

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. David Chalupa
Studijní program:	Konstrukční inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. David Škaroupka, Ph.D.
Akademický rok:	2025/26

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv segmentových strategií na mechanické vlastnosti velkoformátových dílů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se zaměřuje na výzkum a vývoj hybridní (aditivně–subtraktivní) technologie, se zaměřením na problematiku tzv. segmentových strategií, kdy dochází k aditivnímu nanášení materiálu na dříve vytištěné části těles za studena. Tyto spoje jsou pevnostně problematické z důvodu obtížně dosažitelného difuzního spojení při aplikaci na studený povrch a z důvodu orientace vrstev kladených v odlišném směru oproti podkladu. Diplomová práce doplňuje projekt mezi VUT v Brně a spin–off firmou 3Deposition. Předpokládá se využití robotu KUKA KR8 1620 s limitem nosnosti 8kg, šnekový extruder D–PROs a obráběcí vřeteno AMB.

Typ práce: výzkumná/vývojová
Výstup práce: publikační výsledek (J,D)
Projekt: TAČR

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je objasnit vliv výrobních strategií na pevnost segmentových spojů u dílů vyráběných pomocí velkoformátové hybridní aditivně – subtraktivní technologie polymerů v robotické buňce.

Dílčí cíle diplomové práce:

- identifikovat metody spojování segmentů s potenciálem využití ve velkoformátové aditivní výrobě polymerů,
- vyvinout a ověřit procesní parametry pro spojování segmentů, zahrnující návrh parametrického algoritmu v prostředí Grasshopper pro generování výrobních drah a výrobu zkušebních vzorků,
- navrhnout a integrovat hybridní strategie spojování segmentů, kombinující aditivní a subtraktivní kroky, včetně tvorby algoritmu pro návrh dráhové geometrie, nastavení technologických podmínek a výroby vzorků, včetně kalibrace a nutných úprav výrobního HW,
- experimentálně ověřit, analyzovat a zhodnotit mechanické vlastnosti segmentových spojů vyrobených jednotlivými strategiemi.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, laboratorní protokol

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

CASTELLÓ-PEDRERO, Pablo; BAS-BOLUFER, Javier; GARCÍA-GASCÓN, César; CHINESTA, Francisco a JUAN ANTONIO GARCÍA-MANRIQUE. Interlayer adhesion in Large Format Additive Manufacturing of glass fiber reinforced ABS structures. Online. Journal of Materials Research and Technology. 2025, vol. 2025, no. 39, s. 16. ISSN 2238-7854. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.09.149>. [cit. 2025-10-18].

CUEVAS, Diego García a PUGLIESE, Gianluca. Advanced 3D printing with Grasshopper®: clay and FDM. Independently published, 2020. ISBN 979-8635379011.

TYMRAK, B.M.; KREIGER, M. a PEARCE, J.M. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. Materials & Design. 2014, č. 58, s. 242-246. ISSN 0261-3069. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2025/26

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Při velkoformátové aditivně-subtraktivní výrobě polymerů je pro dosažení přesnosti a tvarové složitosti často nutné iterativně střídat tisk a obrábění. Tato strategie však naráží na nízkou pevnost rozhraní mezi postupně vyráběnými segmenty. Při nanášení nového segmentu na vychladlý a obrobený substrát vzniká studený spoj, který u materiálů citlivých na teplotní historii může vést až k oddělení segmentů během výroby. Cílem práce bylo navrhnout segmentový spoj omezující negativní efekt studeného spoje a popsat vliv jeho geometrických a procesních parametrů na pevnost rozhraní u materiálu PP30GF.

Experimentální ověření bylo provedeno na robotické hybridní výrobní buňce, která umožňovala kombinovat velkoformátovou aditivní výrobu z granulátu s obráběním. Základem navržené strategie bylo vytvoření tvarového zámku v tenkostěnném tištěném segmentu a jeho následné zaplnění taveninou při navazující aditivní operaci. Na modelových tělesech byl pomocí tahových zkoušek hodnocen vliv šířky drážky, hloubky drážky, cílené přeextruze a výrobní přesnosti robotického pracoviště na výslednou pevnost spoje.

Nejlepší skupina vzorků s hybridním tvarovým zámkem dosáhla pevnosti přibližně 8 MPa. To odpovídalo zhruba čtyřnásobnému zvýšení pevnosti oproti běžnému studenému spoji a obnovení přibližně 65 % pevnosti kontinuálního tisku. Výsledky dále ukázaly, že v testovaném rozsahu byla pro vyšší únosnost rozhodující větší zbytková šířka substrátu vůči šířce drážky, protože kritické porušení probíhalo převážně v obrobeném segmentu. Hloubka drážky ovlivňovala polohu kritického porušení a cílená přeextruze zvyšovala únosnost spoje.

Kromě popisu vlivu zkoumaných parametrů metodou plochy odezvy práce identifikovala klíčové limity robotické hybridní výroby, které zásadně ovlivňovaly výslednou pevnost segmentového spoje. Dosažené výsledky poskytují metodický základ pro využití segmentových a iterativních hybridních strategií při výrobě rozměrných polymerních dílů.

KLÍČOVÁ SLOVA

velkoformátová aditivní výroba, hybridní aditivně-subtraktivní výroba, studený spoj, segmentové strategie, PP30GF

ABSTRACT

In large-format additive-subtractive manufacturing of polymers, iterative alternation of printing and machining is often required to achieve dimensional accuracy and geometric complexity. However, this strategy is limited by the low strength of interfaces between sequentially manufactured segments. When a new segment is deposited onto a cooled and machined substrate, a cold joint is formed. In materials sensitive to thermal history, this can lead to segment separation already during manufacturing. The aim of this thesis was to design a segment joint that reduces the negative effect of the cold joint and to describe the influence of its geometric and process parameters on the interface strength of PP30GF.

