



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Teze disertační práce

Využití aditivních technologií výroby v oblasti temperace vstřikovacích forem

**The Use of Additive Technologies in Manufacturing of Injection
Mold Cooling Systems**

Autor: **Ing. Jan Hanzlík, Ph.D.**

Studijní program: P0711D130003 / Procesní inženýrství

Školitel: doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D.

Oponenti: prof. Ing. Michal Staněk, Ph.D.
Ing. Jozef Feranc, Ph.D.

Zlín, srpen 2024

© Jan Hanzlík

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary**.
Publikace byla vydána v roce 2024

Klíčová slova: *vstřikování, vstřikovací forma, temperační systémy, aditivní výroba, drsnost povrchu*

Key words: *injection, injection mold, cooling systems, additive manufacturing, surface roughness*

Práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7678-278-5

ABSTRAKT

S rostoucími požadavky na kvalitu vstříkovaných výrobků se zvyšují i nároky na konstrukci a výrobu nástrojů, jako jsou vstříkovací formy. Tradiční metody výroby často nedostačují k dosažení požadované přesnosti a efektivity, což vede k nutnosti využití pokročilých technologií. V této souvislosti aditivní technologie, jako jsou Direct Metal Laser Sintering (DMLS) a Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM), představují inovativní přístup umožňující výrobu složitých geometrických tvarů a vnitřních struktur, které nejsou realizovatelné konvenčními metodami.

Tato disertační práce se zaměřuje na výzkum v oblastech využití aditivních technologií v procesu vstříkování termoplastů. Konkrétně se jedná o temperační systémy, které ve výchozí podobě vykazují povrchy temperačních kanálů o vysokých drsnostech a nerovnostech, což v konečném důsledku může negativním způsobem ovlivnit celý zpracovatelský proces. V této práci je tedy diskutován vliv povrchových vlastností chladicích kanálů, vyrobených technologií DMLS a ADAM, na účinnost chladicích systémů. Na základě těchto zjištění je proveden návrh a konstrukce zařízení, společně s vhodnou metodikou obrábění a vyhodnocení dosažených parametrů, na kterém by bylo možné povrchy těchto struktur efektivně dokončovat. U navrženého zařízení, které vychází z metody Abrasive Flow Machining (AFM), je specificky zkoumána její použitelnost v rámci dokončování kanálů konformního chlazení a podobně řešených vnitřních struktur. Cílem těchto dokončovacích operací je dosažení povrchu kanálů o nižších drsnostech a nerovnostech, což se v konečném důsledku může pozitivně projevit zvýšením celkové efektivity chladicích systémů.

Výsledky výzkumu ukazují, že kanály vyrobené technologií DMLS vykazují nižší počáteční drsnosti povrchu ve srovnání s technologií ADAM. Po realizaci dokončovacích operací kanálů, za využití navrženého zařízení, dochází k výraznému snížení drsnosti povrchu u obou technologií, což potvrzuje vhodnost použití tohoto zařízení pro efektivní zlepšení kvality povrchu tištěných kanálů a vnitřních struktur. V rámci vyhodnocení získaných výsledků byla provedena statistická analýza zahrnující použití konfidenčních intervalů a testů normality, které prokázaly statistickou významnost zlepšení povrchové kvality po zavedení dokončovacích operací.

Z praktického hlediska má práce významné přínosy pro průmyslovou praxi. Lepší kvalita povrchu, např. v případě chladicích kanálů u konformního chlazení, vede k efektivnějšímu proudění temperačního média, což snižuje nároky na výkon temperačních jednotek a také minimalizuje riziko zanášení kanálů nečistotami.

Celkově tato disertační práce přináší nové poznatky do oblasti aditivní výroby a povrchových a dokončovacích úprav, poskytuje praktické aplikace pro zlepšení efektivity a kvality výrobních procesů a otevírá nové možnosti pro budoucí výzkum. Navržené metodologie a získané výsledky mohou sloužit jako referenční bod pro další studie zaměřené na vývoj nových dokončovacích metod, jejich optimalizací a zlepšení kvality vnitřních povrchů v případě komponentů vyrobených aditivními technologiemi.

ABSTRACT

With increasing demands for the quality of injection-molded products, the requirements for the design and manufacture of tools, such as injection molds, are also rising. Traditional manufacturing methods often fail to achieve the desired precision and efficiency, necessitating the use of advanced technologies. In this context, additive manufacturing technologies, such as Direct Metal Laser Sintering (DMLS) and Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM), represent innovative approaches that enable the production of complex geometric shapes and internal structures that are not practicable with conventional methods.

This dissertation focuses on the research of utilizing additive technologies in the injection molding process of thermoplastics. Specifically, it addresses conformal cooling systems that, in their initial state, exhibit high surface roughness and irregularities in the cooling channels, which can negatively affect the entire processing procedure. This work discusses the impact of surface properties of cooling channels, manufactured by DMLS and ADAM technologies, on the efficiency of cooling systems. Based on these findings, a design and manufacturing of a device, along with an appropriate machining methodology and evaluation of achieved parameters, were carried out to effectively finish the surfaces of these structures. The proposed device, which is based on the Abrasive Flow Machining (AFM) method, is specifically examined for its applicability in finishing conformal cooling channels and similarly designed internal structures. The aim of these finishing operations is to achieve lower surface roughness and irregularities in the channels, which can lead to an overall increase in the efficiency of cooling systems.

The research results indicate that channels produced using DMLS technology exhibit lower initial surface roughness compared to those produced using ADAM technology. Following the finishing operations of the channels using the proposed device, there is a significant reduction in surface roughness for both technologies, confirming the suitability of this device for effectively improving the surface quality of printed channels and internal structures. Statistical analysis of the obtained results included the use of confidence intervals and normality tests, which demonstrated the statistical significance of the improvement in surface quality after the finishing operation.

From a practical perspective, this study has significant implications for industrial practice. Improved surface quality, for example, in the case of cooling channels in conformal cooling, leads to more efficient flow of the cooling medium, reducing the demands on the performance of cooling units and minimizing the risk of channel clogging by impurities.

Overall, this dissertation introduces new insights into the field of additive manufacturing and surface finishing, providing practical applications for improving the efficiency and quality of manufacturing processes and opening new avenues for future research. The proposed methodologies and obtained results can serve as a reference point for further studies aimed at developing new finishing methods and improving surface quality in additively manufactured components.

OBSAH

1.	ÚVOD	8
2.	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	9
3.	CÍLE PRÁCE	11
	ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ	13
4.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	14
4.1	Zkušební tělesa.....	14
4.2	Měření povrchových vlastností kanálů – neobrobený povrch.....	14
4.2.1	Parametry drsnosti povrchu a jeho topologie	15
4.2.2	SEM analýza povrchu	16
4.3	Vliv drsnosti kanálů na procesní parametry temperace	19
4.3.1	Shrnutí výsledků simulací.....	19
4.4	Konstrukce a výroba zařízení pro dokončování vnitřních ploch.....	20
4.5	Měření povrchových vlastností kanálů – obrobený povrch	22
4.5.1	Parametry drsnosti povrchu a jeho topologie	22
4.5.2	Statistické vyhodnocení naměřených výsledků	25
4.5.3	SEM analýza povrchu	26
4.6	Alternativní způsob vyhodnocení efektivity obrábění (bez porušení studovaných objektů)	27
5.	DISKUZE VÝSLEDKŮ	30
6.	PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI.....	33
7.	ZÁVĚR.....	36
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	37
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	45
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	47
	PUBLIKAČNÍ ČINNOST	49
	ODBORNÝ ŽIVOTOPIS	50

1. ÚVOD

Technologie vstřikování je jednou z nejrozšířenějších a neustále se vyvíjejících metod zpracování plastů. Její využití sahá do různých průmyslových odvětví, zejména do automobilového, leteckého a obranného průmyslu. Hlavní výhodou této technologie spočívá ve schopnosti vyrábět složité tvarové součásti s výjimečnou rozměrovou přesností, zejména ve velkosériové výrobě. To zahrnuje výrobu tenkostěnných a silnostěnných součástí, jakož i výrobků se složitou geometrií. Při výrobě některých součástí se však mohou objevit problémy týkající se kvality vstřikování, kterým je třeba věnovat pozornost [1-3].

Řešení těchto problémů často zahrnuje použití specializovaných metod vstřikování, jako je vícekomponentní vstřikování nebo vstřikování pod tlakem (ICM). Pokud je nutné použít tradiční vstřikování, je třeba klást důraz na konstrukci formy, zejména na chladicí systém, aby bylo zajištěno rovnoměrné rozložení teploty po celém povrchu výrobku. Rovnoměrnost teploty hraje klíčovou roli při zajišťování rozměrové stability a minimalizaci zbytkových napětí. Konvenční výrobní metody však mohou být při zajišťování rovnoměrnosti teploty u jedinečně tvarovaných výrobků nedostatečné, což vede k zavádění konformního chlazení, které umožňují aditivní výrobní technologie. V návaznosti na tuto skutečnost je využití konformního chlazení v konstrukci vstřikovacích forem stále vyšší, ale problémy spojené s aditivní výrobou, jako je drsnost povrchu, nejsou v této oblasti tolik zkoumány [1-4].

2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Technologie vstřikování je jednou z nejrozšířenějších a neustále se rozvíjejících metod pro zpracování plastů. Výrobky zhotovené touto technologií mají uplatnění hned v několika průmyslových odvětvích, zejména pak v automobilovém, leteckém a zbrojařském průmyslu. Hlavní předností této technologie, která se následně propisuje do jejího aplikačního potenciálu, je schopnost výroby tvarově složitých součástí s vysokou rozměrovou a tvarovou přesností, kdy lze vyrábět součásti jak tenkostěnné skořepinové nebo tlustostěnné, tak i výrobky se specifickým tvarem. Nicméně při výrobě některého z výše uvedených produktů mohou nastat komplikace související s výslednou kvalitou výstřiku, na které se musí brát zřetel. Částečně lze tuto skutečnost vyřešit použitím některé ze speciálních metod vstřikování, jako je např. vstřikování s podporou vody (WIT) nebo plynu (GIT). Nicméně v případech, kde je ale nutné využít klasickou technologii vstřikování, je potřeba zaměřit se na konstrukci vstřikovací formy, především na návrh temperačního systému tak, aby bylo zajištěno co nejvíce uniformní teplotní pole na povrchu vstřikovaného výrobku. Rovnoměrnost teplotního pole je klíčový faktor pro zajištění rozměrové stálosti výrobku a pro co nejvyšší redukci zbytkového pnutí. Při nedodržení těchto kritérií mohou vstřikované díly vykazovat výrazné deformace, které se navíc mohou projevit i po nějakém čase od konce vstřikovacího cyklu. Při využití konvenčních metod výroby vstřikovacích forem bohužel nelze v některých případech zajistit u tvarově specifických výrobků rovnoměrnost teplotního pole. Možným řešením je použití tzv. konformního chlazení, které lze zhotovit pomocí některé z aditivních technologií výroby.

Při rešerši v oblasti temperace vstřikovacích forem bylo zjištěno, že směr výzkumu je v dnešní době směřován především do oblasti konformního chlazení, kde je snahou zvyšovat efektivitu temperačních systémů. Velká část studií, které byly řešeny v posledních letech [1-6], se zabývá porovnáním rozdílů mezi klasickým způsobem temperace a temperacemi vytvořenými pomocí aditivních technologií výroby. Převážná většina těchto výstupů řeší tuto problematiku pouze na bázi simulací, nikoliv však na reálných případech. To může být způsobeno tím, že aditivní technologie výroby jednotlivých dílů z ocelí je stále poměrně nákladná.

Z hlediska samotné aditivní výroby zůstává velkým negativem to, že takto připravené výrobky vykazují povrch o nízké kvalitě a vysoké drsnosti [14, 35, 36]. Drsnost povrchu u komponentů vyrobených aditivními technologiemi se může pohybovat v rozmezí od desítek až do stovek μm [35, 36]. V případě kanálů temperačního systému může tato zhoršená kvalita povrchu způsobit jejich zanášení nečistotami, což v kombinaci s malými průměry kanálů (\varnothing kanálu ≤ 6 mm) může způsobit v krajním případě i jejich neprůchodnost [23-28]. Vysoká

drsnost kanálu může navíc zhoršovat odvod tepla a způsobovat koncentrace napětí a tím pádem i nižší únavovou pevnost. [11-13]

Tato skutečnost úzce souvisí se samotným principem aditivní výroby. Například při laserovém sintrování kovů (DMLS) se struktura vytváří postupným nanášením vrstev mikroskopických zrn a pomocí vysoce výkonných laserových paprsků se selektivně taví zrna prášku v každé vrstvě. Tento typ technologie se pro svou přesnost používá mimo jiné také v jaderné energetice [62,63]. Jednou z hlavních výzev při použití DMLS v konstrukci konformního chlazení je výskyt jak vysoké drsnosti, tak i mikroskopických porézních defektů (v případě kovových struktur vytištěných 3D tiskem). Takové póry jsou artefaktem procesu aditivní výroby kovů zahrnující rychlé tavení a tuhnutí bez dobře definovaných okrajových podmínek [64]. V závislosti na tvaru, velikosti a orientaci vzhledem ke struktuře povrchu mohou porézní defekty vést k tvorbě trhlin v materiálu a způsobit selhání takto tištěné struktury [65-67]. Vhodnou metodou, jak tyto defekty odhalit, je skenovací elektronová mikroskopie (SEM). [68]

Technologie ADAM v současnou chvíli není primárně určená pro aplikace související s výrobou konformního chlazení, nicméně technologie samotná nabízí jistý potenciál uplatnitelnosti i v těchto oblastech. Výhody technologie ADAM (v porovnání s DMLS) spočívají v uživatelsky přívětivějším procesu výroby a její ekonomické náročnosti. Přes výše uvedené zůstává DMLS nejčastěji používanou technologií pro tyto aplikace. Nicméně technologie ADAM může z hlediska výroby konformního chlazení nabídnout v budoucnu vhodnou alternativu ke standardně využívaným metodám aditivní výroby. Je třeba zmínit, že povrchy 3D tištěných struktur mají při použití obou technologií, DMLS i ADAM, velmi nízkou kvalitu s vysokými hodnotami drsnosti. [35-36]

Pro využití plného potenciálu aditivních technologií v oblasti teploty vstřikovacích forem je tedy bezpodmínečně nutné povrchy kanálů dodatečně upravit tak, aby vykazovaly nižší drsnost. Z hlediska možné technologie, kterou by bylo možné pro tyto aplikace použít, se jako vhodná jeví metoda AFM, kterou lze dle posledních studií [11-22] použít pro efektivní obrábění vnitřních ploch. Společně s možným využitím metody AFM pro dokončování vnitřních kanálů vyrobených aditivními technologiemi v rámci teploty vstřikovacích forem je velmi důležitá i správná volba abrasivních materiálů a procesních podmínek obrábění, což jsou všechno oblasti, které nebyly dosud zcela probádány.

