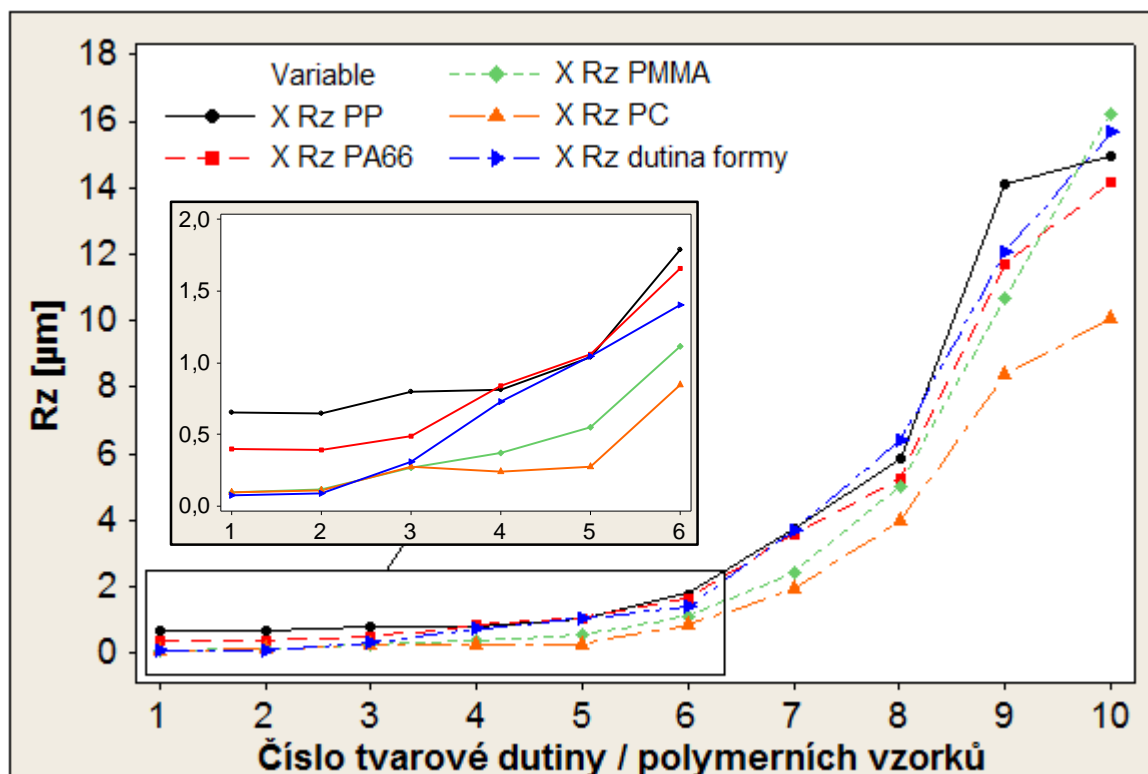
PŘÍLOHA PXII: Hodnoty drsností R_a a R_z v μm pro odlišné vstřikovací tlaky - materiál ABS 3453

PŘÍLOHA PXIII : Hodnoty drsností R_a a R_z v μm pro odlišné vstřikovací rychlosti – materiál ABS 3453