The experimental validation was carried out on a robotic hybrid manufacturing cell that combined large-format pellet-based additive manufacturing with machining. The proposed strategy was based on creating a mechanical interlock in a thin-walled printed segment and subsequently filling it with molten material during the following additive operation. Tensile tests of model specimens were used to evaluate the influence of groove width, groove depth, controlled over-extrusion and manufacturing accuracy of the robotic workstation on the resulting joint strength.

The best group of specimens with the hybrid mechanical interlock achieved a strength of approximately 8 MPa. This corresponded to an approximately fourfold increase compared with a conventional cold joint and to the recovery of approximately 65% of the strength of continuous printing. The results further showed that, within the tested range, a larger residual substrate width relative to the groove width was decisive for higher load-bearing capacity, because critical failure occurred mainly in the machined segment. Groove depth affected the location of critical failure, while controlled over-extrusion increased the load-bearing capacity of the joint.

In addition to describing the influence of the investigated parameters using response surface methodology, the thesis identified key limitations of robotic hybrid manufacturing that significantly affected the resulting strength of the segment joint. The results provide a methodological basis for the use of segmented and iterative hybrid strategies in the production of large polymer parts.

KEYWORDS

large-format additive manufacturing, hybrid additive-subtractive manufacturing, cold joint, segment strategies, PP30GF

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHALUPA, David. *Vliv segmentových strategií na mechanické vlastnosti velkoformátových dílů*. Diplomová práce. David ŠKAROUPKA (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2026. [cit. 2026-05-22]

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych upřímně poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Davidu Škaroupkovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné připomínky a velmi vstřícný přístup během zpracování této práce. Jeho rady a zkušenosti byly důležité při formulaci výzkumného problému i při řešení experimentální části.

Zvláštní poděkování patří Ing. Vojtěchu Floriánovi za odbornou pomoc, trpělivé konzultace a podporu při realizaci experimentů. Jeho ochota hledat řešení vzniklých problémů a průběžná pomoc při přípravě i provádění experimentální části měly zásadní význam pro dokončení této práce.

Dále děkuji Ing. Petru Krejčířikovi za odbornou i technickou podporu, která přispěla k úspěšné realizaci praktické části práce. Poděkování patří také celému týmu velkoformátového 3D tisku na odboru reverzního inženýrství a aditivních technologií Ústavu konstruování FSI VUT za pomoc, spolupráci a vytvoření odborného zázemí při řešení této práce.

Zvláštní poděkování věnuji své přítelkyni Elišce, své rodině a přátelům za trpělivost, podporu a vytvoření klidného zázemí během studia i při zpracování diplomové práce.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Davida Škaroupky Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, které jsem použil, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

Při zpracování textové části práce byly využity nástroje generativní umělé inteligence, konkrétně jazykový model ChatGPT založený na architektuře GPT-5.5 Thinking, a to za účelem jazykové korektury, stylistických úprav a třídění vlastních naměřených experimentálních dat. Dále byl využit nástroj NotebookLM od společnosti Google pro usnadnění orientace v rešeršních zdrojích a vyhledávání informací v použitých podkladech.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	14
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
2.1	Kritická rešerše	15
2.1.1	Velkoformátový 3D tisk polymerů	15
2.1.2	Robotická velkoformátová aditivní výroba	15
2.1.3	Tiskové strategie při použití robotického ramene	16
2.1.4	Hybridní technologie	17
2.1.5	Fused Granulate Fabrication	18
2.1.6	Aplikace velkoformátového 3D tisku polymerů	19
2.1.7	Šnekový extruder	23
2.1.8	Používané materiály a jejich vlastnosti	24
2.1.9	Mechanismus tvorby mezivrstevného rozhraní	26
2.1.10	Vliv procesních parametrů na kvalitu výtisku	28
2.1.11	Typické defekty v technologii LFAM	31
2.1.12	Mechanické vlastnosti velkoformátových dílů a jejich testování	33
2.1.13	Strategie potlačení efektu studeného spoje	36
2.1.14	Rybinový spoj	38
2.2	Shrnutí hlavních zjištění	41
2.3	Mezera v poznání	42
3	CÍL PRÁCE	43
3.1	Výzkumné otázky	43
3.2	Hypotézy	44
4	MATERIÁL A METODY	45
4.1	Experimentální výrobní zařízení	46
4.1.1	Robotický manipulátor	46
4.1.2	Tisková platforma	47
4.1.3	Požadavky na nově vzniklou tiskovou platformu	47
4.1.4	Extruder D-Pro S	50
4.1.5	Úprava systému chlazení	52
4.1.6	Úprava násypky granulátu	54
4.1.7	Úprava pro automatickou výměnu nástrojů	55
4.1.8	Optimalizace chlazení heatbreaku	57
4.1.9	Obráběcí vřeteno AMB	58
4.2	Vymezení procesního okna tisku materiálu PP-30GF	59

4.2.1	Použitý materiál	59
4.2.2	Rešeršní východiska pro návrh počátečních parametrů	60
4.2.3	Vymezení sledovaných procesních proměnných	61
4.2.4	Testovací geometrie a generování trajektorie	62
4.2.5	Strategie experimentálního postupu	63
4.2.6	Hodnocení procesních parametrů	64
4.3	Výzkum vlivu výrobní strategie	67
4.3.1	Metodika tvorby hybridního spoje a definice procesních kroků	68
4.3.2	Metodika kalibrace nástrojů a výrobních drah	70
4.3.3	Metodika zajištění adheze výtisku k tiskové základně	73
4.3.4	Parametrický model a příprava výrobních dat	74
4.3.5	Metodika tahových zkoušek	75
4.3.6	Mikroskopická analýza	77
4.3.7	Finálního experiment a použité procesní parametry	77
4.3.8	Postup výroby vzorků finálního experimentu	79
5	VÝSLEDKY	82
5.1	Výsledky optimalizace tiskových parametrů	82
5.2	Výsledky referenčních experimentů	84
5.2.1	Pevnost kontinuálně tištěných vzorků	84
5.3	Výsledky Screeningových experimentů	86
5.3.1	Screening geometrie drážky	86
5.3.2	Screening koeficientu přextruze	87
5.3.3	Ověření geometrie	87
5.4	Finální experiment	89
5.4.1	Mechanismy porušení vzorků	90
5.4.2	Mikroskopická analýza výrobní nepřesnosti	92
5.4.3	Vyhodnocení se zahrnutím výrobní nepřesnosti	93
5.4.4	Vyhodnocení vzorků po odstranění výškové odchylky trysky	94
5.4.5	Nejvyšší dosažená pevnost spoje	95
6	DISKUZE	96
6.1	Interpretace výsledků	96
6.1.1	Procesní parametry a kvalita kontinuálního tisku	96
6.1.2	Význam referenčních studených spojů	97
6.1.3	Funkce hybridního tvarového spoje	97
6.1.4	Vliv vystředění drážky vůči tištěné stopě	98
6.1.5	Výšková odchylka trysky vůči horní ploše segmentu	99
6.1.6	Význam tlaku taveniny při zaplňování drážky	100