Celkově je smyslem této práce ověřit vliv drsnosti povrchu chladicích kanálů vyrobených technologiemi DMLS a ADAM na celkovou efektivitu chladicích systémů a dále provést návrh a výrobu zařízení pro dokončování těchto povrchů (vč. návrhu metodiky obrábění).

3. CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem této práce je ověřit vliv povrchových vlastností chladicích kanálů vyrobených technologiemi DMLS a ADAM na celkovou účinnost chladicích systémů a blíže specifikovat možný přínos použití dokončovacích operací vnitřních povrchů za účelem zvýšení jejich kvality. Na základě získaných dat bude proveden návrh metodiky dokončování vnitřních ploch tištěných struktur a dále návrh konstrukce a samotná výroba zařízení, které bude koncipováno jako univerzální, a na kterém budeme možné tyto plochy efektivně dokončovat. Na závěr práce bude provedeno prvotní testování, ze kterého budou získaná data statisticky vyhodnocena a na jejichž základě bude možné definovat další směry výzkumu v této oblasti.

Postup v rámci řešení disertační práce je následující:

1. Návrh a konstrukce modelů zkušebních těles, se snahou co nejvíce simulovat reálný proces vstřikování.
2. Výroba zkušebních těles vhodnými metodami aditivní technologie (DMLS a ADAM).
3. Volba vhodného softwaru (SW) použitelného pro predikci vlivu drsnosti kanálu na efektivitu chlazení vstřikovacích forem.
4. Provedení analýz vlivu kvality (drsnosti) kanálu na jednotlivé parametry temperačního systému (Reynoldsovo číslo, tlak a rychlost proudění temperačního média).
5. Návrh konstrukce zařízení pro dokončování kanálů temperačních systémů vstřikovacích forem (princip zařízení bude založen na technologii AFM).
6. Výroba navrženého zařízení, které bude mimo výše uvedené koncipováno také jako univerzální a bude možné ho využít pro dokončovací operace nejen u chladicích kanálů, ale taky u širokého spektra vnitřních struktur.
7. Volba komerčně dostupného abrasivního média využitelného v rámci navrženého zařízení.

8. Prvotní testování navrženého zařízení, stanovení metodiky obrábění a samotné obrobení zkušebních těles s přesně definovanými vstupními parametry a testování jejich vlivu na povrchové vlastnosti kanálu.
9. Vyhodnocení získaných výsledků vzhledem ke kvalitě získaného povrchu v závislosti na počtu cyklů.

ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Jak již bylo zmíněno v předešlých kapitolách, jedním z největších úskalí při využití aditivních technologií v rámci výroby temperačních systémů vstřikovacích forem je výsledná kvalita povrchu kanálu. Zvolené metody zpracování byly koncipovány tak, aby bylo možné v postupných krocích prokázat vliv kvality povrchů těchto ploch na efektivitu temperačního systému a následně navrhnout metodiku (vč. konstrukce a výroby zařízení) pro jejich možné dokončování.

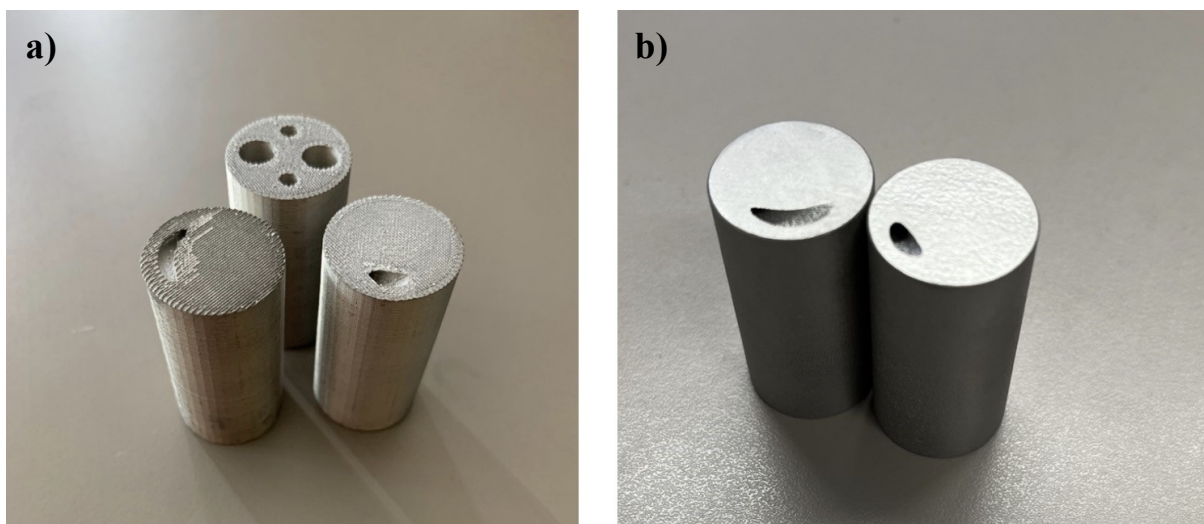
Zvolené metody zpracování tedy zahrnují trojrozměrné modelování zkušebních těles a také zařízení pro dokončování vnitřních otvorů (Catia V5), bezkontaktní měření povrchových vlastností zkušebních těles za využití profilometru a počítačové tomografie, CAE simulace pro ověření vlivu drsnosti temperačních kanálů na celkovou efektivitu temperačních systémů (Moldflow 2023, Cadmould 17 a Moldex3D), analýzu povrchu kanálů technologií SEM, ověření funkčnosti navrženého zařízení, studii vlivu počtu obráběcích cyklů na získané povrchové vlastnosti kanálu a statistické vyhodnocení naměřených výsledků pomocí SW Minitab® 17 a QC-Expert 3.3.

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato část se zabývá návrhem a konstrukcí zkušebních těles, volbou materiálů a metod pro jejich výrobu, a také metodami měření a analýzy povrchových vlastností temperačních kanálů. Cílem experimentů bylo ověřit hypotézy týkající se vlivu drsnosti povrchu na efektivitu chladicích systémů vstřikovacích forem a zkoumat možnosti a následně navrhnout efektivní řešení pro obrobení a dokončení těchto povrchů. Při přípravě experimentů byly zvoleny dva typy nástrojové oceli (1.2344 a 1.2709), které byly následně zpracovány pomocí technologií DMLS a ADAM. Pro měření povrchových vlastností bylo využito široké škály metod, vč. bezkontaktního měření za využití profilometru a počítačové tomografie, a dále pak technologie SEM. Naměřená data byla statisticky vyhodnocena a diskutována. Pro dokončování kanálů bylo navrženo a zkonstruováno zařízení pracující na principu metody AFM jehož funkčnost a efektivita byla ověřena na základě provedených testů a měření

4.1 Zkušební tělesa

Pro samotné měření vlivu počtu obráběcích cyklů na povrchové vlastnosti kanálů byl navržen typ zkušebního tělesa, který je zobrazen na následujícím obrázku (Obr. 4.1). Tento typ má tvar válce a uvnitř je vytvořen kanál ve tvaru šroubovice se stoupáním 10 mm.



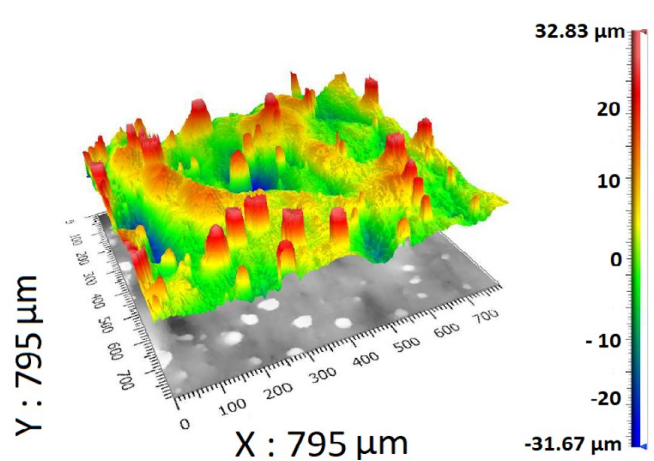
Obr. 4.1: Zkušební tělesa: a) technologie ADAM (materiál 1.2344), b) technologie DMLS (materiál 1.2709)

4.2 Měření povrchových vlastností kanálů – neobrobený povrch

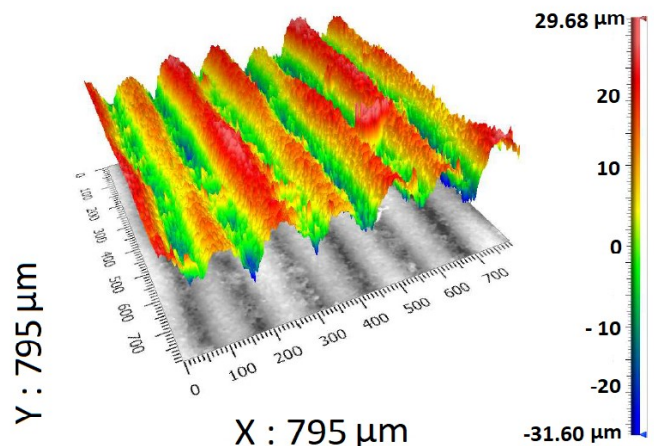
Po výrobě zkušebních těles bylo provedeno měření povrchových vlastností kanálů. Tyto kanály byly ve stavu bez obrobení (tzn. parametr drsnosti povrchu byl dán technologií tisku) a získané výsledky sloužily jako referenční hodnoty, které byly použity jako výchozí parametr v rámci provedených simulací a dále pro zjištění efektivity obrábění v závislosti na počtu cyklů.

4.2.1 Parametry drsnosti povrchu a jeho topologie

Projekce naměřených dat neobrobených povrchů jsou zobrazeny na následujících obrázcích (Obr. 4.2 a 4.3).



Obr. 4.2: Projekce naměřených dat povrchu zkušebního tělesa (technologie: DMLS , povrch: neobrobený) [69]



Obr. 4.3: Projekce naměřených dat povrchu zkušebního tělesa (technologie: ADAM , povrch: neobrobený) [69]

Projekce naměřených dat u technologie DMLS je znázorněna na obrázku 4.2. Zde lze vidět maximální a minimální naměřené hodnoty drsnosti povrchu vzorku. V tomto případě dosahovala maximální hodnota 32,83 μm a minimální hodnota byla -31,67 μm .

Na obrázku 4.3 lze vidět minimální a maximální hodnoty drsnosti povrchu zkušebního tělesa vyrobeného technologií ADAM. Je zřejmé, že maximální hodnota drsnosti je 29,68 μm a minimální hodnota je -31,60 μm . Z této topologie je zjevné postupné nanášení jednotlivých vrstev, tak jako v případě polymerního 3D FDM tisku.

Jako charakteristický statistický parametr pro další kroky v rámci řešení této disertační práce (simulace aj.) byl zvolen odhad aritmetického průměru. V následující tabulce (Tab. 4.1) jsou zobrazeny hodnoty transformovaných aritmetických průměrů parametru Rz. Tyto hodnoty byly následně použity při výpočtech simulací jako výchozí hodnota výšky profilu drsnosti Rz a dále jako referenční hodnota v případě testování povrchových vlastností v závislosti na počtu obráběcích cyklů.

Tabulka 4.1: Hodnoty transformovaných aritmetických průměrů parametru Rz (neobrobený povrch kanálů)

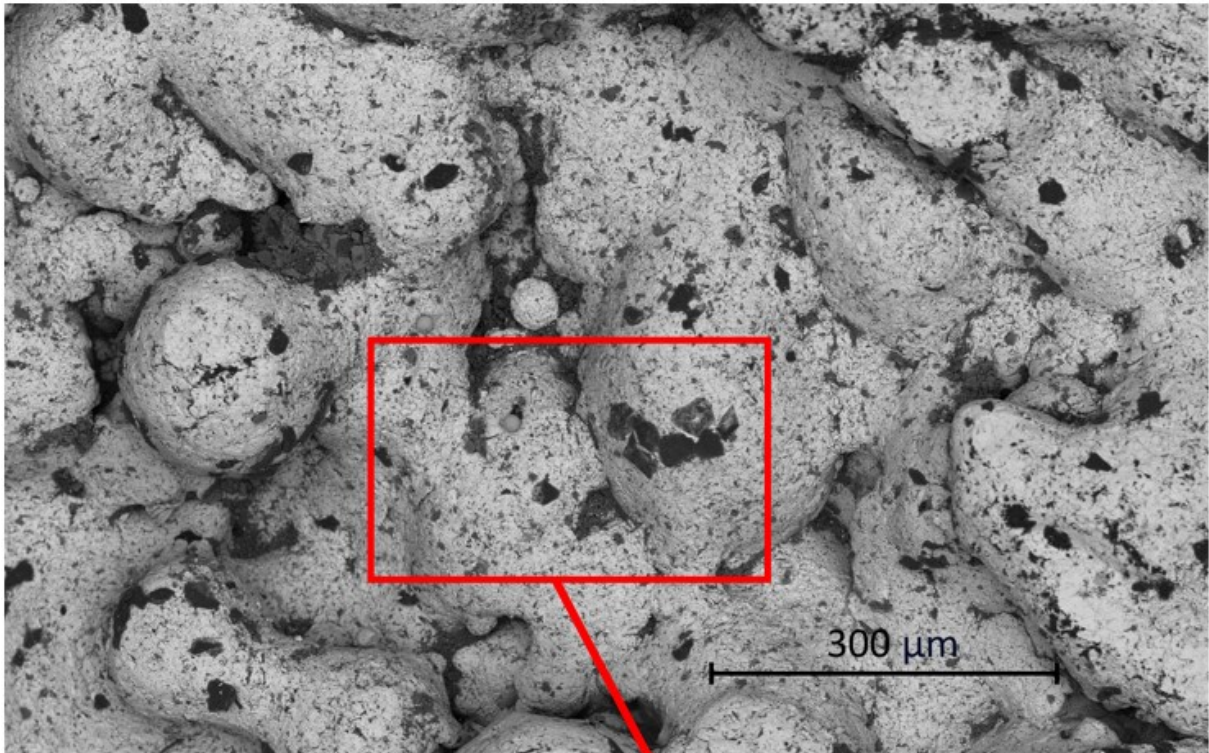
Parametr	Technologie DMLS	Technologie ADAM
Rz [μm]	21	34