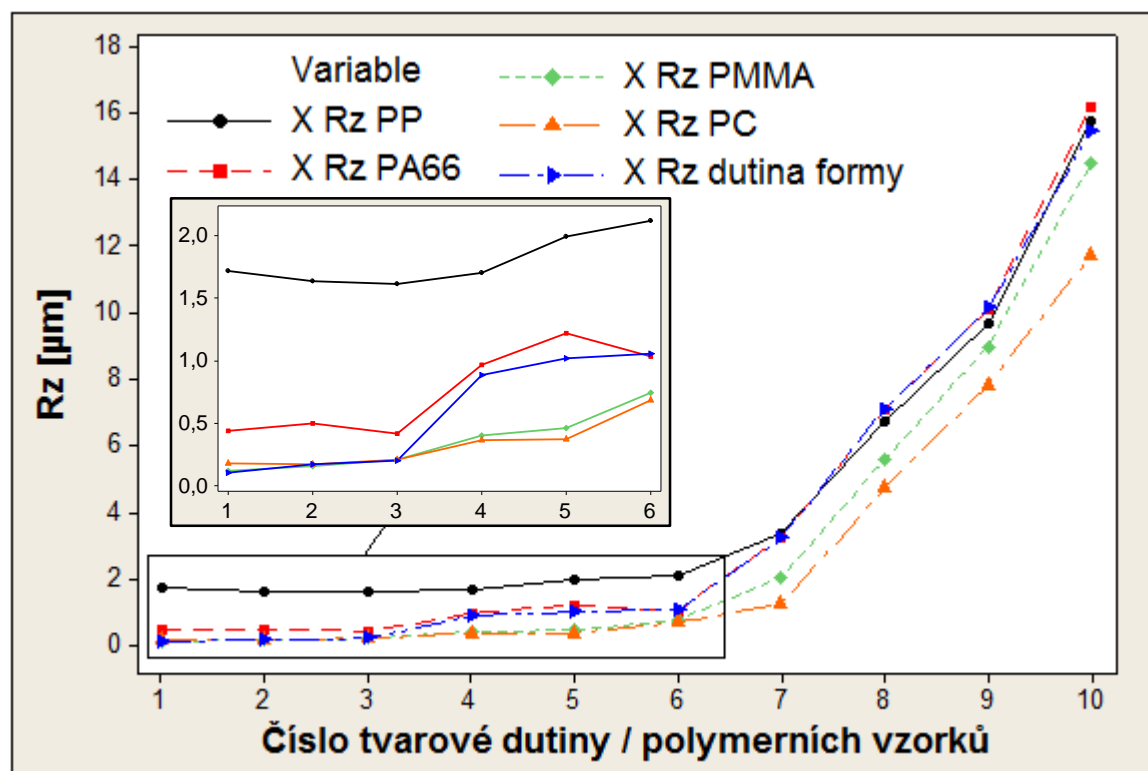
PŘÍLOHA PXIV : Hodnoty drsností R_a a R_z v μm pro odlišné dotlaky – materiál ABS 3453

PŘÍLOHA PXV : Hodnoty drsností R_a a R_z v μm pro odlišné ITT – materiál ABS Magnum