6.1.7	Vliv šířky drážky na únosnost spoje	101
6.1.8	Vliv hloubky drážky na únosnost spoje	102
6.1.9	Vliv cílené přeeextruze na únosnost spoje	103
6.1.10	Metodické limity	105
6.1.11	Doporučení pro další výzkum	106
6.2	Verifikace hypotéz	107
7	ZÁVĚR	109
8	VÝSLEDEK VÝZKUMŮ PODLE RIV	111
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	112
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	117
10.1	Seznam použitých zkratek	117
10.2	Seznam použitých veličin	119
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	121
12	SEZNAM TABULEK	127
13	SEZNAM PŘÍLOH	128

1 ÚVOD

Velkoformátová aditivně-subtraktivní výroba polymerů umožňuje kombinovat rychlou stavbu rozměrných dílů s následným obráběním funkčních ploch. Tento přístup je významný zejména u tvarově složitých nebo rozměrově přesných dílů, kde samotná aditivní výroba naráží na omezenou kvalitu povrchu, nižší rozměrovou přesnost a výrazný schodový efekt. Technologie založené na extruzi granulátu současně umožňují zpracování průmyslových termoplastů a kompozitních směsí při vysokých objemových průtocích, což je činí vhodnými pro výrobu velkorozměrových polymerních struktur.

Při výrobě rozměrných nebo geometricky složitých dílů je často nutné aditivní a subtraktivní kroky střídat iterativně. Díl je v takovém případě vytvářen po částech, tedy po navazujících segmentech. Tento postup umožňuje obrábět oblasti, které by po dokončení celého výtisku nebyly dostupné, a současně rozšiřuje možnosti segmentové výroby dílů přesahujících pracovní prostor zařízení. Hlavním technologickým omezením této strategie je ale pevnost rozhraní mezi vyráběnými segmenty.

Pokud je nový segment nanášen na již vychladlý a obrobený polymerní substrát, vzniká studený spoj. V tomto rozhraní jsou omezeny podmínky pro následnou difuzi polymerních řetězců, takže jeho soudržnost výrazně klesá. U semikrystalických polymerů a jejich kompozitů je tento problém amplifikován smrštěním, citlivostí na teplotní historii a vznikem vnitřního pnutí. V krajním případě může dojít k oddělení segmentů již během výroby, což spolehlivou iterativní hybridní výrobu prakticky znemožňuje.

Z tohoto důvodu je nutné hledat způsoby, jak negativní efekt studeného spoje omezit. Jednou z možností je využití tvarového zámku vytvořeného přímo v tištěné stopě. Princip spočívá v obrobení do vychladlého segmentu a následně v jejím zaplnění taveninou při navazující aditivní operaci. Spoj potom nepřenáší zatížení pouze prostřednictvím slabého materiálového rozhraní, ale také pomocí mechanického zaklesnutí v obrobeném profilu.

Současný stav poznání však dostatečně nepopisuje, jak takový hybridní segmentový spoj funguje v podmínkách robotické velkoformátové výroby. Nejasný zůstává zejména vliv skutečné výrobní přesnosti, vliv rozměrů drážky a způsob zaplňování. Právě výrobní přesnost je u robotického pracoviště kritická, protože spoj vyžaduje přesné sladění trajektorií obou operací, vystředění drážky vůči tiskové stopě a řízenou výškovou polohu trysky.

Cílem práce je navrhnout segmentový spoj schopný omezit negativní efekt studeného spoje a popsat vliv jeho geometrických a procesních parametrů na pevnost segmentového rozhraní.

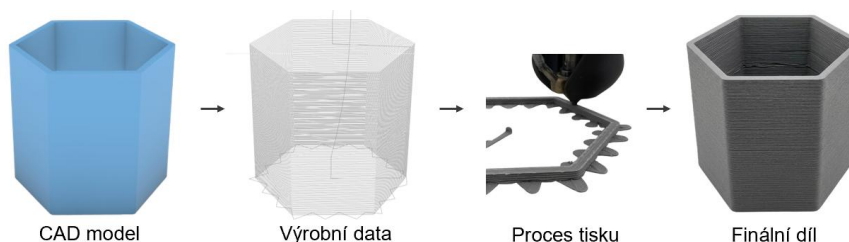
Výzkum odpovídá na otázku, jak geometrie obrobené drážky, včetně její polohy vůči tiskové stopě, ovlivňuje výslednou pevnost segmentového spoje v tahu. Současně hodnotí, jaký vliv má míra přeextruze při vyplňování drážky na celkovou pevnost hybridního spoje. Výsledky práce mají poskytnout metodický základ pro využití segmentových a iterativních hybridních strategií při výrobě rozměrných polymerních dílů.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Kritická rešerše

2.1.1 Velkoformátový 3D tisk polymerů

Velkoformátová aditivní výroba neboli Large Format Additive Manufacturing – LFAM zahrnuje technologie pro produkci dílů o rozměrech v řádu metrů, typicky s objemem stavebního prostoru přesahujícím 1 m^3 [1]. Ačkoliv pod klasifikaci LFAM spadají i systémy zpracující kovy či beton, tato práce se zaměřuje na technologie extruze polymerů [1, 2]. Většina procesů je založena na principu vytlačování materiálu skrze trysku a jeho následného selektivního nanášení vrstvy po vrstvě, čímž vzniká požadovaná geometrie podle výrobních dat z původního 3D modelu viz Obr. 2-1 [2]. Tato metoda, v souladu s normou ISO/ASTM 52900 označovaná jako MEX (Material Extrusion), se vyznačuje materiálovou univerzalitou a umožňuje zpracovávat širokou škálu termoplastů a jejich kompozitů [2].