4.2.2 SEM analýza povrchu

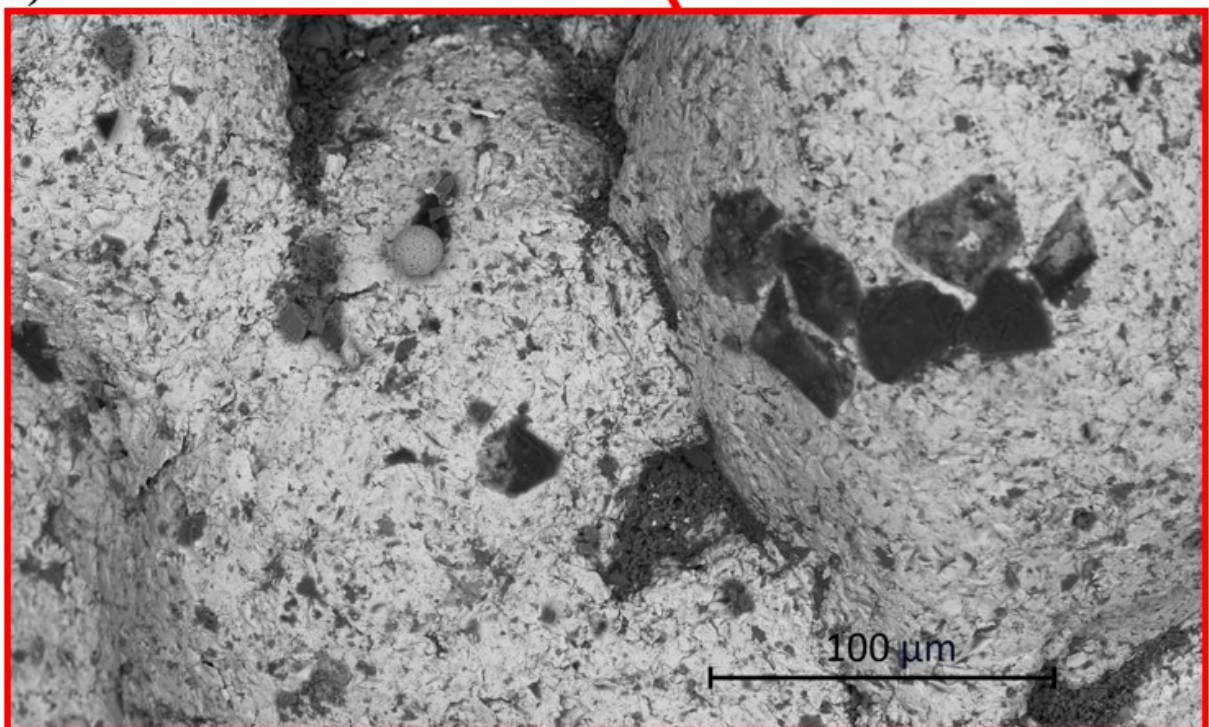
K bližšímu prozkoumání struktury obou vzorků byla použita technologie SEM, která je schopna zobrazit mikrostrukturu daného materiálu. Hustá a rovnoměrná mikrostruktura je klíčem k účinnému chlazení tvarových vložek vstřikovacích forem, protože zajišťuje vysokou tepelnou vodivost. Pro optimální přenos tepla se obvykle upřednostňuje jemnozrnná struktura s nízkou pórovitostí. Pro dosažení požadované mikrostruktury jsou klíčové mimo jiné i parametry výrobního procesu.

Výsledky získané pomocí technologie SEM se topologicky shodují s výsledky měření drsnosti povrchu. Na obrázku 4.4 je zobrazen povrch zkušebního tělesa, jehož charakteristika odpovídá povrchu vytvořenému technologií DMLS. Zkoumaná povrch nevykazuje žádný významný typ porézního defektu (Obr. 4.4a,b). Z předchozích studií je známo, že technologie DMLS může vytvářet strukturu obsahující neroztavené částice kovového prášku. Tuto skutečnost lze pozorovat na obrázku 4.4b, který zobrazuje detailní pohled na červeně vyznačenou obdélníkovou oblast (Obr. 4.4a). Na takto pořízeném detailu povrchu zkušebního tělesa lze indikovat přichycenou částičku kovového prášku, která má globulární tvar.

a)

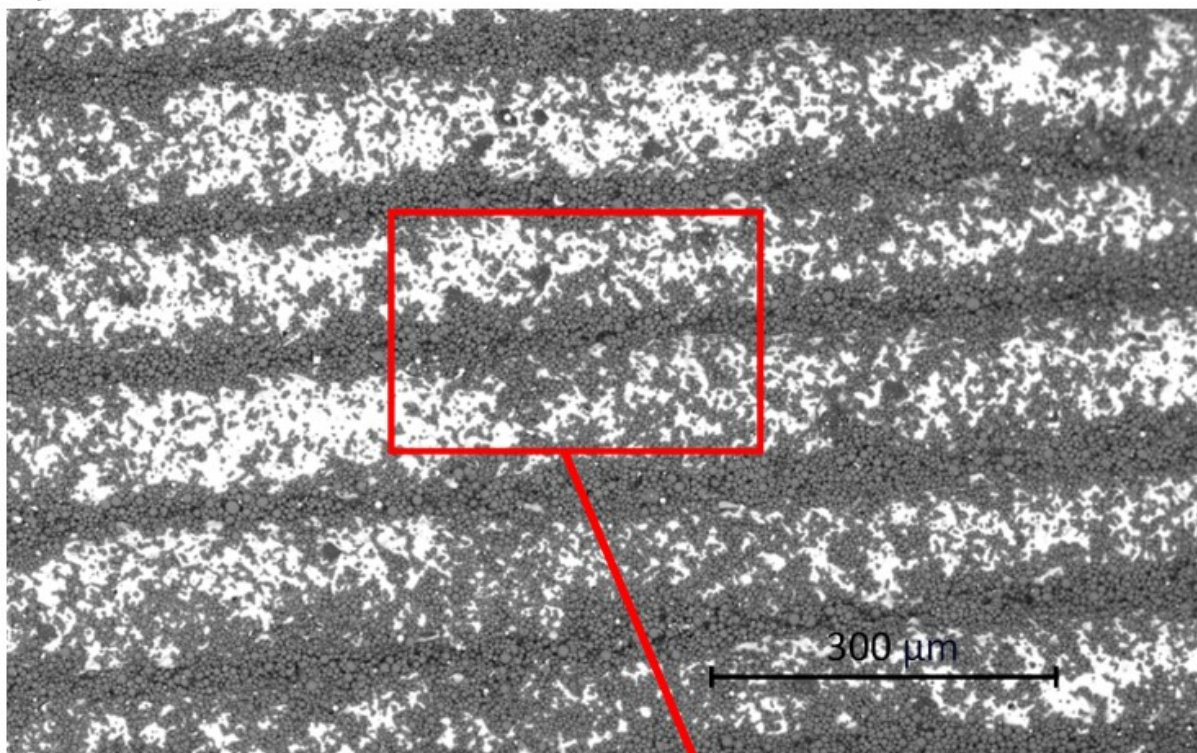


b)

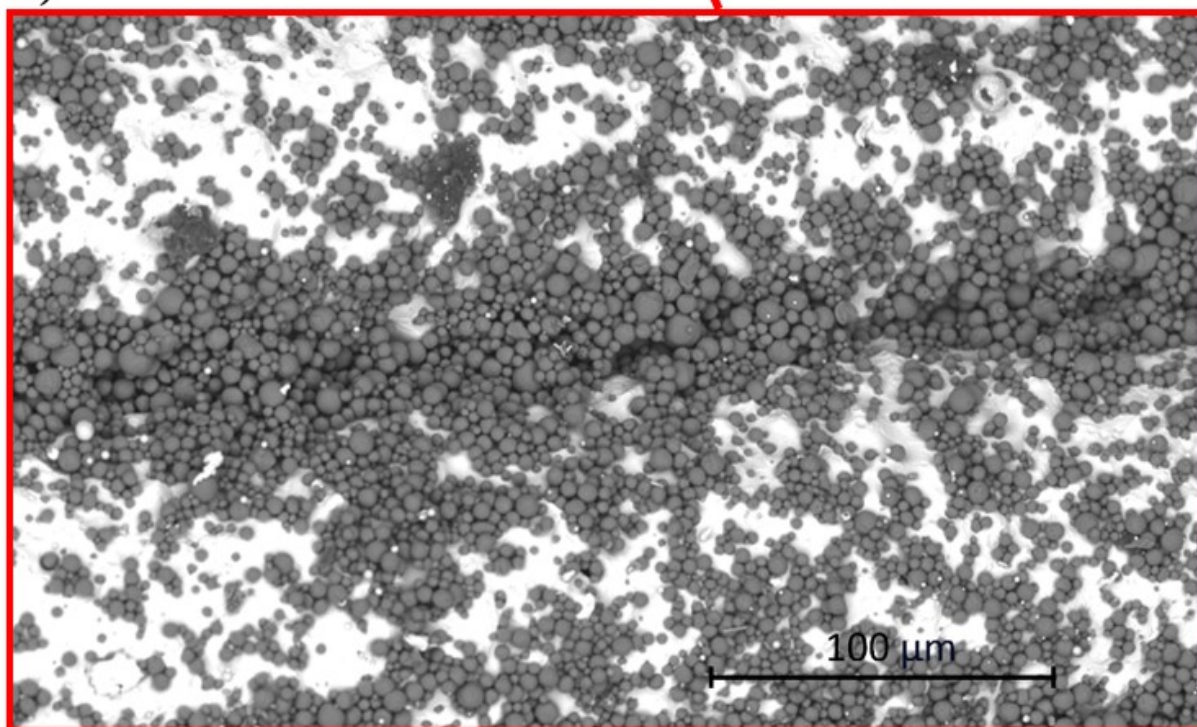


Obr. 4.4: SEM snímek povrchu zkušebního vzorku (technologie DMLS): a) přiblížení 500x, b) detail (přiblížení 1500x) [69]

a)



b)



Obr. 4.5: SEM snímek povrchu zkušební vzorku (technologie ADAM): a) přiblížení 500x, b) detail (přiblížení 1500x) [69]

Na Obr. 4.5 je zobrazen povrch zkušební tělesa, který je vytvořený technologií ADAM. Je zřejmé, že tento typ povrchu se rapidně liší v porovnání s povrchem, který byl vytvořený technologií DMLS (Obr. 4.4). Snímky

zkušební tělesa nevykazují žádný typ pórovitosti, která by mohla způsobovat únik chladicího média do dutiny vstřikovací formy (Obr. 4.5a,b). Struktura povrchu zkušební tělesa vykazuje zjevné známky vrstevnatosti (Obr. 4.5a), což je způsobeno samotnou technologií ADAM.

4.3 Vliv drsnosti kanálů na procesní parametry teploty

Analýzy vlivu drsnosti povrchu chladicích kanálů vyrobených aditivními technologiemi by měly potvrdit hypotézu, že dokončování chladicích kanálů pozitivně ovlivňuje chování chladicího média při proudění a jeho tlakovou ztrátu. Analýza byla provedena na skutečném tlustostěnném optickém dílu. K prokázání vlivu drsnosti kanálů na konkrétní parametry teploty byly využity CAE simulace (za využití SW Moldex 3D), které dokážou predikovat chování teplotního média po délce chladicího kanálu.

4.3.1 Shrnutí výsledků simulací

Tabulky 4.2 a 4.3 shrnují získaná data z provedených analýz u technologií DMLS a ADAM. Ze zjištěných výsledků je možné konstatovat, že se snižující drsností povrchu kanálu klesá tlak teplotního média a rostou hodnoty Reynoldsova čísla a rychlosti proudění.

Tabulka 4.2: Shrnutí výsledků analýz pro technologii DMLS [69]

Rz [μm]	Tlak [MPa]	Reynoldsovo číslo [-]	Rychlost proudění [cm/s]
21	0,433	95 930	605,3
18,9	0,425	95 980	605,6
16,8	0,418	96 060	606,6
14,7	0,413	96 110	610,9
12,6	0,407	96 190	616,7
10,5	0,400	96 260	626,6
8,4	0,393	96 320	630,9
6,3	0,386	96 360	637,1
4,2	0,379	96 390	640,0
2,1	0,371	96 410	642,0

Tabulka 4.3: Shrnutí výsledků analýz pro technologii ADAM [69]

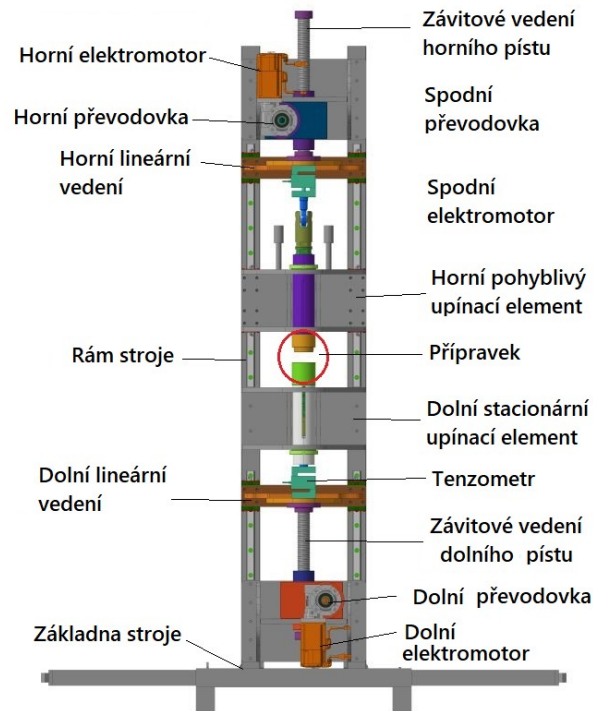
Rz [μm]	Tlak [MPa]	Reynoldsovo číslo [-]	Rychlost proudění [cm/s]
34	0,481	95 810	601,2
30,6	0,476	95 860	601,3
27,2	0,465	95 890	602,5
23,8	0,456	95 910	603,8
20,4	0,439	95 940	605,8
17	0,420	96 050	608,3
13,6	0,410	96 130	614,4
10,2	0,398	96 270	626,2
6,8	0,389	96 330	636,5
3,4	0,378	96 370	640,4

4.4 Konstrukce a výroba zařízení pro dokončování vnitřních ploch

Na základě předchozích studií a provedené rešerše byl dalším krokem v rámci vypracování této disertační práce návrh konstrukce a samotná výroba zařízení, na kterém bude možné vnitřní plochy kanálů u konformního chlazení dokončit a efektivně tak zvýšit jejich kvalitu (snížit drsnost, sjednotit topologii aj.). Navržené zařízení bude pracovat na principu obousměrné technologie AFM u kterého bude v rámci dokončovacího procesu docházet v pracovních válcích ke generaci tlaku, který bude spotřebováván na protlačení obráběcího média. Zároveň tento tlak může negativně působit také na rám stroje a mechanicky ho namáhat. Z tohoto důvodu musel být tento fakt brán v potaz již při samotném návrhu rámu stroje (především z hlediska dostatečné tuhosti).