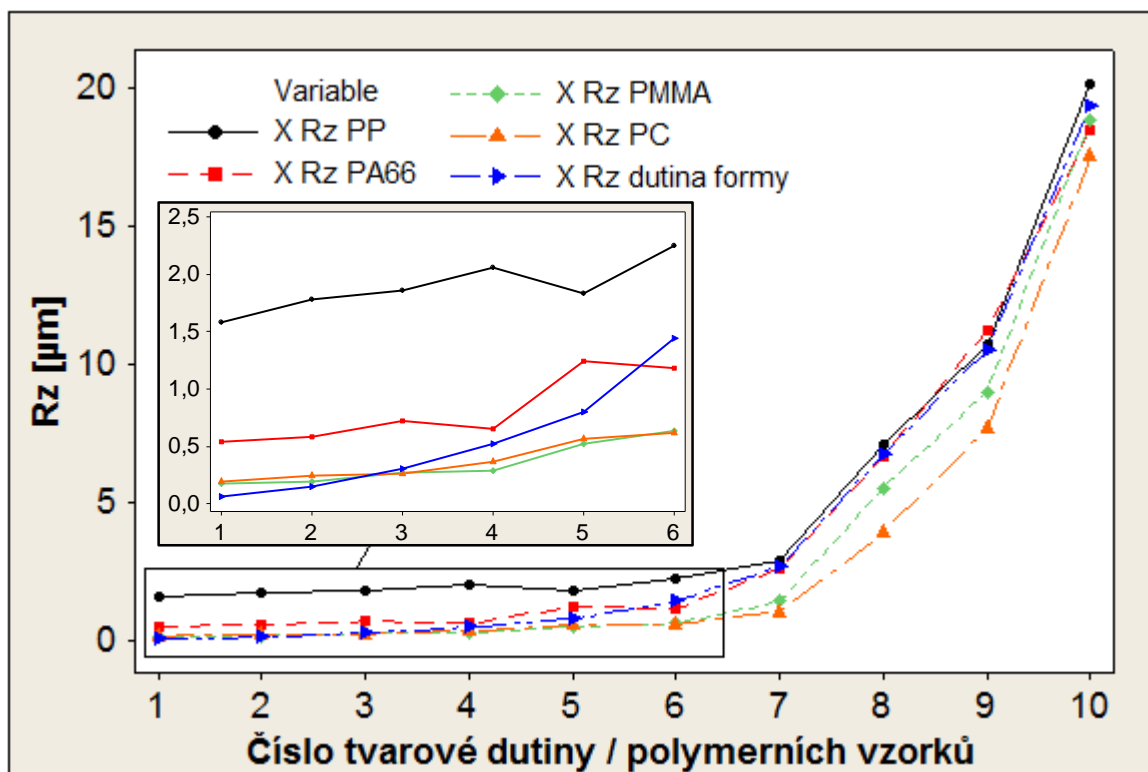
PŘÍLOHA PII: Závislost R_z na nadmolekulární struktuře - ocel



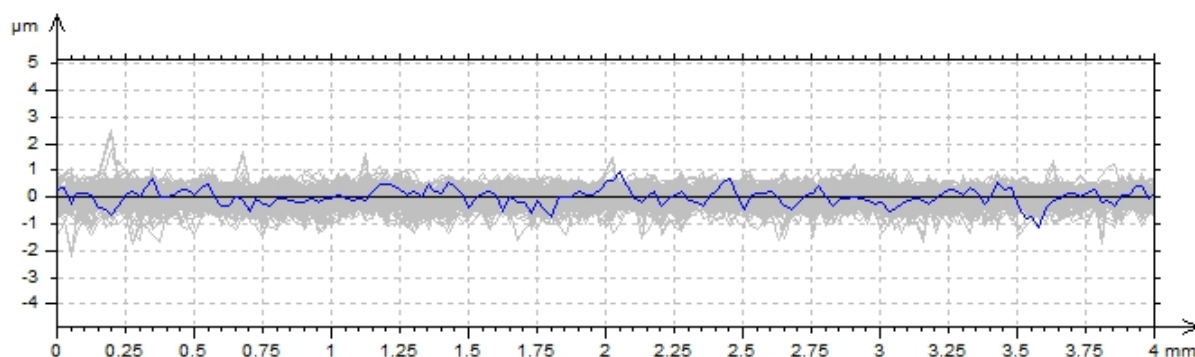
PŘÍLOHA PII: Závislost R_z na nadmolekulární struktuře - dural