Obr. 2-1 Schéma produkce velkoformátového výtisku

2.1.2 Robotická velkoformátová aditivní výroba

Integrace víceosých průmyslových robotů do procesu velkoformátové aditivní výroby představuje zásadní technologický posun oproti konvenčním portálovým systémům [2, 3]. Hlavní výhodou je využití šesti stupňů volnosti, které umožňují vysokou variabilitu orientace tiskové hlavy [3]. Typické pracoviště integruje robotické rameno, extruzní jednotku neboli extruder namontovanou na přírubě, řídicí systém a tiskovou základnu. Systém může být rozšířen o lineární pojezd, tvořící sedmou osu. Tato konfigurace výrazně rozšiřuje dosah samotného manipulátoru, čímž rostou maximální rozměry tisknutelných dílů [2].

Navzdory vysoké flexibilitě přináší robotická konfigurace specifické technické výzvy, zejména v oblasti přesnosti a kinematických omezení. Při pohybu nástroje vysokými rychlostmi, které jsou pro ekonomickou produkci nezbytné, narůstá vliv setrvačných sil a poddajnosti ramen, což může negativně ovlivnit rozměrovou přesnost tisknutých dílů [2]. Kritickým jevem je rovněž výskyt singulárních konfigurací, kdy dochází k matematické neurčitosti v inverzní kinematice, což vede k vysokým oscilacím a narušení kvality tisku [2].

2.1.3 Tiskové strategie při použití robotického ramene

Víceosá kinematika umožňuje přechod od jednoduchého, planárního vrstvení k pokročilým strategiím depozice, které jsou voleny s ohledem na geometrickou složitost a výslednou anizotropii mechanických vlastností (Obr. 2-2) [3].

Planární tisk

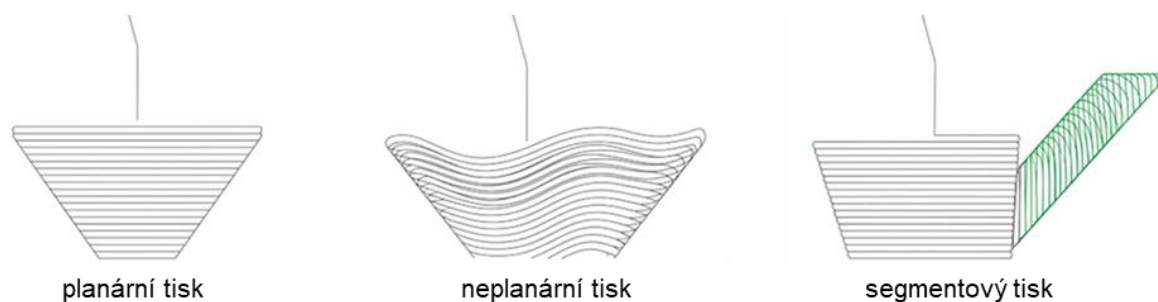
Základní přístup představuje planární 2,5D tisk, kdy je materiál ukládán v horizontálních rovinách, stejně jako u portálových konstrukcí tiskáren. Tato metoda je výpočetně nejméně náročná, avšak u šikmých ploch generuje výrazný schodovitý efekt. Další nevýhodou je nutnost využití podpůrné struktury při tisku strmých převisů, což zvyšuje spotřebu materiálu a prodlužuje dobu výroby [2, 3].

Neplanární tisk

Pokročilejší alternativou je neplanární tisk, při kterém trajektorie nástroje plynule sleduje zakřivení povrchu součásti [2–4]. Tato strategie umožňuje plynulou změnu šířky a výšky vrstvy, čímž dochází k optimalizaci mechanických vlastností dílu a eliminaci vizuálních defektů povrchu [4]. Specifickou variantou je tisk na nakloněné rovině, který usnadňuje tisk převisů bez podpor díky změně směru působení gravitace vůči nanášené vrstvě [2]. Limitací jsou však tiskové systémy, Štefčák et al. zjistili, že naklonění extruderu o více než 40° narušuje gravitační dávkování pelet a může způsobit ucpání násypky [3].

Segmentové strategie

Tato výrobní metodika spočívá v dekompozici digitálního modelu na dílčí prostorové celky [4]. Segmentové strategie umožňují tisk objektů přesahujících dosah robota, multimateriálovou výrobu a také redukci podpůrných struktur díky optimalizované orientaci tisku [5]. Zásadním přínosem je možnost integrace do hybridních procesů, kde fáze výroby otevírá okno pro další technologické kroky. Hlavní výzvu však představuje pevnost rozhraní mezi jednotlivými segmenty [5, 6]. Proces tisku nového segmentu probíhá na již vychladlý povrch předchozího segmentu. Z tohoto důvodu, vzniká studený spoj charakteristický nízkou mezivrstevnou adhezí viz kapitola 2.1.9 [6–8].



Obr. 2-2 Schémata použitelných strategií v robotické výrobě

2.1.4 Hybridní technologie

Hlavními nedostatky LFAM jsou nízká kvalita povrchu a rozměrová nepřesnost funkčních ploch [1, 2]. Odpověď na tyto limity nabízí hybridní aditivně-subtraktivní výroba (HASM), která integruje aditivní procesy s obráběním v rámci jednoho výrobního systému, čímž efektivně eliminuje zmíněné nevýhody. Zatímco aditivní složka umožňuje rychlou stavbu složitých geometrií s minimálním odpadem materiálu, následné obrábění umožňuje dosažení přesných tolerancí a vysoké kvality povrchu v kritických oblastech [2].