Celý koncept je sestaven z jednotlivých podsestav, přičemž každá má svůj specifický účel. Všechny tyto podsestavy tvoří dohromady jednu hlavní sestavu, jejíž schéma je zobrazeno na obrázku 4.6. Zařízení je navrženo jako univerzální, tzn. že je možné ho použít pro obrábění širokého spektra objektů různých geometrií a velikostí. Zařízení primárně pracuje na principu obousměrného obrábění, nicméně konstrukční návrh umožňuje také možnost pouze jednosměrného protlačování, což může být výhodné zejména u rozměrově objemnějších dílů, u kterých je navíc možné za pomoci konkrétních přípravků

vytvořit tzv. bypass a umožnit tak protlačovat obráběcí médium mimo upínací část stroje.



Obr. 4.6: Schéma sestavy navrženého zařízení [70]



Obr. 4.7: Vyrobené a zkompletované zařízení

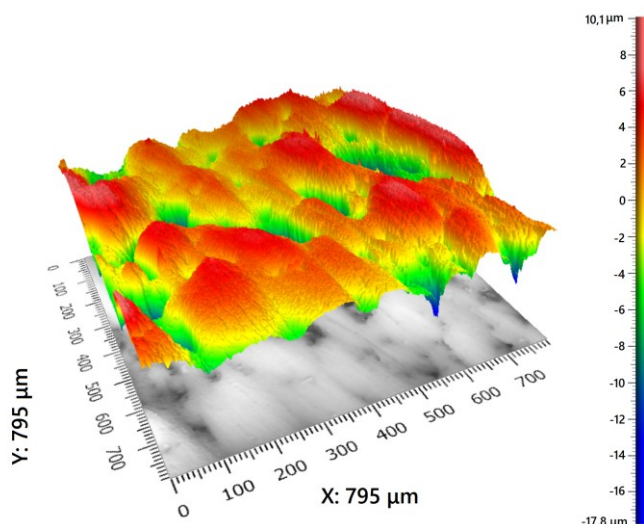
4.5 Měření povrchových vlastností kanálů – obrobený povrch

V dalším kroku byly měřeny povrchové vlastnosti kanálu v závislosti na počtu obráběcích cyklů.

4.5.1 Parametry drsnosti povrchu a jeho topologie

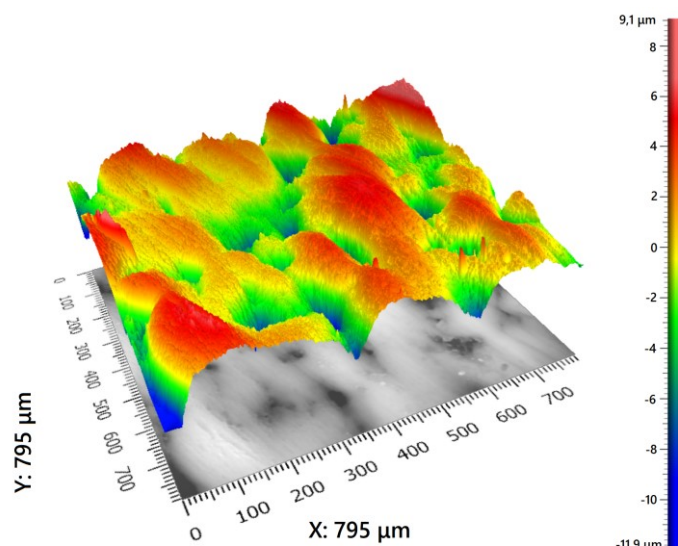
Po provedení stanoveného počtu cyklů byly všechny zkušební tělesa, stejně jako v případě testování neobrobených těles soustruženy tak, aby byly povrchy vnitřního kanálu odhaleny a aby bylo možné jejich měření pomocí bezkontaktního optického profilometru Zygo Newview 8 000.

Na obrázku níže (Obr. 4.8) lze vidět interpretaci povrchu po 20 cyklech obrábění u technologie DMLS. Je patrné, že oproti neobrobenému povrchu (Obr. 4.2) došlo již po 20 cyklech k jeho změně, a to především v podobě redukce velkých peaků, kdy v tomto případě jejich maximální hodnota dosahuje $10,1 \mu\text{m}$ a průměrná hodnota parametru Rz je rovna $10,3 \mu\text{m}$.



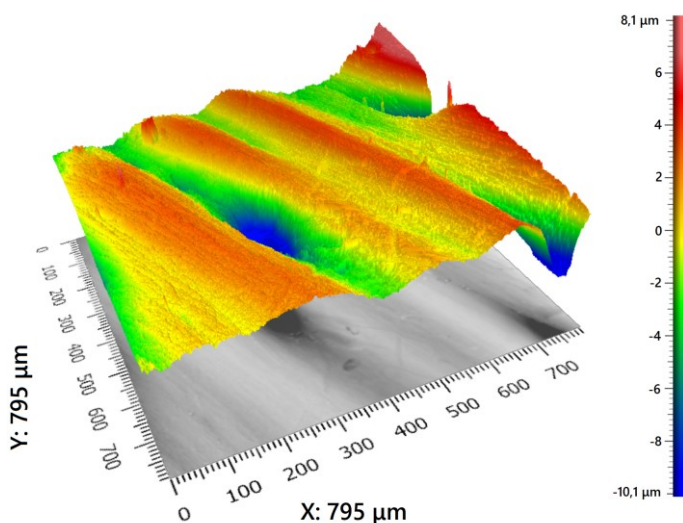
Obr. 4.8: Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušební vzorku (technologie: DMLS, počet cyklů: 20)

Následující obrázek (Obr. 4.9) znázorňuje projekci nasnímaného povrchu po obrobení 40 cykly. Je zjevné, že na povrchu jsou přítomny stopy drah abrasivních částic, což dokazuje, že dochází k úběru materiálu.

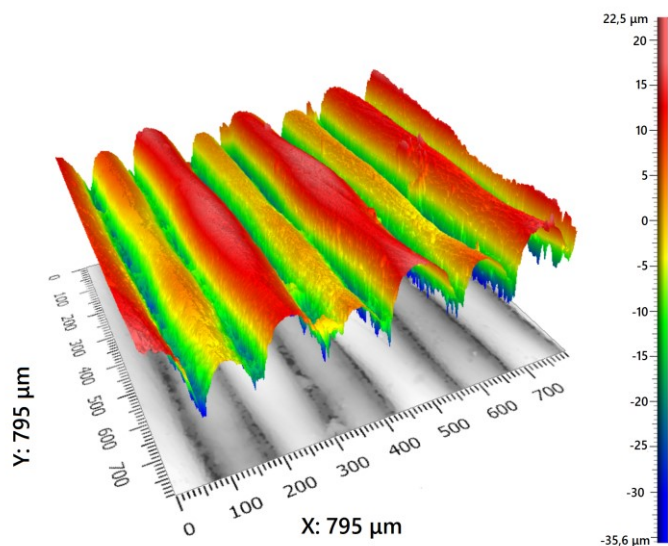


Obr. 4.9: Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního tělesa (technologie: DMLS, počet cyklů: 40)

Na následujícím obrázku (Obr. 4.10) je zobrazena projekce povrchu dosaženého po 60 cyklech obrábění. V porovnání s neobrobenou plochou kanálu, která byla měřena ihned po tisku zkušebních těles, je dosažená hodnota parametru Rz téměř o 79 % nižší.

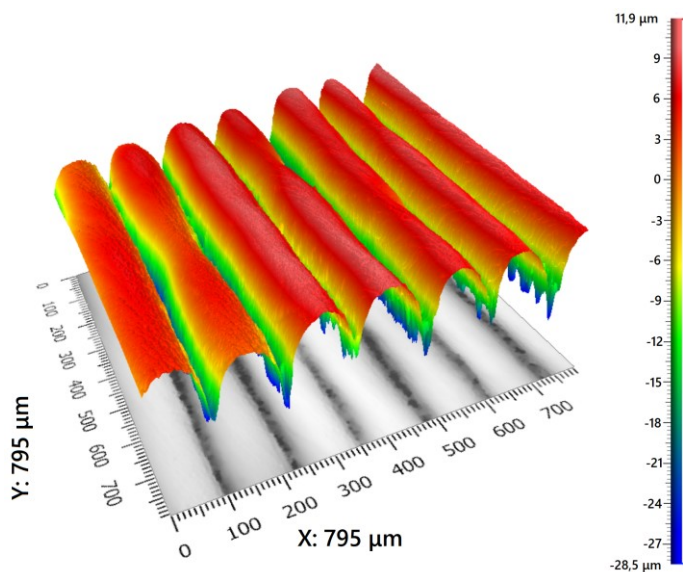


Obr. 4.10: Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního tělesa (technologie: DMLS, počet cyklů: 60)



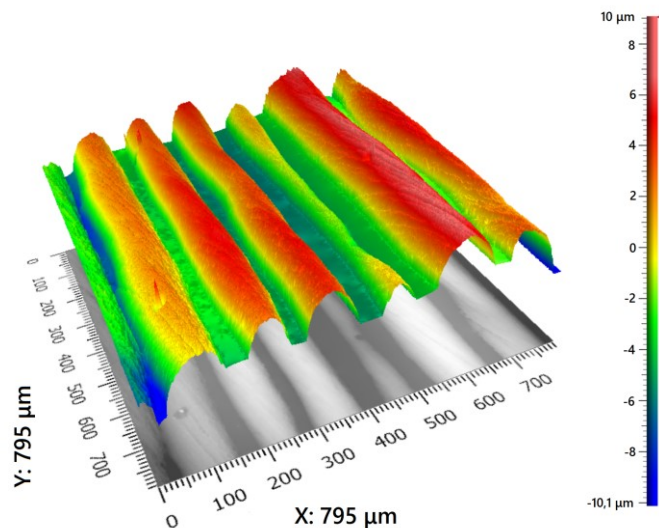
Obr. 4.11: Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního tělesa (technologie: ADAM, počet cyklů: 20)

Na výše uvedeném obrázku (Obr. 4.11) je zobrazena projekce povrchu kanálu zkušebního tělesa vyrobeného technologií ADAM a nasnímaného po 20 cyklech obráběcího procesu. Oproti neobrobenému povrchu je patrné, že po 20 cyklech dochází k zahmlení peaků na jednotlivých vrstvách vzniklých technologií tisku.



Obr. 4.12: Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního tělesa (technologie: ADAM, počet cyklů: 40)

Projekce povrchu nasnímaného po 40 obráběcích cyklech je zobrazena na výše uvedeném obrázku (Obr. 4.12). Na obrázku lze pozorovat, že povrch je pravidelnější a jeví známky stop po abrasivních částicích.

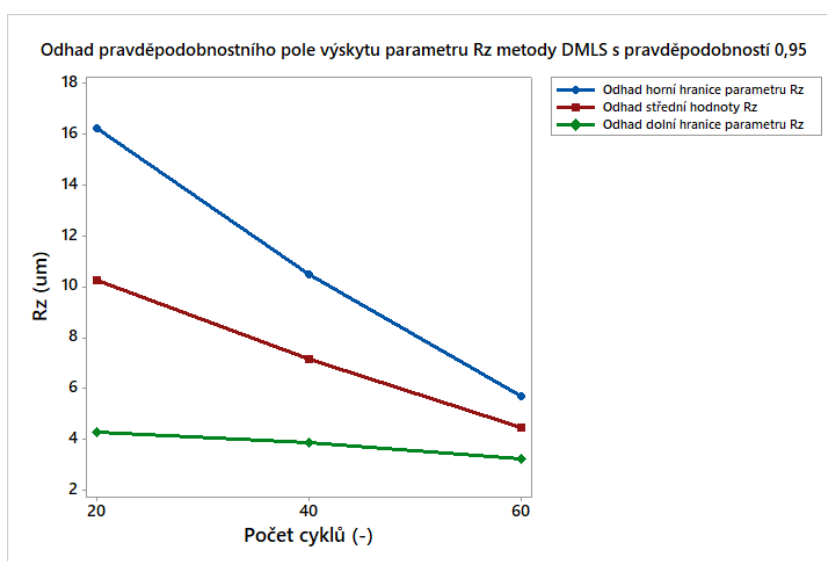


Obr. 4.13: Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního tělesa (technologie: ADAM, počet cyklů: 60)

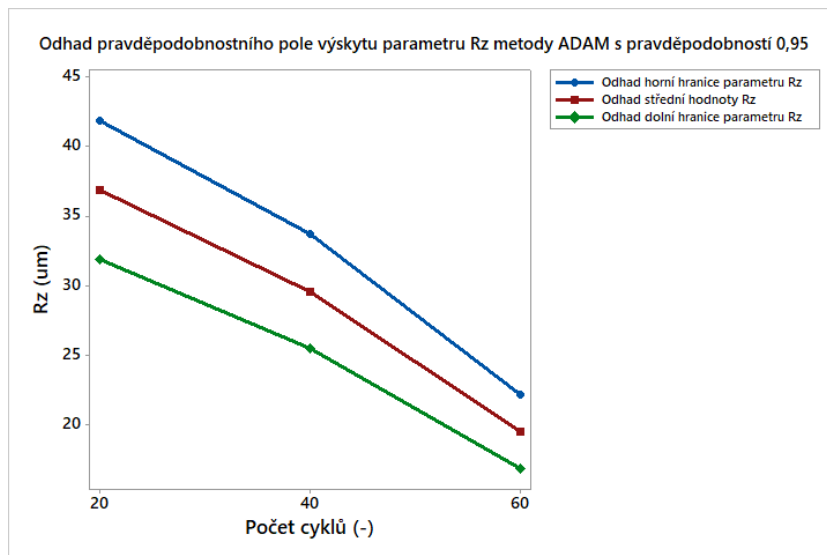
Na výše uvedeném obrázku (Obr. 4.13) lze vidět projekci povrchu kanálu získanou po 60 cyklech obrábění. Z výsledku měření je patrné, že některé z vrstev se již začínají ztrácet, nicméně pro úplné odstranění se jeví 60 cyklů jako nedostatečných.

4.5.2 Statistické vyhodnocení naměřených výsledků

Pro statistické vyhodnocení naměřených výsledků (z hlediska kvality povrchu kanálu vyrobeného metodami DMLS a ADAM), byl jako charakteristický parametr zvolen parametr amplitudový, konkrétně Rz (jak je ve vědecké praxi i průmyslu obvyklé) [14]. Při vlastním snímání a hodnocení povrchů jednotlivými metodami byla za účelem filtrace drsnosti a vlnitosti dle ČSN EN ISO 25178 [80] volena základní délka $l_r = 0,8$ mm. Opakovatelnost jednotlivých měření byla 50.