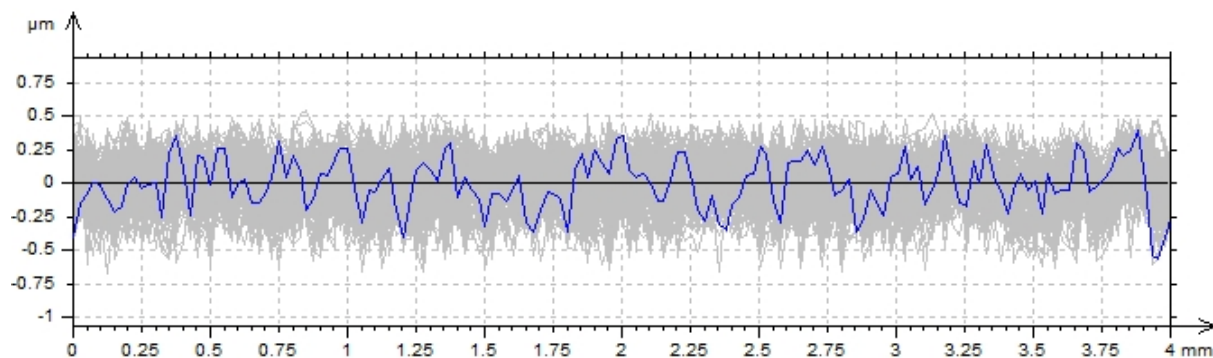
PŘÍLOHA PIII: Závislost Rz na nadmolekulární struktuře – měď



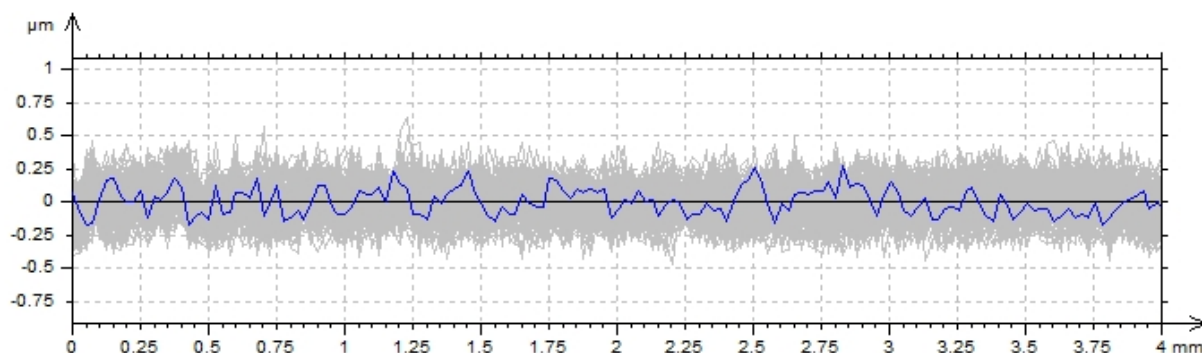
PŘÍLOHA PIV: 2D řez v ose X 3D profilu povrchu pro materiál ABS Magnum 3616 – ocelová tvarová dutina č. 1



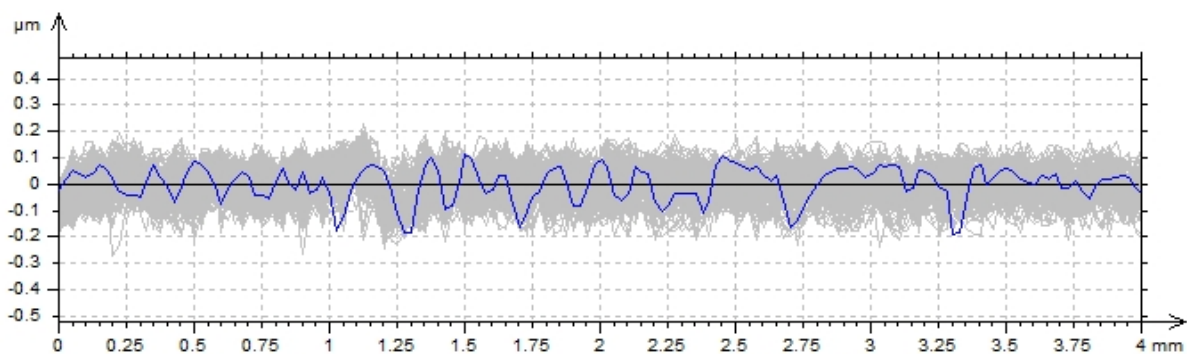
PŘÍLOHA PV: 2D řez v ose X 3D profilu povrchu pro materiál ABS Magnum 8391 – ocelová tvarová dutina č.1