Hybridní strategie lze klasifikovat na základě časové souslednosti jednotlivých operací:

Sekvenční (post-procesní) hybridní výroba

Tento způsob výroby se vyznačuje tím, že procesy probíhají jako nezávislé kroky. Nejprve je vytisknuta celá díl jako polotovár, jenž je po stabilizaci v celku obroben na požadovanou přesnost [9]. Přenos dílu mezi stroji však vytváří prostor pro vznik chyb při ustavování výtisku, čímž se zvyšují výsledné výrobní tolerance a časová náročnost (Obr. 2-3 - a) [9].

Cyklická (iterativní) hybridní výroba

Tato metoda představuje formu integrace, kde dochází k pravidelnému střídání operací po dokončení sekvence vrstev nebo segmentu. Tato strategie je klíčová pro výrobu přesných vnitřních dutin, které se po nanesení dalšího materiálu stávají pro nástroj nedostupnými [6, 9]. Integrace se realizuje výměnou nástrojů v rámci jednoho manipulátoru nebo nasazením více střídajících se ramen (Obr. 2-3 - b) [6, 9].

Využití této iterativní strategie u termoplastů ovšem naráží na obdobné limity jako již zmiňované segmentové strategie. Obrábění vyžaduje zchlazení materiálu pro zajištění dostatečné tuhosti pro obrábění [6, 9]. Tato technologická prodleva nevyhnutelně vede k nanášení následného segmentu na substrátní vrstvu o nízké teplotě, čímž dochází ke vzniku studeného spoje, jehož fyzikální mechanismus je podrobně popsán v kapitole 2.1.9 [6].

Kontinuální hybridní výroba

Poslední varianta představuje nejvyšší formu integrace, využívající více manipulátorů pracujících koordinovaně na společné platformě. Výhodou je možnost provozování více výrobních operací souběžně, což umožňuje snížení výrobních časů (Obr. 2-3 - c) [2, 9].



Obr. 2-3 Konfigurace výrobních platform HASM

2.1.5 Fused Granulate Fabrication

Zásadní technologií v kontextu velkoformátového tisku polymerů je Fused Granulate Fabrication (FGF), v literatuře označovaná jako pellet-based extrusion [2]. Vstupním materiálem je polymerní granulát (pelety), který je plastifikován a vytlačován pomocí šnekového extruderu. Tím se FGF zásadně liší od běžných maloformátových tiskáren typu Fused Filament Fabrication (FFF), které jako vstupní materiál využívají kalibrovanou polymerní strunu označovanou jako filament [2, 10].

Hlavní výhodou FGF je vysoká produktivita. Zatímco systémy na filament dosahují průtoku obvykle pod 0,5 kg/h, technologie FGF běžně pracuje s hmotnostními průtoky v řádu desítek kg/h [2]. FGF navíc umožňuje přímé zpracování průmyslových granulátů a kompozitních směsí, což eliminuje náklady na výrobu filamentu. Cena vstupního materiálu tak může být ve srovnání s filamentem i více než desetinásobně nižší [2, 10]. Tato technologie rovněž podporuje principy cirkulární ekonomiky, neboť umožňuje efektivní tisk přímo z recyklovaných plastových drtí s minimální příměsí nového materiálu [7].

Nevýhodou FGF je nižší geometrická přesnost a výraznější schodový efekt. Tento jev je v technologii FGF velmi markantní, neboť je přímým důsledkem velké šířky a výšky extrudované stopy, která je nezbytná pro dosažení vysokých objemových průtoků materiálu.

Dalším specifikem je použití šnekového extruderu, u něhož je z důvodu setrvačnosti taveniny a tlaku v komoře značně omezená možnost rychlé retrakce taveniny¹. Absence efektivní retrakce zvyšuje riziko vzniku defektů při přejezdech tiskové hlavy, kdy dochází k samovolnému vytékání plastu z trysky (Obr. 2-4). Z tohoto důvodu je nutné navrhovat tiskové trajektorie jako kontinuální, s minimem přerušování extruze [2].



Obr. 2-4 Defekty způsobené omezenou retrakcí [11]

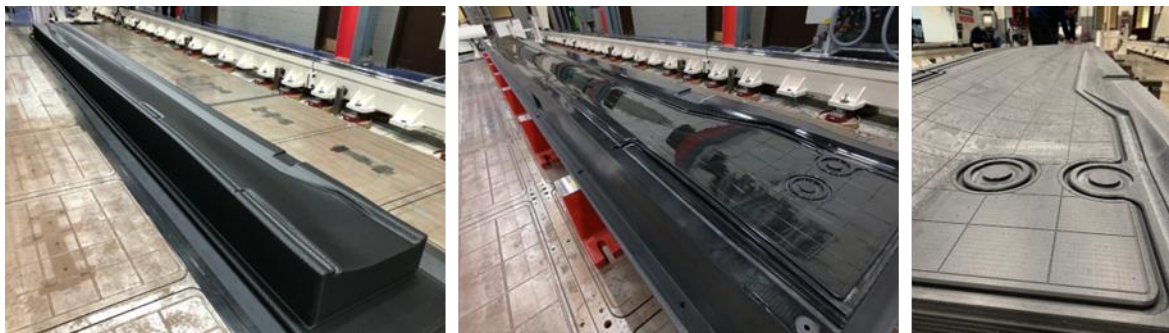
¹ Retrakce taveniny je procesní funkce, při které dojde ke krátkému zpětnému vtažení extrudovaného materiálu během nepracovních přejezdů extruderu. Tím se zabrání samovolnému vytékání taveniny z trysky.