Obr. 4.14: Graf odhadu pravděpodobnostního pole výskytu parametru Rz (technologie DMLS)



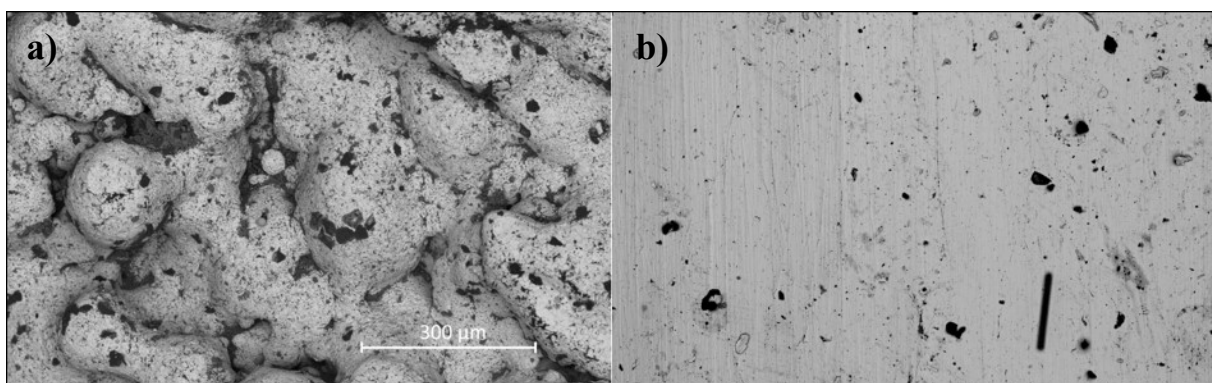
Obr. 4.15: Graf odhadu pravděpodobnostního pole výskytu parametru Rz (technologie ADAM)

Základní statistický průzkum naměřených dat dokazuje, že počet cyklů a typ aditivní výroby statisticky významně mění odhady směrodatných odchylek a středních hodnot parametru Rz.

Z výsledků měření je patrné, že vyšší efekt obrábění se projevil u technologie DMLS. To může být způsobeno rozdílným typem materiálu zkušebních těles, protože nástrojová ocel použita u technologie DMLS (1.2709) vykazuje nižší tvrdost, než nástrojová ocel využita při výrobě zkušebních těles metodou ADAM (1.2344).

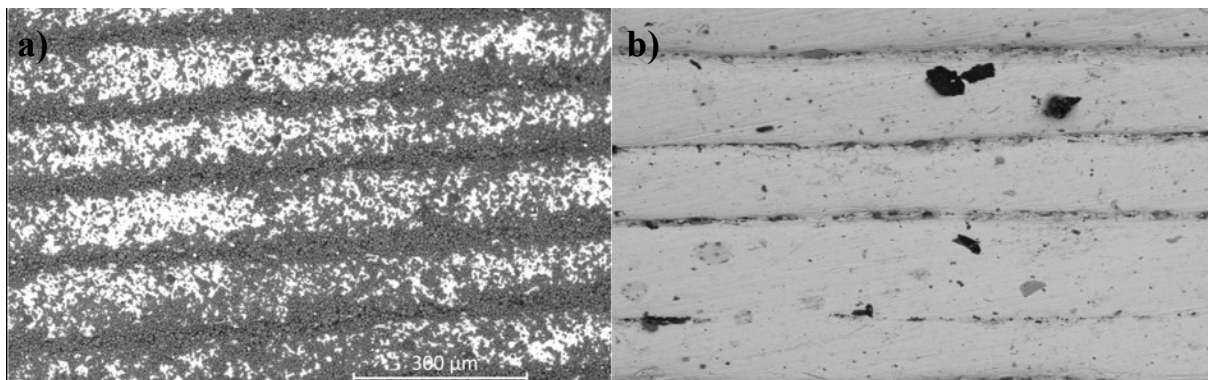
4.5.3 SEM analýza povrchu

Povrchy obrobených kanálů byly následně (po měření drsnosti) použity pro vytvoření SEM snímků. Měřítko ve všech snímcích je 300 µm a hodnota zvětšení je 500.



Obr. 4.16: Porovnání SEM snímků povrchu kanálu (technologie DMLS): a) neobrobený povrch kanálu, b) obrobený povrch kanálu, počet cyklů: 60

Na obrázku 4.16a je vidět povrch neobrobeného kanálu, na kterém jsou zjevné stopy natavování prášku, včetně zbytků neroztaveného prášku (což je typický povrch pro technologii DMLS). Na obrázku 4.16b je znázorněn povrch kanálu po 60 cyklech obrábění. Tato struktura již vykazuje známky povrchu dosažitelného konvenčním broušením.



*Obr. 4.17: Porovnání SEM snímků povrchu kanálu (technologie ADAM):
a) neobrobený povrch kanálu, b) obrobený povrch kanálu, počet cyklů: 60*

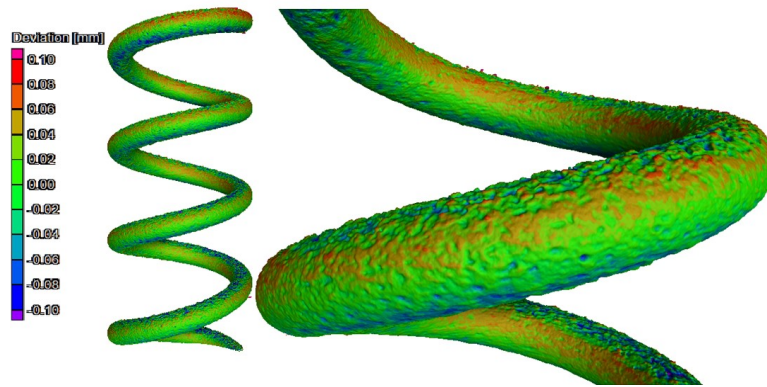
Na výše uvedeném obrázku (Obr. 4.17) jsou znázorněny SEM snímky povrchu kanálu vyrobeného technologií ADAM. Na obrázku 4.17a lze vidět neobrobený povrch, na kterém jsou patrné jednotlivé vrstvy tisku. Na obrázku 4.17b je znázorněn povrch kanálu po obrobení 60 cykly, na kterém jsou stopy po jednotlivých vrstvách výrazně menší (v porovnání s neobrobeným povrchem).

4.6 Alternativní způsob vyhodnocení efektivity obrábění (bez porušení studovaných objektů)

Jako alternativní způsob, pro vyhodnocení efektivity obrábění na konkrétních objektech (bez jejich porušení), je možné využít CT měření.

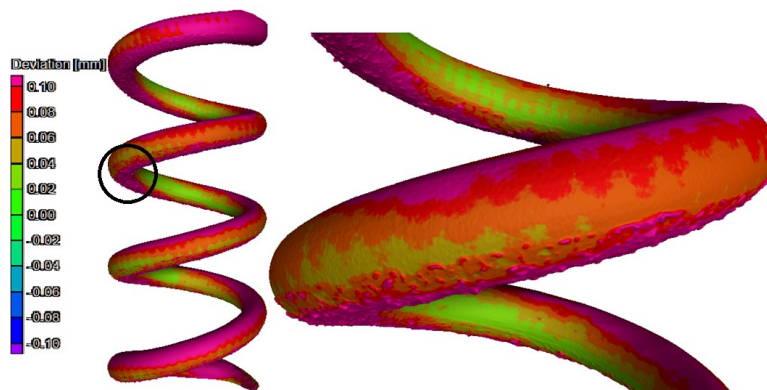
Tento způsob může být výhodný např. u reálných tvarových vložek vstřikovacích forem, protože pro ověření dosažených parametrů po obrábění není nutné jejich porušení.

Na základě řešení této problematiky byla navázána spolupráce se Středoevropským technologickým institutem (CEITEC) a s jejich pomocí byla jednotlivá měření na CT zařízení realizována.



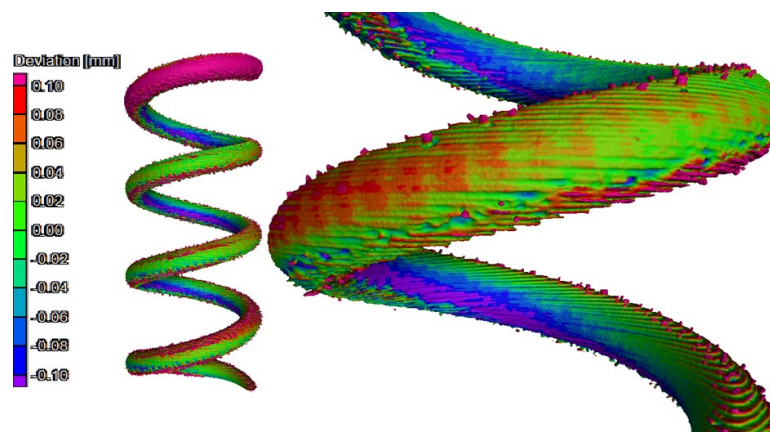
Obr. 4.18: Proložení CT skenu referenčním modelem
(technologie: DMLS, povrch: neobrobený)

Výše uvedený obrázek (Obr. 4.18) zobrazuje proložení CT dat referenčním modelem u neobrobeného kanálu vytvořeného technologií DMLS. Z výsledků je možné konstatovat, že struktura povrchu odpovídá dané technologii výroby a daný sken jeví známky hrubého povrchu.



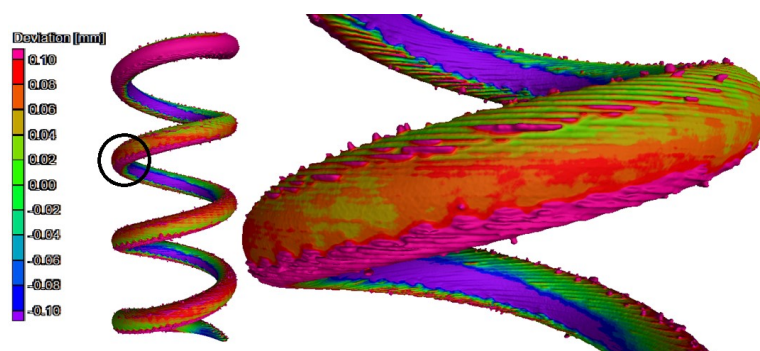
Obr. 4.19: Proložení CT skenu referenčním modelem
(technologie: DMLS, povrch: obrobený 60 cyklů)

Na obrázku výše (Obr. 4.19) je možné vidět interpretaci proložení CT dat vůči referenčnímu modelu u kanálu vyrobeném technologií DMLS a obrobeném 60 cyklů. Je patrné, že peaky viditelné na obrázku 4.18 jsou z velké části (v důsledku působení obráběcího média) vyhlazeny.



Obr. 4.20: Proložení CT skenu referenčním modelem (technologie: ADAM, povrch: neobrobený)

Obrázek výše (Obr. 4.20) zobrazuje proložení CT dat referenčním modelem u neobrobeného kanálu vytvořeného technologií ADAM. Z výsledků je možné konstatovat, že struktura povrchu odpovídá dané technologii výroby, která je typická výskytem tzv. schodišťového efektu.



Obr. 4.21: Proložení CT skenu referenčním modelem (technologie: ADAM, povrch: obrobený 60 cyklů)

Na obrázku 4.21 lze vidět proložení CT skenu referenčním modelem u zkušebního tělesa vyrobeného technologií ADAM, u kterého byly kanály obrobeny 60 cyklů. Lze si povšimnout, že na některých místech stěn kanálu došlo v důsledku obrobení téměř k odstranění vrstev vzniklých po tisku (oblasti označení červenou a fialovou barvou).

5. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Výzkum v této disertační práci byl zaměřen na studium vlivu drsnosti povrchu chladicích kanálů, vyrobených aditivními technologiemi DMLS a ADAM, na účinnost temperačních systémů vstřikovacích forem.

Prvotní měření drsnosti zkušebních těles ihned po výrobě (bez obrobení) ukázalo, že průměrná hodnota parametru Rz (u technologie DMLS) je 21 μm , zatímco u technologie ADAM 34 μm (Obr. 4.2 a 4.3). To naznačuje, že povrchy vyrobené technologií ADAM jsou obecně hrubší než v případě technologie DMLS, což může být způsobeno rozdílnými mechanismy tisku a charakteristikami materiálů používaných u této technologii, což potvrzují i studie autorů Han et al. [14], Galati et al. [35] a Babu et al. [36].

Pro možnou analýzu vlivu drsnosti povrchu kanálu na parametry temperačního systému byly testovány 3 simulační SW (Moldflow 23, Cadmould 17 a Moldex 3D). Moldflow 23 umožnil zahrnutí parametru drsnosti, avšak simulace byly omezené varováním SW o nevypovídajících výsledcích. Cadmould 17 neumožňoval zahrnutí drsnosti povrchu do výpočtů, což vedlo k nedostatečným výsledkům. Na základě těchto zjištění se jako nejvhodnější jevil SW Moldex 3D, který dokázal nejvhodněji zakomponovat parametr drsnosti do simulačního výpočtu a dosažené výsledky z těchto simulací byly nejrelevantnější (z hlediska popisu vlivu drsnosti kanálu na parametry temperace).

Výsledky simulací (za využití SW Moldex 3D) ukázaly, že se snižující drsností povrchu dochází k poklesu tlaku temperačního média, zatímco Reynoldsovo číslo a rychlost proudění temperačního média rostou (Tab. 4.2 a 4.3). Tento jev indikuje, že hladší povrchy kanálů mohou zlepšovat účinnost chlazení, protože nižší drsnost povrchu redukuje odpor proudění temperačního média. Získané výsledky jsou unikátní, protože u ostatních studií na obdobné téma [1-6] není problematika drsnosti temperačního kanálu vůbec diskutována.

Za účelem predikce vlivu drsnosti kanálu na jednotlivé parametry temperačního systému byly na základě výsledků získaných ze simulací nalezeny vhodné regresní modely, které byly následně podrobeny statistickým analýzám (především z hlediska jejich významnosti). Výsledky ukázaly, že modely mají vysokou míru korelace, což potvrzuje jejich spolehlivost při predikci chování temperačních systémů v závislosti na kvalitě povrchu. Nicméně je nutné brát v úvahu, že tyto modely mohou být ovlivněny omezeními simulačních nástrojů a neberou v potaz všechny možné variabilní faktory.

Na základě získaných dat bylo navrženo a následně vyrobeno zařízení pro dokončování ploch temperačních kanálů. Navržené zařízení pracuje na principu technologie AFM a je koncipováno jako univerzální, tzn. že je použitelné pro

obrábění nejen temperačních kanálu, ale i širokého spektra dalších objektů s rozdílnou geometrií. Konstrukce tohoto zařízení je jedinečná a oproti konstrukčnímu řešení v jiných studiích [14-18] se liší již v samotném konceptu, protože toto zařízení je plně elektrické (bez hydraulického pohonu). Po výrobě následovaly důkladné testy ověření funkčnosti navrženého zařízení a poté byla stanovena samotná metodika obráběcího procesu. Následovalo základní testování vlivu počtu obráběcích cyklů na povrchové vlastnosti kanálu. Z naměřených výsledků bylo zjištěno, že dokončovací proces není vždy stejnoměrný, což může vést k vyšší lokální drsnosti v určitých částech kanálů. Kritická místa, kde dochází k nerovnoměrnému obrobení, byla identifikována a analyzována pomocí CT skenů a optického profilometru. Dále byl zjištěn poznatek, že vyšší rychlost protlačování obráběcího média může pozitivně ovlivnit rovnoměrnost obrábění, ale současně může vést k úniku média, což je problém, na který bude zaměřen další výzkum navazující na tuto disertační práci.