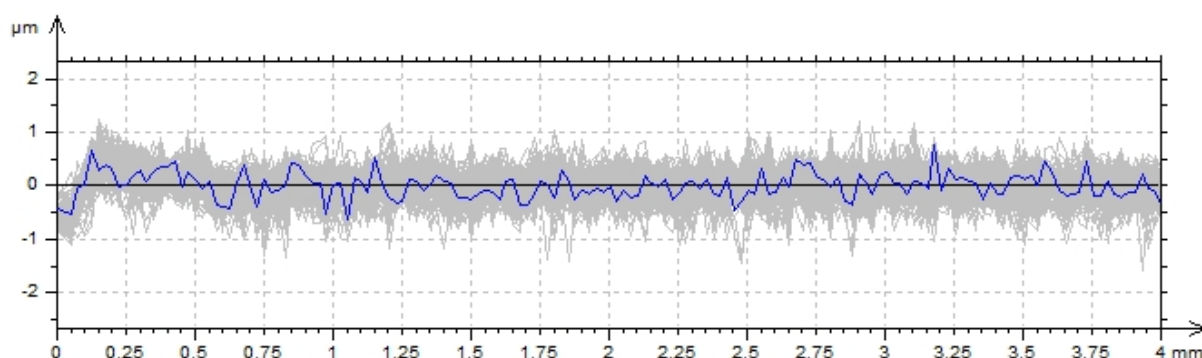
**PŘÍLOHA PVI: 2D řez v ose X 3D profilu povrchu pro materiál
PC Calibre 303EP – ocelová tvarová dutina č. 1**



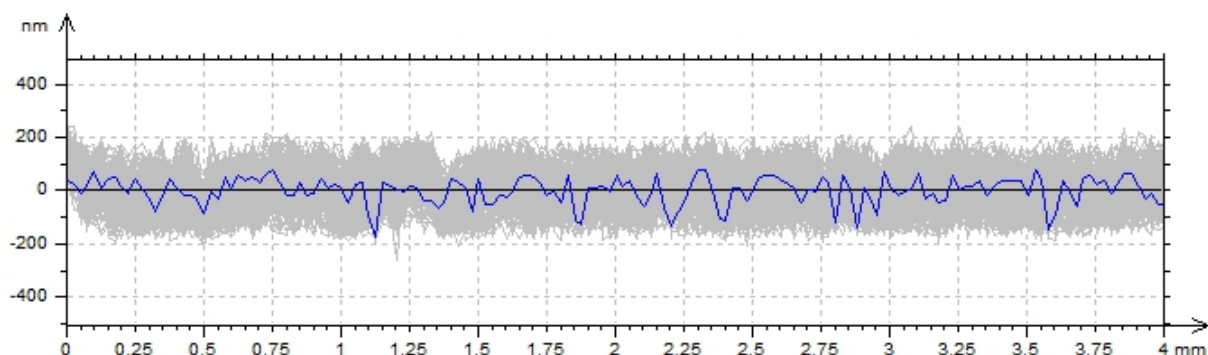
**PŘÍLOHA PVII: 2D řez v ose X 3D profilu povrchu pro materiál
PP Syntegum 1020 – ocelová tvarová dutina č. 1**