2.1.6 Aplikace velkoformátového 3D tisku polymerů

Technologie velkoformátové aditivní výroby umožňuje rychlou produkci rozměrných dílů s minimálními počátečními náklady na nástrojové vybavení. Implementace LFAM do výrobních procesů zkracuje dodavatelský řetězec a dovoluje agilní reakci na aktuální poptávku, čímž eliminuje potřebu rozsáhlých skladovacích prostor [2]. Aplikace lze rozdělit na přímou výrobu finálních komponentů a nepřímou výrobu forem, nástrojů a upínek pro další technologické operace.

Výroba forem, nástrojů a přípravků

V průmyslové praxi směřuje LFAM primárně do oblasti produkce rozměrných forem a přípravků, kde nahrazuje energeticky a časově náročné konvenční metody. Tato technologie otevírá potenciál pro radikální snížení nákladů a zkrácení dodacích lhůt [12]. Mezi zásadní realizace patří vrtací a ořezávací přípravek pro křídla letounu Boeing 777x vyvinutý v laboratořích ORNL, který demonstroval schopnost produkovat monolitické celky pro letecký průmysl [1]. Významnou aplikací je rovněž 6,7 m dlouhá laminovací forma pro listy rotoru helikoptéry (Obr. 2-5). K její výrobě bylo spotřebováno 521 kg materiálu ABS s 20 % uhlíkových vláken, přičemž tisk trval 75 hodin [13].



Obr. 2-5 Laminovací forma pro listy rotoru helikoptéry [13]

LFAM nachází uplatnění také v energetice a slévárenství. Masivní formy pro lopatky větrných turbín z University of Maine, umožnily zkrátit přípravnou fázi o 6 měsíců a snížit vývojové náklady až o polovinu (Obr. 2-6) [2]. Ve slévárenství se technologie osvědčila při tvorbě modelů, které splňují toleranční požadavky kladené na přesné odlitky [12].



Obr. 2-6 Forma pro výrobu lopatek větrných turbín [14]

Automobilový průmysl a doprava

Průkopníkem v přímé výrobě se v roce 2014 stala společnost Local Motors s modelem Strati (Obr. 2-7) [15]. Využitím kompozitu ABS-CF se podařilo radikálně redukovat počet komponent z tisíců na méně než padesát, přičemž tisk karoserie trval 44 hodin [16]. Na tento koncept navázal autonomní autobus Olli (Obr. 2-7), jehož struktura byla z 80 % vytvořena aditivně (Obr. 2-7). Přes technologický úspěch však společnost v roce 2022 ukončila činnost, což bylo zpětně interpretováno jako důsledek chybějící tržní poptávky a neekonomického zaměření na plně tištěný vůz na úkor efektivnějších aplikací [16].



Obr. 2-7 Olli 2.0 plně autonomní 3D tištěný automobil [17], Strati první 3D tištěný automobil [18]

Potenciál v rámci cirkulární ekonomiky demonstroval studentský tým z Eindhoven University of Technology s konceptem vozu z recyklovaného PETG-CF (Obr. 2-8) [19].



Obr. 2-8 Koncept neutrálního automobilu vlevo, tištěný monopost konceptu vpravo [19]

Kritické limity LFAM však ilustruje projekt jízdního kola SuperStrata společnosti Arevo (Obr. 2-9 Obr. 2-9) [20]. Tento ambiciózní projekt sliboval aditivní produkci monolitických karbonových rámců z kontinuálních vláken s plně personalizovanou geometrií na míru uživatele. Reálné výstupy však vykazovaly značnou vnitřní porozitu a geometrické odchylky. Nutnost náročného dodatečného opracování a vysoké náklady na kontrolu kvality u nosných struktur vedly v kombinaci s neudržitelnou cenou k tržnímu selhání projektu [21].



Obr. 2-9 Superstrata 3D tištěné elektrokolo [21] Proces tisku rámu jízdního kola [22]

Námořní průmysl

Významné uplatnění nachází technologie LFAM v námořním průmyslu, kde umožňuje přímou výrobu integrálních trupů plavidel a komplexních prototypů lodních interiérů. Zásadním technologickým milníkem byla realizace plavidla „3Dirigo“ na University of Maine (Obr. 2-10) [2]. Tento trup o délce 7,62 m a hmotnosti 2268 kg byl vytištěn v čase pod 72 hodin z kompozitu polymeru a dřevěné celulózy, čímž demonstroval potenciál aditivní výroby pro rychlou produkci konstrukčních celků pro námořní průmysl [1, 2, 23].



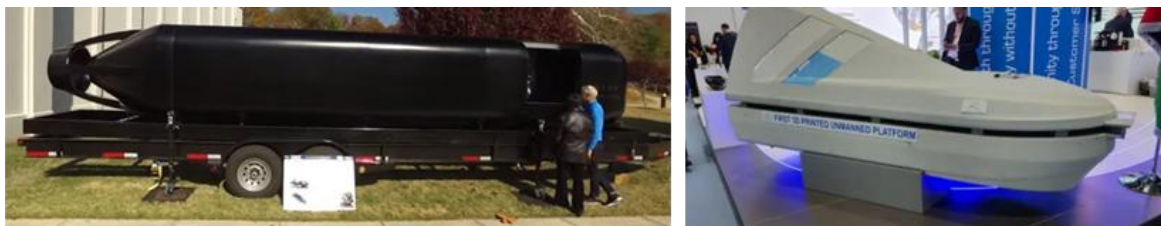
Obr. 2-10 3Dirigo [23]

Stejným směrem se ubírá i projekt společnosti Caracol a V2 Group, v němž byl vyroben jednoduchý 3D tištěný katamarán pro otevřené vody o délce 6 m (Obr. 2-11) [24]. Trup vznikl v jednom nepřerušovaném tiskovém cyklu z recyklovaného polypropylenu vyztuženého 30 % skelných vláken, přičemž doba tisku dosáhla přibližně 160 hodin [24].