Destruktivní měření povrchových vlastností po různém počtu cyklů (20, 40, a 60) ukázalo, že s vyšším počtem cyklů se parametr drsnosti povrchu výrazně snižuje. Výsledky u technologie DMLS ukázaly, že po 60 cyklech bylo dosaženo průměrné hodnoty parametru $R_z = 4,5 \mu\text{m}$, což představuje snížení o téměř 79 % při srovnání s neobrobeným povrchem. Pro technologii ADAM bylo po 60 cyklech dosaženo průměrně hodnoty parametru drsnosti $R_z = 19,5 \mu\text{m}$, což rovněž potvrzuje významný pokles (v porovnání s neobrobeným povrchem o 43 %), i když ne tak výrazný jako u DMLS. Tato získaná data byla dále statisticky prozkoumána. Použitá metodika EDA (Exploratory Data Analysis) s konfidenční úrovní 95 % a testy normality metodou Anderson-Darlingové umožnily detailní průzkum dat. Normalita parametru R_z nebyla zamítnuta pro většinu cyklů, což naznačuje, že většina dat sledovaných parametrů odpovídá normálnímu rozdělení. Tento přístup poskytuje robustní základ pro interpretaci výsledků a validaci zjištění.

U technologie DMLS bylo zaznamenáno významné snížení parametru drsnosti R_z v závislosti na počtu dokončovacích cyklů. Po 20 cyklech byla hodnota R_z $10,3 \pm 3 \mu\text{m}$, po 40 cyklech $7,2 \pm 1,7 \mu\text{m}$ a po 60 cyklech $4,5 \pm 0,6 \mu\text{m}$. Tento pokles parametru drsnosti potvrzuje, že zvýšený počet dokončovacích cyklů vede k menším drsnostem povrchů. Statistická významnost těchto změn byla potvrzena, což podporuje hypotézu, že zvýšení počtu obráběcích cyklů přímo ovlivňuje kvalitu povrchu.

Technologie ADAM vykázala vyšší počáteční hodnoty parametru R_z ve srovnání s technologií DMLS. Po 20 cyklech byla hodnota R_z $36,9 \pm 2,5 \mu\text{m}$, po 40 cyklech $29,6 \pm 2,1 \mu\text{m}$ a po 60 cyklech $19,5 \pm 1,3 \mu\text{m}$. Zjištěný trend poklesu parametru drsnosti s rostoucím počtem cyklů je obdobný, jako v případě technologie DMLS, nicméně absolutní hodnoty zůstaly vyšší. To naznačuje, že

povrchy vyrobené technologií ADAM vyžadují intenzivnější nebo delší dokončovací procesy (k dosažení srovnatelné kvality povrchu), což může být způsobeno jak specifikem konkrétní technologie výroby, tak i odlišnou tvrdostí použitého materiálu. Výsledky získané měřením povrchových vlastností (po obrobení metodou AFM) korespondují i se zjištěními autorů Han et al.[14] a Kumar et al. [17].

Konfidenční intervaly středních hodnot drsnosti u použitých technologií ukázaly, že se pro jednotlivé cykly výrazně překrývají, což podporuje statistickou významnost poklesu drsnosti s rostoucím počtem cyklů. Test rovnosti středních hodnot pro jednotlivé cykly zamítl nulovou hypotézu, což potvrzuje statisticky významné rozdíly mezi cykly a podporuje závěr, že zvyšování počtu obráběcích cyklů vede ke zlepšení povrchové kvality z hlediska parametru Rz.

Ze získaných výsledků lze konstatovat, že navržené zařízení je efektivním nástrojem pro zvýšení kvality povrchů kanálu konformního chlazení, což má pozitivní dopad na účinnost chladicích systémů ve vstřikovacích formách.

Alternativní způsob vyhodnocení efektivity obrábění (za využití nedestruktivního CT měření) potvrdil trend, který byl zaznamenán i klasickým měřením při použití profilometru. Tento trend naznačuje, že navržené zařízení, pracující na principu metody AFM, efektivně redukuje drsnost povrchu. Nicméně stejně jako v případě destruktivní metody, také CT měření odhalilo, že v některých částech kanálů může dojít k nerovnoměrnému úběru materiálu, což může být způsobeno rozdílným tlakem působícím na různé části kanálu během protlačování média. Problematika nestejněmého dokončování bude jedním z dalších směrů, kterým se bude výzkum v této oblasti dále ubírat, protože v současné době neexistují žádné studie, která by tento problém hlouběji řešila.

Výsledky této práce mají obecně významný dopad na možnosti dokončení vnitřních ploch vytvořených aditivními technologiemi v různých odvětvích průmyslu, zejména pak na zlepšení efektivity temperace vstřikovacích forem. Nižší drsnost povrchu chladicích kanálů přináší zlepšení proudění temperačního média, což vede k rovnoměrnějšímu a rychlejšímu chlazení vstřikovaných výrobků. Tento výzkum poskytuje důležité poznatky pro výrobní praxi a může být využit při návrhu a výrobě vstřikovacích forem s použitím aditivních technologií.

6. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Tato disertační práce přináší významné přínosy pro vědu a praxi v oblasti aditivních technologií a výroby vstřikovacích forem. Výsledky výzkumu ukazují, že povrchové vlastnosti u chladicích kanálů konformního chlazení mají přímý vliv na účinnost chladicích systémů. Tato zjištění rozšiřují vědecké poznání a nabízejí možná řešení pro zlepšení kvality a efektivity výrobních procesů.

Z vědeckého hlediska tato práce přispívá k hlubšímu poznání problematiky související s obráběcím procesem u povrchů, které nelze obrábět konvenčními metodami. Analýza povrchů vyrobených rozdílnými technologiemi aditivní výroby (DMLS a ADAM) odhalila odlišnosti v dosažených povrchových vlastnostech (drsnost povrchu, topologie aj.), které mohou být pravděpodobně způsobeny rozdílnými mechanismy tisku a materiálovými vlastnostmi. Tyto poznatky poskytují cenné informace, které mohou pomoci k dalšímu vývoji v oblasti aditivní výroby, především z hlediska výběru vhodné technologie pro specifické aplikace.

Práce také popisuje využitelnost metody AFM za účelem snížení drsnosti vnitřních povrchů. Výsledky ukazují, že metoda AFM je účinná pro dosažení povrchů s požadovanou drsností, což může přispět ke splnění vysokých nároků na chladicí kanály. Tato zjištění jsou významná pro vědeckou komunitu, neboť přinášejí nové poznatky o možnostech zlepšení kvality povrchů u aditivně vyrobených komponentů. Metoda AFM a její aplikace v kontextu aditivní výroby představují důležitý směr pro další výzkum, zejména s ohledem na možnosti zdokonalení a inovace v oblasti dokončovacích operací.

Z praktického hlediska má práce několik přínosů pro průmysl, hlavně pro výrobu vstřikovacích forem. Nižší drsnost povrchu chladicích kanálů vede k lepšímu proudění a nižším tlakům temperačního média v kanálech, což přispívá k nižším nárokům na temperační jednotky. Vyšší kvalita těchto povrchů může také přispět k vyšší jakosti konečných produktů. Použití temperačních kanálů konformního chlazení společně se zvýšením kvality jejich povrchů může vést ke snížení výskytu defektů způsobených nerovnoměrným chlazením a také např. zkrátit dobu vstřikovacího cyklu. Průmyslové podniky mohou díky tomu dosáhnout vyšší efektivity a konkurenceschopnosti na trhu.

Výsledky této práce mohou být aplikovány nejen v automobilovém průmyslu, ale také v dalších odvětvích, jako je letectví a obranný průmysl. Aditivní technologie výroby umožňují vytvářet komplexní geometrie chladicích kanálů, které by jinak nebyly realizovatelné tradičními metodami.

Celkově tato disertační práce poskytuje pevný základ pro další výzkum v oblasti aditivní výroby a povrchových úprav. Navržené zařízení pro dokončování

vnitřních ploch kanálů a samotná metodologie společně se získanými výsledky mohou být využity jako referenční bod pro budoucí studie zaměřené na další zkoumání vlivu obráběcích parametrů na dosažené povrchové vlastnosti a jejich vliv na konkrétní aplikace. Dále mohou sloužit jako podklad pro vývoj nových dokončovacích metod a obráběcích médií, díky nimž by bylo možné řízeně měnit povrchové vlastnosti vnitřních ploch u aditivně vyrobených komponentů a vytvořit tak povrchy přímo na míru konkrétní aplikaci. Získané poznatky lze navíc aplikovat na širší škálu materiálů a geometrií, čímž se rozšiřují možnosti využití aditivních technologií ve výrobě.

Disertační práce přináší důležité poznatky, které mohou posunout celý obor kupředu. Výsledky výzkumu přispívají k lepšímu porozumění komplexním procesům spojeným s výrobou a dokončováním aditivních komponent, což má potenciál otevřít nové možnosti pro inovace v oblasti aditivní výroby a návrhu vstřikovacích forem. Tato práce tedy nejen obohacuje vědecké poznání, ale také poskytuje praktické nástroje a postupy pro zlepšení efektivity a kvality výrobních procesů v různých průmyslových odvětvích.

Stěžejní přínosy této práce lze shrnout v následujících bodech:

- Výzkum rozšiřuje vědecké poznání v oblasti dokončování konvenčně neobrobitelných povrchů a poskytuje praktické aplikace pro zlepšení kvality výrobních procesů.
- Analýza technologií DMLS a ADAM odhalila rozdíly v drsnosti povrchu způsobené různými mechanismy tisku a materiálovými vlastnostmi, což poskytuje cenné informace pro další výzkum a vývoj.
- Navržené zařízení (pracující na principu technologie AFM) se ukázalo jako účinný nástroj pro snižování drsnosti povrchů a zlepšení jejich celkové kvality, což může přispět ke zvýšení výsledné efektivity temperačních systémů. Toto zařízení je navíc koncipováno jako univerzální a je možné ho tedy použít pro širokou škálu objektů.
- Nižší drsnost povrchu chladicích kanálů vede k lepšímu proudění temperačního média a také k menším tlakovým požadavkům při realizaci temperace.
- Výsledky mohou být aplikovány v automobilovém, leteckém a obranném průmyslu, kde aditivní technologie umožňují vytvářet složité geometrie.

- Práce poskytuje základ pro další výzkum aditivní výroby a povrchových úprav, navrhuje metodologie a poskytuje výsledky využitelné pro budoucí studie a vývoj nových obráběcích metod.
- Výsledky mohou být aplikovány na širší škálu materiálů a geometrií, což rozšiřuje možnosti využití aditivních technologií ve výrobě.

7. ZÁVĚR

Tato disertační práce se zabývala výzkumem v oblastech využití aditivních technologií (DMLS a ADAM) v procesu vstřikování termoplastů, konkrétně vlivem drsnosti povrchů chladičích kanálů na parametry temperace vstřikovacích forem a také možnostmi dokončování těchto ploch za využití navrženého zařízení pracující na principu technologie AFM. Bylo zjištěno, že drsnost povrchu těchto kanálů významně ovlivňuje účinnost chladičích systémů. Tento výzkum přinesl nové poznatky jak pro vědeckou komunitu, tak i pro průmyslovou praxi.

Analýza odhalila, že technologie ADAM vykazuje vyšší počáteční hodnoty parametru drsnosti Rz než technologie DMLS, což je způsobeno rozdílnými mechanismy tisku a materiálovými vlastnostmi. Navržené zařízení je účinným nástrojem pro snižování drsnosti povrchu u obou technologií, přičemž nejvýraznější pokles drsnosti byl zaznamenán u technologie DMLS. Tento pokles byl statisticky významný, což potvrdilo hypotézu o vlivu počtu obráběcích cyklů na kvalitu povrchu. Z tohoto pohledu lze navržené zařízení označit za efektivní nástroj pro řízenou úpravu povrchových vlastností kanálů u tištěných objektů.

Statistická analýza dat zahrnovala konfidenční intervaly a testy normality, které ukázaly, že většina naměřených dat odpovídá normálnímu rozdělení. Konfidenční intervaly pro střední hodnoty drsnosti prokázaly statistickou významnost poklesu drsnosti s rostoucím počtem cyklů.

Výsledky této práce lze aplikovat nejen v automobilovém průmyslu, ale i v letectví a obraně, kde aditivní technologie umožňují vytvářet komplexní geometrie, jinak nerealizovatelné tradičními metodami. Díky analýze vlivu drsnosti povrchu na efektivitu temperačních systémů je možné navrhovat efektivnější vstřikovací formy již ve fázi designu, což vede k lepšímu plánování a snižování nákladů na úpravy forem.

Celkově tato disertační práce poskytla pevný základ pro další výzkum v oblasti aditivní výroby a povrchových úprav. Získané výsledky mohou sloužit jako referenční bod pro budoucí studie a vývoj nových dokončovacích metod a obráběcích médií, díky kterým lze docílit povrchů konkrétních vlastností pro velmi specifické aplikace.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] G. Venkatesh, Y. Ravi Kumar, G. Raghavendra, Comparison of Straight Line to Conformal Cooling Channel in Injection Molding, *Materials Today: Proceedings*, Volume 4, Issue 2, Part A, 2017, Pages 1167-1173, ISSN 2214-7853.