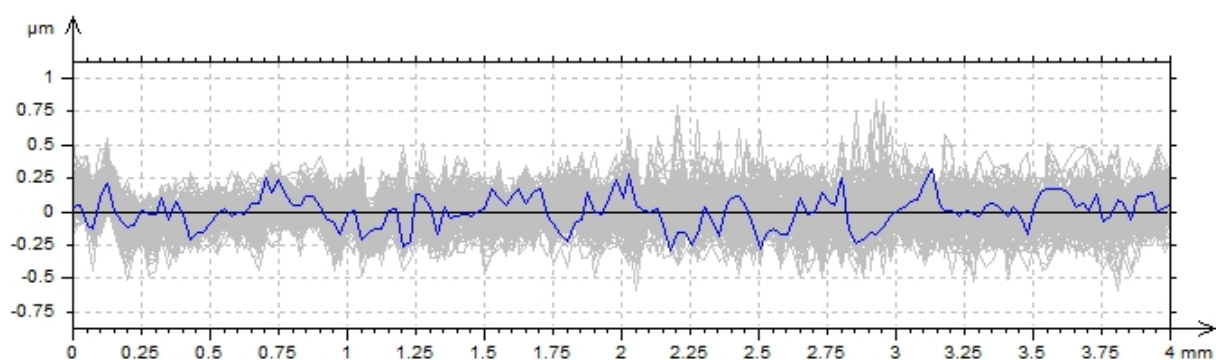
**PŘÍLOHA PVIII: 2D řez v ose X 3D profilu povrchu pro materiál
PP Syntegum 1020 – duralová tvarová dutina č. 1**



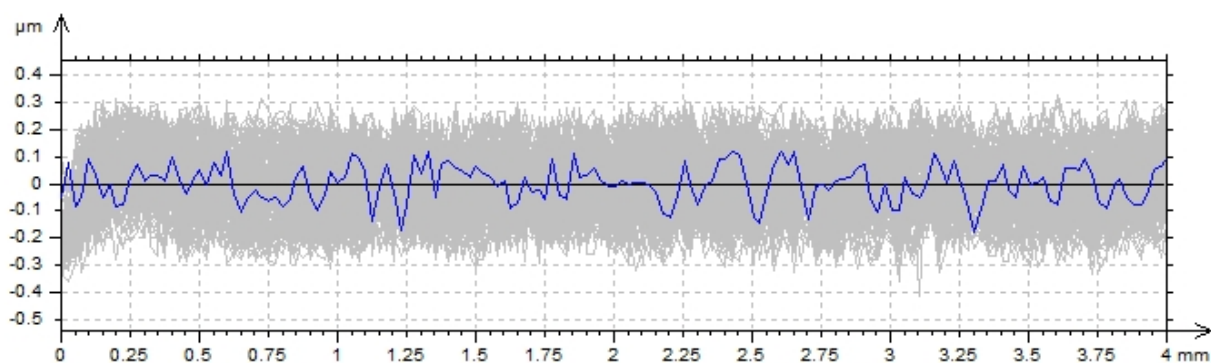
PŘÍLOHA PIX: 2D řez v ose X 3D profilu povrchu pro materiál PMMA Plexiglas 8N – duralová tvarová dutina č. 1



PŘÍLOHA PX: 2D řez v ose X 3D profilu povrchu pro materiál PA 66 Technyl A205F – měděná tvarová dutina č. 1



PŘÍLOHA PXI: 2D řez v ose X 3D profilu povrchu pro materiál PC Calibre 303EP-22 – měděná tvarová dutina č. 1



PŘÍLOHA PXII: Hodnoty drsností R_a a R_z v μm pro odlišné vstřikovací tlaky - materiál ABS 3453

č. vzorku	R_a 60MPa	R_z 60MPa	R_a 45MPa	R_z 45MPa	R_a 30MPa	R_z 30MPa	R_a dutina	R_z dutina
1	0,156	1,093	0,248	1,640	0,407	2,432	0,007	0,079
2	0,156	0,934	0,284	1,746	0,392	2,412	0,010	0,086
3	0,136	1,026	0,248	1,658	0,374	2,273	0,041	0,309
4	0,158	1,445	0,310	2,114	0,524	2,982	0,099	0,725
5	0,143	1,263	0,261	1,767	0,541	3,152	0,126	1,047
6	0,218	1,652	0,342	2,200	0,522	2,970	0,199	1,401
7	0,415	2,866	0,465	3,167	0,673	4,106	0,531	3,715
8	1,274	6,354	1,226	6,309	0,948	5,232	1,290	6,389
9	2,896	11,748	2,887	11,445	1,610	6,989	2,902	12,074
10	3,407	14,220	3,450	14,274	3,062	12,540	3,456	15,650