Obr. 2-11 První aditivně vyrobený katamarán [24]

Paralelně s civilním vývojem probíhá výzkum i ve vojenském sektoru, což dokládá spolupráce ORNL a US Office of Naval Research na devítimetrovém prototypu trupu ponorky z materiálu ABS-CF. Tato aplikace vykazala snížení výrobních nákladů o 90 % a zkrácení produkčního cyklu z řádu měsíců na jednotky dnů (Obr. 2-12) [25]. Kromě velkých plavidel se pozornost soustředí na segment bezpilotních lodí, kde byl úspěšně realizován tisk pětimetrového dronového člunu HYDRA, o hmotnosti 345 kg (Obr. 2-12) [2].



Obr. 2-12 Aditivně vyráběný trup ponorky vlevo [25] Bepilotní člun HYDRA vpravo [26]

Interiérový design

V interiérovém designu představuje velkoformátový tisk polymerů nástroj pro výrobu atypického mobiliáře, dělicích prvků, podhledů a dalších tvarově složitých komponent. Jeho přínos spočívá především v možnosti přímo převádět digitální návrh do fyzické podoby, přizpůsobit geometrii konkrétnímu prostoru a současně využívat polymerní materiály. Technologie se proto uplatňuje zejména tam, kde jsou rozhodující geometrická volnost, vysoká míra individualizace a omezení materiálového odpadu [27].

Příkladem lokální aplikace v interiéru je vybavení administrativních prostor Škoda Auto v budově AFI City, kde byly aditivní technologie využity k vytvoření atypického mobiliáře a individuálně navržených interiérových prvků s plynulou geometrií (Obr. 2-13) [28].



Obr. 2-13 Vybavení administrativních prostor Škoda Auto [28]

Významný směr představuje také využití recyklovaných materiálů, například z nápojových kartonů, pro tisk udržitelných interiérových detailů, což potvrzuje potenciál LFAM v cirkulární ekonomice stavebního sektoru [29].



Obr. 2-14 Interiérové prvky vyráběné z recyklátu s příměsí nápojových kartonů [29]

Další příklad představuje spolupráce Caracol a Elli Design na kolekci nábytkových prvků ZERO určených pro obytné i komerční interiéry (Obr. 2-15). Jednotlivé prvky byly vyráběny z recyklovaného polypropylenu vyztuženého skleněnými vlákny [30].

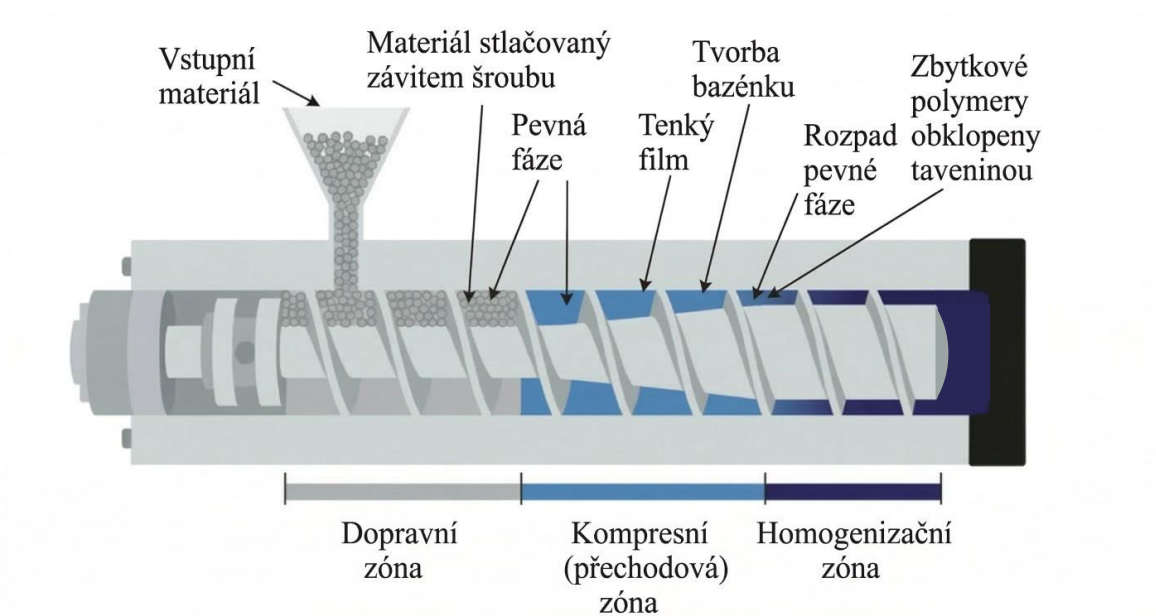


Obr. 2-15 Židle z kolekce ZERO z recyklovaného polypropylenu vyztuženého skleněnými vlákny [30]

2.1.7 Šnekový extruder

Extruzní jednotka v systémech FGF zajišťuje kontinuální transformaci pevného polymerního granulátu na homogenní taveninu a její vytlačování pod definovaným tlakem. Klíčovým prvkem je šnek rotující uvnitř vyhřívaného pracovního válce. Polymerní pelety vstupují do systému z násypky a postupují podél šroubovice šneku, kde jsou vystaveny kombinovanému působení tepla z odporových topných těles a intenzivního vnitřního smykového tření neboli viskózní disipace, které zajišťuje efektivní plastifikaci materiálu [7].

Geometrie šneku je rozdělena do tří funkčních zón: dopravní, kompresní a homogenizační (Obr. 2-16) [7]. Klíčovými konstrukčními parametry jsou průměr šneku, poměr délky k průměru (L:D) a kompresní poměr [10]. Poměr L:D zásadně ovlivňuje kvalitu promísení a homogenitu taveniny. Kompresní poměr pak definuje míru stlačení materiálu při přechodu z dopravní do homogenizační zóny, což je nezbytné pro eliminaci vzduchových inkluzí a vytvoření tlaku potřebného pro překonání hydraulického odporu trysky [10].