[2] S. S. Deepika, B. T. Patil and V. A. Shaikh, Plastic injection molded door handle cooling time reduction investigation using conformal Cooling channels, *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.316>

[3] JAHAN, Suchana A. a Hazim EL-MOUNAYRI, 2016. Optimal Conformal Cooling Channels in 3D Printed Dies for Plastic Injection Molding. *Procedia Manufacturing* [online]. 5, 888-900 [cit. 2023-06-28]. ISSN 23519789. Dostupné z: [doi:10.1016/j.promfg.2016.08.076](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.076)

[4] DIMLA, Eric et al., 2018. Thermal Comparison of Conventional and Conformal Cooling Channel Designs for a Non-Constant Thickness Screw Cap. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering* [online]. 35(1), 95-101 [cit. 2023-06-28]. ISSN 1225-9071. Dostupné z: [doi:10.7736/KSPE.2018.35.1.95](https://doi.org/10.7736/KSPE.2018.35.1.95)

[5] PARK, Hong-Seok et al., 2020. Design of Advanced Injection Mold to Increase Cooling Efficiency. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* [online]. 7(2), 319-328 [cit. 2023-06-28]. ISSN 2288-6206. Dostupné z: [doi:10.1007/s40684-019-00041-4](https://doi.org/10.1007/s40684-019-00041-4)

[6] SHEN, Suping et al., 2020. Thermal and mechanical analysis for conformal cooling channel in plastic injection molding. *Materials Today: Proceedings* [online]. 28, 396-401 [cit. 2023-06-28]. ISSN 22147853. Dostupné z: [doi:10.1016/j.matpr.2019.10.020](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.020)

[7] KUO, Chil-Chyuan et al., 2020. Characterization of a direct metal printed injection mold with different conformal cooling channels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 107(3-4), 1223-1238 [cit. 2023-06-28]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: [doi:10.1007/s00170-020-05114-2](https://doi.org/10.1007/s00170-020-05114-2)

[8] SIMIYU, Laura W. et al. Optimization of polygonal cross-sectioned conformal cooling channels in injection molding. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* [online]. [cit. 2023-06-28]. ISSN 1955-2513. Dostupné z: [doi:10.1007/s12008-023-01226-7](https://doi.org/10.1007/s12008-023-01226-7)

[9] JAHAN, Suchana a Hazim EL-MOUNAYRI, 2018. A Thermomechanical Analysis of Conformal Cooling Channels in 3D Printed Plastic Injection Molds.

Applied Sciences [online]. 8(12) [cit. 2023-06-28]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app8122567

[10] ABBÈS, Boussad et al., 2019. Finite element cooling simulations of conformal cooling hybrid injection molding tools manufactured by selective laser melting. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 103(5-8), 2515-2522 [cit. 2023-06-28]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-019-03721-2

[11] HAN, Sangil et al., 2020. Effect of abrasive flow machining (AFM) finish of selective laser melting (SLM) internal channels on fatigue performance. Journal of Manufacturing Processes [online]. 59, 248-257 [cit. 2023-07-03]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2020.09.065

[12] GÜNTHER, Johannes et al., 2018. On the effect of internal channels and surface roughness on the high-cycle fatigue performance of Ti-6Al-4V processed by SLM. Materials & Design [online]. 143, 1-11 [cit. 2023-07-03]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2018.01.042

[13] DUMAS, M. et al., 2018. Influence of the finish cutting operations on the fatigue performance of Ti-6Al-4V parts produced by Selective Laser Melting. Procedia CIRP [online]. 71, 429-434 [cit. 2023-07-03]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2018.05.054

[14] HAN, Sangil et al., 2020. Abrasive flow machining (AFM) finishing of conformal cooling channels created by selective laser melting (SLM). Precision Engineering [online]. 64, 20-33 [cit. 2023-07-03]. ISSN 01416359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2020.03.006

[15] CHAWLA, Gagandeep, Vinod Kumar MITTAL a Sushil MITTAL, 2019. Design and development of fixture and modification of existing AFM setup to magnetic abrasive flow machining (MAFM) process setup. Journal of Physics: Conference Series [online]. 1240(1) [cit. 2023-07-03]. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1240/1/012009

[16] FRANÇOIS, Mathieu et al., 2021. Electromagnetic performance of Ti6Al4V and AlSi7Mg0.6 waveguides with laser beam melting (LBM) produced and abrasive flow machining (AFM) finished internal surfaces. Journal of Electromagnetic Waves and Applications [online]. 35(18), 2510-2526 [cit. 2023-07-03]. ISSN 0920-5071. Dostupné z: doi:10.1080/09205071.2021.1954554

[17] KUMAR, Raman et al., 2022. Hand and Abrasive Flow Polished Tungsten Carbide Die: Optimization of Surface Roughness, Polishing Time and Comparative Analysis in Wire Drawing. Materials [online]. 15(4) [cit. 2023-07-03]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma15041287

[18] UHLMANN, Eckart a Simon ROSSKAMP, 2018. Modelling of Material Removal in Abrasive Flow Machining. *International Journal of Automation Technology* [online]. 12(6), 883-891 [cit. 2023-07-03]. ISSN 1883-8022. Dostupné z: doi:10.20965/ijat.2018.p0883

[19] UHLMANN, E., M. DOITS a C. SCHMIEDEL, 2013. Development of a Material Model for Visco-elastic Abrasive Medium in Abrasive Flow Machining. *Procedia CIRP* [online]. 8, 351-356 [cit. 2023-07-03]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2013.06.115

[20] SEYEDI, Seyed Shahin et al., 2021. The impact of SiC, Al₂O₃, and B₂O₃ abrasive particles and temperature on wear characteristics of 18Ni (300) maraging steel in abrasive flow machining (AFM). *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 46(68), 33991-34001 [cit. 2023-07-03]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2021.04.051

[21] GUPTA, Gopal A. et al., 2021. Rheological characterization of newly developed fly-ash mixed polymeric media and its finishing performance through abrasive flow machining. *Cleaner Engineering and Technology* [online]. 2 [cit. 2023-07-03]. ISSN 26667908. Dostupné z: doi:10.1016/j.clet.2021.100085

[22] ZHANG, Baocai et al., 2022. Study on rheological behaviors of media and material removal mechanism for abrasive flow machining (AFM) micro structures and corresponding simulations. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 73, 248-259 [cit. 2023-07-03]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2021.11.006

[23] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů – teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, a.s., 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.

[24] BOBEK, Jiří V.: *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů*. Brno: Code Creator, s.r.o., 2015. ISBN 978-80-88058-65-6.

[25] OSSWALD, T. A., E. BAUR a N. RUDOLPH. *Plastics handbook: the resource for plastics engineers*. 5th edition. Mnichov: Hanser Publisher, 2019, 680 s. ISBN 978-1- 56990-559-3.

[26] *Spritzgießwerkzeug – Aufbau und Funktion: Die Maschinenbau-Community*. *Maschinenbau-Wissen* [online]. [cit. 2023-07-11]. Dostupné z: <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/>.

[27] STANĚK, Michal, 2017. *Vliv technologických parametrů na zatékavost polymerů*. Zlín. Habilitační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.

[28] Chlazení forem aplikací konformního chlazení. PlasticPortal [online]. Innomia, 2010 [cit. 2023-07-11]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/chlazeniforem-aplikaci-konformniho-chlazenih.html/c/260/>.

[29] MEUSBURGER [online]. [cit. 2023-07-11]. Dostupný z: <https://ecom.meusbur-ger.com/files/pdf/e/e2100.pdf>

[30] KRAHN, H., EH, D. a VOGEL, H. 1000 Konstruktionsbeispiele für den Werkzeug und Formenbau beim Spritzgießen. Mnichov: Hanser Publishers, 2015, 556 s. ISBN 978-3446412443

[31] A. Paolini, S. Kollmannsberger, E. Rank, Additive manufacturing in construction: a review on processes, applications, and digital planning methods, Addit. Manuf. 30 (2019) 100894.

[32] GOYAL, Aneesh et al., 2022. Recent advancements in abrasive flow machining and abrasive materials: A review. Materials Today: Proceedings [online]. 56, 3065-3072 [cit. 2023-07-12]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.12.109.

[33] CHEEMA, Manjot S et al., 2012. Developments in abrasive flow machining: a review on experimental investigations using abrasive flow machining variants and media. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture [online]. 226(12), 1951-1962 [cit. 2023-07-12]. ISSN 0954-4054. Dostupné z: doi:10.1177/0954405412462000.

[34] WANG, A.C. a S.H. WENG, 2007. Developing the polymer abrasive gels in AFM processs. Journal of Materials Processing Technology [online]. 192-193, 486-490 [cit. 2023-07-12]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.04.082.

[35] GALATI, Manuela a Paolo MINETOLA, 2019. Analysis of Density, Roughness, and Accuracy of the Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) Process for Metal Parts. Materials [online]. 12(24) [cit. 2023-08-04]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma12244122.

[36] PHANI BABU, V.Venkata a Veeresh Kumar GB, 2022. A review on 3D printing process on metals and their surface roughness and dimensional accuracy. Materials Today: Proceedings [online]. 64, 523-530 [cit. 2023-08-04]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2022.05.018

[37] BOBČÍK, Ladislav. Formy pro zpracování plastů II. díl - Vstřikování termoplastů. Brno: UNIPLAST Brno, 1999.

[38] Příručka - Formy pro zpracování plastů: II. díl - Vstřikování termoplastů. 1. vydání. Brno: [s.n.], 1999. 212 s.

[39] TIMKO, Pavol et al., 2023. Surface Analysis and Digitization of Components Manufactured by SLM and ADAM Additive Technologies. *Manufacturing Technology* [online]. 23(1), 127-134 [cit. 2023-08-07]. ISSN 12132489. Dostupné z: doi:10.21062/mft.2023.008.

[40] A Brief History of Additive Manufacturing. TRIMECH [online]. [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://trimech.com/blog/a-brief-history-of-additive-manufacturing>.

[41] Support-free: Six experts discuss business impact of support-less metal 3D printing. In: TCT Magazine [online]. [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/support-free-6-experts-business-impact-metal-3d-printing/>.

[42] Types of 3D printing in metal. Markforged [online]. 2020 [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-metals/metal-additive-manufacturing-introduction/types-of-3d-printing-metal>.

[43] K. V. Wong, A. Hernandez, A review of additive manufacturing, *ISRN Mech. Eng.*(2012) 1–10.

[44] A. Paolini, S. Kollmannsberger, E. Rank, Additive manufacturing in construction: a review on processes, applications, and digital planning methods, *Addit. Manuf.* 30(2019) 100894.

[45] Kovový 3D tisk. Materialise [online]. [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/3d-tisk-kovu>.

[46] Začínáme s 3D tiskem kovů #2. Konstrukter [online]. 2016 [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>.

[47] ABRASIVE FLOW MACHINING / EXTRUDE HONING AFM. EXTRUDE HONE [online]. [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://extrudehone.com/products/abrasive-flow-machining-afm/>.

[48] BORDÓN, Pablo, Rubén PAZ a Mario D. MONZÓN, 2022. Evaluation of the Performance of Atomic Diffusion Additive Manufacturing Electrodes in Electrical Discharge Machining. *Materials* [online]. 15(17) [cit. 2023-08-13]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma15175953.

[49] LAVECCHIA, Fulvio, Alessandro PELLEGRINI a Luigi Maria GALANTUCCI, 2022. Comparative study on the properties of 17-4 PH stainless steel parts made by metal fused filament fabrication process and atomic diffusion additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 29(2), 393-407 [cit. 2023-08-13]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-12-2021-0350.

[50] SIMIYU, Laura W. et al. Optimization of polygonal cross-sectioned conformal cooling channels in injection molding. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* [online]. [cit. 2023-08-13]. ISSN 1955-2513. Dostupné z: doi:10.1007/s12008-023-01226-7.

[51] HANAN, Jay C., 2013. Birefringent Residual Stress and Improved Injection Mold Design. *Materials Science Forum* [online]. 768-769, 217-223 [cit. 2023-08-13]. ISSN 1662-9752. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.768-769.217.

[52] TORRES-ALBA, Abelardo et al., 2023. Application of New Conformal Cooling Layouts to the Green Injection Molding of Complex Slender Polymeric Parts with High Dimensional Specifications. *Polymers* [online]. 15(3) [cit. 2023-08-13]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym15030558.

[53] BARAIYA, Rajendra, 2016. Abrasive Flow Machining: An Area Seeking for Improvement. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* [online]. 03(03), 01-09 [cit. 2024-05-10]. ISSN 2320334X. Dostupné z: doi:10.9790/1684-15010030301-09.

[54] SAMBHARIA, Jai Kishan, Harlal Singh MALI a Vishal GARG, 2017. Experimental investigation on unidirectional abrasive flow machining of trim die workpiece. *Materials and Manufacturing Processes* [online]. 33(6), 651-660 [cit. 2024-05-10]. ISSN 1042-6914. Dostupné z: doi:10.1080/10426914.2017.1364847.

[55] WANG, Haiquan a Hang GAO, 2024. Influence of wall-slip on material removal in abrasive flow machining. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 262 [cit. 2024-05-10]. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2023.108727.

[56] MANGESH, Gharat Saurabh a Aviral MISRA, 2022. Finite element analysis of viscoelastic media used in abrasive flow machining process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 1248(1) [cit. 2024-05-10]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/1248/1/012005.

[57] HASHMI, ABDUL WAHAB et al., 2023. ABRASIVE FLOW FINISHING OF FDM PRINTED EXTRUSION DIE INSERT PATTERN

USING NOVEL AFM FIXTURE WITH MANDREL GUIDE. *Surface Review and Letters* [online]. 30(06) [cit. 2024-05-10]. ISSN 0218-625X. Dostupné z: doi:10.1142/S0218625X23500348.

[58] GUPTA, Gopal A. et al., 2021. Rheological characterization of newly developed fly-ash mixed polymeric media and its finishing performance through abrasive flow machining. *Cleaner Engineering and Technology* [online]. 2 [cit. 2024-05-10]. ISSN 26667908. Dostupné z: doi:10.1016/j.clet.2021.100085.

[59] ŘEHULKA, Z. Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů: polymery. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 230 s. ISBN 9788072048335.

[60] CATOEN, B. a H. REES. Injection mold design handbook. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2021, 786 s. ISBN 978-1-56990-815-0.

[61] LEINVEBER, J., VÁVRA, P. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. Albra, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.

[62] HENSLEY, C. et al., 2021. Qualification pathways for additively manufactured components for nuclear applications. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 548 [cit. 2024-05-16]. ISSN 00223115. Dostupné z: doi:10.1016/j.jnucmat.2021.152846.

[63] SUN, Cheng et al., 2021. Additive manufacturing for energy: A review. *Applied Energy* [online]. 282 [cit. 2024-05-16]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2020.116041.

[64] KHAIRALLAH, Saad A. et al., 2016. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. *Acta Materialia* [online]. 108, 36-45 [cit. 2024-05-16]. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2016.02.014.

[65] BRENNAN, M. C., J. S. KEIST a T. A. PALMER, 2021. Defects in Metal Additive Manufacturing Processes. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 30(7), 4808-4818 [cit. 2024-05-16]. ISSN 1059-9495. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-021-05919-6

[66] TAMMAS-WILLIAMS, S. et al., 2017. The Influence of Porosity on Fatigue Crack Initiation in Additively Manufactured Titanium Components. *Scientific Reports* [online]. 7(1) [cit. 2024-05-16]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-017-06504-5.

[67] SANGID, Michael D. et al., 2020. ICME Approach to Determining Critical Pore Size of IN718 Produced by Selective Laser Melting. *JOM* [online].

72(1), 465-474 [cit. 2024-05-16]. ISSN 1047-4838. Dostupné z: doi:10.1007/s11837-019-03910-0.