PŘÍLOHA PXIII : Hodnoty drsností R_a a R_z v μm pro odlišné vstřikovací rychlosti – materiál ABS 3453

č. vzorku	R_a 120mm/s	R_z 120mm/s	R_a 70mm/s	R_z 70mm/s	R_a 20mm/s	R_z 20mm/s	R_a dutina	R_z dutina
1	0,291	1,905	0,248	1,640	0,255	1,686	0,007	0,079
2	0,319	1,842	0,284	1,746	0,303	1,810	0,010	0,086
3	0,279	1,861	0,248	1,658	0,261	1,879	0,041	0,309
4	0,267	1,658	0,310	2,114	0,309	2,069	0,099	0,725
5	0,296	1,977	0,261	1,767	0,256	1,885	0,126	1,047
6	0,394	2,498	0,342	2,200	0,352	2,247	0,199	1,401
7	0,476	3,153	0,465	3,167	0,400	3,109	0,531	3,715
8	1,218	6,136	1,226	6,309	1,170	5,910	1,290	6,389
9	2,816	11,286	2,866	11,445	2,778	11,215	2,902	12,074
10	3,348	14,232	3,450	14,274	3,372	14,235	3,456	15,650

PŘÍLOHA PXIV : Hodnoty drsností R_a a R_z v μm pro odlišné dotlaky – materiál ABS 3453

č. vzorku	R_a 60MPa	R_z 30MPa	R_a 45MPa	R_z 45MPa	R_a 30MPa	R_z 60MPa	R_a dutina	R_z dutina
1	0,156	2,872	0,255	1,640	0,469	1,093	0,007	0,079
2	0,156	2,847	0,256	1,599	0,494	0,934	0,010	0,086
3	0,136	2,786	0,231	1,488	0,471	1,026	0,041	0,309
4	0,158	3,120	0,233	1,594	0,527	1,445	0,099	0,725
5	0,143	3,281	0,235	1,584	0,559	1,263	0,126	1,047
6	0,218	2,803	0,308	2,049	0,471	1,652	0,199	1,401
7	0,415	3,228	0,410	2,838	0,540	2,931	0,531	3,715
8	1,274	5,425	1,186	5,894	1,026	6,354	1,290	6,389
9	2,896	7,559	2,801	11,139	1,636	11,748	2,902	12,074
10	3,407	12,447	3,354	14,097	3,045	14,220	3,456	15,650

**PŘÍLOHA PXV : Hodnoty drsností Ra a Rz v μm pro odlišné ITT
– materiál ABS Magnum**

č. vzorku	Ra ITT=5,5	Rz ITT=5,5	Ra ITT=15	Rz ITT=15	Ra ITT=28	Rz ITT=28	Ra dutina	Rz dutina
1	0,746	4,215	0,351	2,184	0,102	0,719	0,007	0,079
2	0,615	3,597	0,383	2,470	0,095	0,693	0,010	0,086
3	0,662	3,718	0,406	2,589	0,097	0,780	0,041	0,309
4	0,744	4,137	0,354	2,215	0,095	0,760	0,099	0,725
5	0,663	3,843	0,344	2,190	0,102	0,849	0,126	1,047
6	0,713	3,847	0,410	2,692	0,185	1,201	0,199	1,401
7	0,671	3,857	0,545	3,748	0,320	2,074	0,531	3,715
8	1,141	5,900	1,172	5,764	1,193	5,707	1,290	6,389
9	2,153	9,457	2,898	11,971	2,937	11,765	2,902	12,074
10	3,160	12,827	3,232	14,224	3,366	14,194	3,456	15,650