[68] SCOTT, Sarah, Wei-Ying CHEN a Alexander HEIFETZ, 2023. Multi-Task Learning of Scanning Electron Microscopy and Synthetic Thermal Tomography Images for Detection of Defects in Additively Manufactured Metals. Sensors [online]. 23(20) [cit. 2024-05-16]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s23208462.

[69] HANZLIK, Jan; VANEK, Jiri; PATA, Vladimir; SENKERIK, Vojtech; POLASKOVA, Martina et al., 2024. The Impact of Surface Roughness on Conformal Cooling Channels for Injection Molding. Online. Materials. Roč. 17, č. 11. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma17112477>. [cit. 2024-06-25].

[70] HANZLIK, Jan; VANEK, Jiri; KOTLANOVA, Barbora; KOCAK, Michal; OVSIK, Martin et al., 2024. AFM-Based Machine Design For Finishing Injection Molding Tools. Online. MM Science Journal. 2024-06-03, roč. 2024, č. 3. ISSN 18031269. Dostupné z: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2024_06_2024015. [cit. 2024-06-25].

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 4.1: Zkušební tělesa: a) technologie ADAM (materiál 1.2344), b) technologie DMLS (materiál 1.2709).....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 4.2: Projekce naměřených dat povrchu zkušebního tělesa (technologie: DMLS , povrch: neobrobený) [69].....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 4.3: Projekce naměřených dat povrchu zkušebního tělesa (technologie: ADAM , povrch: neobrobený [69]</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 4.4: SEM snímek povrchu zkušebního vzorku (technologie DMLS): a) přiblížení 500x, b) detail (přiblížení 1500x) [69]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 4.5: SEM snímek povrchu zkušebního vzorku (technologie ADAM): a) přiblížení 500x, b) detail (přiblížení 1500x) [69]</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 4.6: Schéma sestavy navrženého zařízení [70]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 4.7: Vyrobené a zkompletované zařízení.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 4.8: Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního vzorku (technologie: DMLS, počet cyklů: 20)</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 4.9: Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního tělesa (technologie: DMLS, počet cyklů: 40)</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4.10: Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního tělesa (technologie: DMLS, počet cyklů: 60)</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4.11: Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního tělesa (technologie: ADAM, počet cyklů: 20)</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 4.12: Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního tělesa (technologie: ADAM, počet cyklů: 40)</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 4.13: Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního tělesa (technologie: ADAM, počet cyklů: 60)</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 4.14: Graf odhadu pravděpodobnostního pole výskytu parametru Rz (technologie DMLS)</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 4.15: Graf odhadu pravděpodobnostního pole výskytu parametru Rz (technologie ADAM).....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 4.16: Porovnání SEM snímků povrchu kanálu (technologie DMLS): a) neobrobený povrch kanálu, b) obrobený povrch kanálu, počet cyklů: 60.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 4.17: Porovnání SEM snímků povrchu kanálu (technologie ADAM): a) neobrobený povrch kanálu, b) obrobený povrch kanálu, počet cyklů: 60.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4.18: Proložení CT skenu referenčním modelem (technologie: DMLS, povrch: neobrobený).....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 4.19: Proložení CT skenu referenčním modelem (technologie: DMLS, povrch: obrobený 60 cykly).....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 4.20: Proložení CT skenu referenčním modelem (technologie: ADAM, povrch: neobrobený).....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 4.21: Proložení CT skenu referenčním modelem (technologie: ADAM, povrch: obrobený 60 cykly).....</i>	<i>29</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 4.1: Hodnoty transformovaných aritmetických průměrů parametru Rz (neobrobený povrch kanálů)</i>	<i>16</i>
<i>Tabulka 4.2: Shrnutí výsledků analýz pro technologii DMLS [69]</i>	<i>19</i>
<i>Tabulka 4.3: Shrnutí výsledků analýz pro technologii ADAM [69]</i>	<i>20</i>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

°C	stupeň Celsia
mm	milimetr
s	sekunda
kPa	kilopaskal
MPa	megapaskal
kV	kilo volt
W	watt
\dot{Q}_P	Tepelný tok mezi plastem a formou [W]
\dot{Q}_h	Tepelný tok mezi blokem vtokového systému [W]
\dot{Q}_{tm}	Tepelný tok mezi formou a temperačním systémem [W]
\dot{Q}_k	Tepelný tok předaný do okolí prouděním (konvekce) [W]
\dot{Q}_v	Tepelný tok předaný do okolí vedením (kondukce) [W]
\dot{Q}_s	Tepelný tok předaný do okolí zářením (radiace) [W]
\dot{Q}_o	Celkový tepelný tok předaný do okolí [W]
GIT	Gass-Injection Technology
WIT	Water-Injection Technology
CT	Computer tomography
AFM	Abrasive flow machining
ADAM	Atomic diffusion additive manufacturing
DMLS	Direct metal laser sintering
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
B ₄ C	Karbid boru
SiC	Karbid křemíku
SEM	Scanning electron microscopy
TGA	Termogravimetrická analýza

CAE	Computer aided engineering
EDAX	Energy dispersive x-ray analysis
CCA	Přibližně

PUBLIKAČNÍ ČINNOST

Kvalifikační práce

1. **HANZLÍK, Jan**, 2018. Měření vlastností povlaků vytvořených PA-CVD technologií. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 76 s. (66 903 znaků). Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/42389>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Ovsík, Martin.
2. **HANZLÍK, Jan**, 2020. Pevnostní návrh leteckých konstrukcí. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 157 s. (138 056 znaků). Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/48747>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Bednařík, Martin.

Publikace Web of Science

1. **HANZLIK, Jan**, Jiri VANEK, Barbora KOTLANOVA, Michal KOCAK, Martin OVSIK a Martin BEDNARIK, 2024. AFM-Based Machine Design For Finishing Injection Molding Tools. MM Science Journal [online]. 2024-06-03, 2024(3) [cit. 2024-06-26]. ISSN 18031269. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2024_06_2024015.
2. **HANZLIK, Jan**, Jiri VANEK, Vladimír PATA, Vojtěch SENKERIK, Martina POLASKOVA, Jan KRUZELAK a Martin BEDNARIK, 2024. The Impact of Surface Roughness on Conformal Cooling Channels for Injection Molding. Materials [online]. 17(11) [cit. 2024-06-26]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma17112477.
3. KRUZELÁK, Ján, Andrea KVASNIČÁKOVÁ, Michaela DŽUGANOVÁ, **Jan HANZLIK**, Martin BEDNARIK, Ivan CHODÁK a Ivan HUDEC, 2024. Sulfur and Peroxide Vulcanization of the Blends Based on Styrene Butadiene Rubber, Ethylene–Propylene–Diene Monomer Rubber and Their Combinations. Materials [online]. 17(11) [cit. 2024-06-26]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma17112718.
4. BEDNARIK, Martin, Vladimír PATA, Martin OVSIK, Ales MIZERA, Jakub HUSAR, Miroslav MANAS, **Jan HANZLIK** a Michaela KARHANKOVA, 2024. The Modification of Useful Injection-Molded Parts' Properties Induced Using High-Energy Radiation. Polymers [online]. 16(4) [cit. 2024-06-26]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym16040450.

ODBORNÝ ŽIVOTOPIS



Jan Hanzlík

Datum narození: 20/03/1995 | **Státní příslušnost:** Česká republika | **Telefonní číslo:** (+420) 739857981 (Mobilní telefon) | **E-mailová adresa:** j_hanzlik@utb.cz |
Adresa: Zádveřice 416, 76312, Zádveřice-Raková, Česko (Domů)

● PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI

2011 – 2011 Zádveřice-Raková, Česko
ZÁMEČNICKÁ A STROJÍRENSKÁ ČINNOST FAGUS S.R.O.

– příprava polotovarů pro kompletaci obytných kontejnerů

2019 – 2020 Uherské Hradiště, Česko
ODBORNÁ STÁŽ 5M LEVIT S.R.O

– Příprava FEM výpočtových modelů
– Příprava diplomové práce

2020 – 2020 Zlín, Česko
PŘÍPRAVÁŘ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ PRO FYZIKÁLNÍ ZKOUŠKY ITC A.S. (INSTITUT PRO TESTOVÁNÍ A CERTIFIKACE)

– příprava plastových zkušebních vzorků pro jednotlivé fyzikální zkoušky

2021 – 2022 Slušovice, Česko
KONSTRUKTÉR MACH 1 MACHINERY S.R.O

– Konstrukce jednoúčelových strojů

● VZDĚLÁNÍ A ODBORNÁ PŘÍPRAVA

2020 – AKTUÁLNÍ Zlín, Česko
DOKTORSKÝ STUDIJNÍ PROGRAM (TITUL PH.D.) Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Internetové stránky www.ft.utb.cz

2018 – 2020 Zlín, Česko
MAGISTERSKÝ STUDIJNÍ PROGRAM (TITUL ING.) Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Internetové stránky www.ft.utb.cz

2014 – 2018 Zlín, Česko
BAKALÁŘSKÝ STUDIJNÍ PROGRAM (TITUL BC.) Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Internetové stránky www.ft.utb.cz

Internetové stránky www.spszl.cz**ZNALOST JAZYKŮ**Mateřský jazyk/jazyky: **ČEŠTINA**

Další jazyk(y):

	POROZUMĚNÍ		MLUVENÝ PROJEV		PSANÍ
	Poslech	Čtení	Samostatný ústní projev	Mluvená komunikace	
ANGLIČTINA	C1	C1	C1	C1	C1

Úroveň: A1 a A2: uživatel základů jazyka (začátečník), B1 a B2: samostatný uživatel (mírně pokročilý), C1 a C2: zkušený uživatel (pokročilý)

DIGITÁLNÍ DOVEDNOSTI

Microsoft Word | Microsoft PowerPoint | Microsoft Excel | Microsoft Office | Email | CATIA V5 (CAD) | Solidworks, Autodesk Inventor & AutoCad | Autodesk Moldflow | Cadmould | Siemens FEMAP | SolidEdge

PROJEKTY

2020 – AKTUÁLNÍ

Člen řešitelského kolektivu

UTB ve Zlíně, FT - Ústav výrobního inženýrství

IGA/FT/2020/004

IGA/FT/2021/005

IGA/FT/2022/002

IGA/FT/2023/005

IGA/FT/2024/003

ŘIDIČSKÝ PRŮKAZ

Řidičský průkaz: AM

Řidičský průkaz: A1

Řidičský průkaz: A2

Řidičský průkaz: B

ÚČAST NA SPOLEČENSKÉM A POLITICKÉM DĚNÍ

03/2022 – AKTUÁLNÍ Zlín

Člen akademického senátu Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně

10/2022 – AKTUÁLNÍ Zlín

Předseda Studentské komory akademického senátu UTB

03/2022 – AKTUÁLNÍ Zlín

Člen legislativní komise akademického senátu UTB

02/2023 – AKTUÁLNÍ Zlín

Člen Studentské komory Rady vysokých škol

● **TVŮRČÍ ČINNOST**

10/2020 – 12/2020

Tvůrce a realizátor přednášek

UTB ve Zlíně, FT

Projekt: IKAROS

● **PEDAGOGICKÁ ČINNOST**

01/09/2020 – AKTUÁLNÍ

Výuka odborných předmětů na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně, Fakultě technologické, Ústavu výrobního inženýrství

Technologie II

Seminář z technického kreslení

Základy výrobních procesů

● **OSTATNÍ ČINNOST**

01/09/2020 – AKTUÁLNÍ

Vedení závěrečných prací

Vedení (1 obhájená a 2 rozpracované)

Oponování (5)

01/09/2020 – AKTUÁLNÍ

Doučování odborných předmětů

Technické kreslení

Fyzika

Aplikovaná mechanika

● **PUBLIKACE**

2018

Měření vlastností povlaků vytvořených PA-CVD technologií

HANZLÍK, Jan, 2018. Měření vlastností povlaků vytvořených PA-CVD technologií. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 76 s. (66 903 znaků). Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/42389>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Ovsík, Martin.

HANZLÍK, Jan, 2018. Měření vlastností povlaků vytvořených PA-CVD technologií. Zlín

2020

Pevnostní návrh leteckých konstrukcí

HANZLÍK, Jan, 2020. Pevnostní návrh leteckých konstrukcí. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 157 s. (138 056 znaků). Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/48747>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Bednařík, Martin.

HANZLÍK, Jan, 2020. Pevnostní návrh leteckých konstrukcí. Zlín

2024

The Modification of Useful Injection-Molded Parts' Properties Induced Using High-Energy Radiation

BEDNARIK, Martin, Vladimír PATA, Martin OVSIK, Ales MIZERA, Jakub HUSAR, Miroslav MANAS, Jan HANZLIK a Michaela KARHANKOVA, 2024. The Modification of Useful Injection-Molded Parts' Properties Induced Using High-Energy Radiation. *Polymers* [online]. **16**(4) [cit. 2024-06-26]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym16040450

2024

The Impact of Surface Roughness on Conformal Cooling Channels for Injection Molding

HANZLIK, Jan, Jiri VANEK, Vladimír PATA, Vojtech SENKERIK, Martina POLASKOVA, Jan KRUZELAK a Martin BEDNARIK, 2024. The Impact of Surface Roughness on Conformal Cooling Channels for Injection Molding. *Materials* [online]. **17**(11) [cit. 2024-06-26]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma17112477

2024

Sulfur and Peroxide Vulcanization of the Blends Based on Styrene-Butadiene Rubber, Ethylene-Propylene-Diene Monomer Rubber and Their Combinations

KRUŽELÁK, Ján, Andrea KVASNIČKOVÁ, Michaela DŽUGANOVÁ, Jan HANZLIK, Martin BEDNARIK, Ivan CHODÁK a Ivan HUDEC, 2024. Sulfur and Peroxide Vulcanization of the Blends Based on Styrene-Butadiene Rubber, Ethylene-Propylene-Diene Monomer Rubber and Their Combinations. *Materials* [online]. **17**(11) [cit. 2024-06-26]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma17112718

2024

AFM-BASED MACHINE DESIGN FOR FINISHING INJECTION MOLDING TOOLS

HANZLIK, JAN, JIRI VANEK, BARBORA KOTLANOVA, MICHAL KOCAK, MARTIN OVSIK a MARTIN BEDNARIK, 2024. AFM-BASED MACHINE DESIGN FOR FINISHING INJECTION MOLDING TOOLS. *MM Science Journal* [online]. 2024-06-03, 2024(3) [cit. 2024-06-26]. ISSN 18031269. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2024_06_2024015

Ing. Jan Hanzlík, Ph.D.

**Využití aditivních technologií výroby v oblasti temperace
vstřikovacích forem**

The Use of Additive Technologies in Manufacturing of Injection Mold
Cooling Systems

Teze disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: Ing. Jan Hanzlík, Ph.D.

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání 2024

Pořadí vydání: první

ISBN 978-80-7678-278-5