Obr. 2-16 Schéma šnekového extruderu upraveno dle [31]

Průměry šneků se v systémech LFAM pohybují od 8 mm u kompaktních jednotek až po 30 mm u vysokovýkonných systémů, přičemž větší rozměr umožňuje dosažení vyšších výstupních tlaků a hmotnostních průtoků [10]. Konfigurace šneku musí být vždy přizpůsobena reologickým vlastnostem konkrétního zpracovávaného polymeru [32]. Specifickým vlastnostem a typům materiálů se podrobněji věnuje následující kapitola.

2.1.8 Používané materiály a jejich vlastnosti

Technologie velkoformátové aditivní výroby (LFAM) využívající přímou extruzi granulátu (FGF) umožňuje zpracovávat široké spektrum termoplastických polymerů, které byly dříve vyhrazeny primárně pro technologie vstřikování plastů. Přejít od kalibrovaného filamentu k průmyslovému granulátu s sebou nese radikální změnu ekonomického modelu výroby [33]. U materiálů ve formě struny tvoří značnou část prodejní ceny proces její přesné kalibrace a navíjení [33]. Použitím granulátu lze dosáhnout snížení nákladů na vstupní surovinu o 65 % až 90 % v závislosti na typu polymeru a míře jeho plnění [33]. Odhadované rozdíly v nákladovosti jednotlivých materiálových skupin jsou shrnuty v (Tab. 1).

Tab. 1 Porovnání cen filamentu a tiskových granulátů [33]

Typ materiálu	Cena filamentu [USD/kg]	Cena granulátu [USD/kg]	Odhadovaná úspora
Komoditní materiály (např. PLA, PETG)	20–30	4–8	~80 %
Technické materiály (např. ABS, ASA)	30–50	5–10	~83 %
Vysoce výkonné kompozity (např. PA-CF)	80–120	20–35	~75 %
Ultra-výkonné materiály (např. PEEK)	400–600	90–150	~77 %

Jak vyplývá z (Tab. 1), nejvyšších relativních úspor při použití granulátu oproti filamentu dosahujeme u komoditních a technických materiálů. Z tohoto důvodu se další část práce zaměřuje právě na zástupce z těchto skupin, které současně představují vhodný kompromis mezi mechanickými vlastnostmi, zpracovatelností a ekonomickou efektivitou.

Rozdělení polymerů z hlediska vnitřní struktury

Z hlediska vnitřní struktury a chování během chlazení lze termoplasty rozdělit na amorfní a semikrystalické. Toto rozdělení je klíčové pro nastavení procesních parametrů a predikci chování dílu během stavby [34, 35].

Amorfní polymery

Tato skupina látek, kam patří například akrylonitril-butadien-styren (ABS), se vyznačuje neuspořádanou strukturou řetězců [34]. Díky postupnému tuhnutí pod teplotou skelného přechodu vykazují tyto materiály při ochlazení nižší a předvídatelnější smrštění [35]. V oblasti velkoformátového tisku tvoří ABS standard díky své dobré zpracovatelnosti, i když zůstává náchylný k oxidaci při delším setrvání v tavenině [10].

Semikrystalické polymery

Na rozdíl od amorfních materiálů obsahují semikrystalické polymery, jako je polypropylen (PP), oblasti s vysoce uspořádanou strukturou, které se vyznačují krystalizací během chlazení. Krystalizace je doprovázena náhlým úbytkem objemu, který v podmínkách LFAM bez vyhřívání komory generuje vysoká reziduální napětí způsobující deformaci výtisku [34, 36]. Čistý polypropylen sice vykazuje vynikající chemickou odolnost, avšak jeho značná tendence ke kroucení výrazně omezuje použití pro rozměrné díly [10, 35].

Kompozitní materiály

Využití termoplastických kompozitů vyztužených krátkými vlákny je pro technologii LFAM klíčové z hlediska eliminace procesních defektů [7, 35, 37]. Přítomnost krátkých vláken v polymerní matici slouží jako mechanická bariéra, která omezuje pohyblivost řetězců během krystalizace [35]. Tím dochází ke snížení koeficientu tepelné roztažnosti, stabilizaci rozměrů a snížení vnitřního pnutí, což je kritické zejména pro velkoformátové strukturální díly, kde vnitřní pnutí vede k deformacím dílu. Vláknem rovněž zvyšují modul pružnosti a zlepšují obrobitelnost materiálu narušením kontinuity matice, což usnadňuje tvorbu lámané třísky. U čistých termoplastů totiž vysoká poddajnost a nízká tepelná vodivost vedou při obrábění k lokálnímu tavení a degradaci geometrické přesnosti [10, 35, 38].

Ze zmiňovaných důvodů se tato práce věnuje právě zpracování kompozitních materiálů, konkrétně polypropylenu plněného 30 % krátkých skelných vláken (PP + 30 % GF), který díky dobrým vlastnostem a nízké ceně představuje průmyslový standard [10, 35, 38].

Přehled vybraných vlastností a doporučených procesních teplot pro nejčastěji využívané materiály v segmentu velkoformátového tisku je uveden v (Tab. 2).

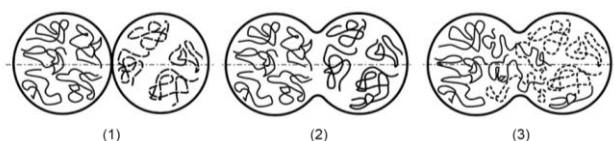
Tab. 2 Vybrané vlastnosti materiálů používaných v LFAM [37]

Vlastnost	ABS	PP	PETG	rPETG	PP+30%GF
Teplota zpracování [°C]	230–250	200–230	235–255	235–255	220–260
Pevnost v tahu [MPa]	45	35	50	42	85
Rázová houževnatost [J/m]	320	150	280	238*	95
Hustota [g/cm ³]	1,04	0,91	1,27	1,27	1,12
Citlivost na vlhkost	Střední	Nízká	Vysoká	Velmi vysoká	Nízká
Tendence ke kroucení	Vysoká	Velmi vysoká	Nízká	Nízká až střední	Střední
Chemická odolnost	Střední	Výborná	Dobrá	Dobrá	Výborná

2.1.9 Mechanismus tvorby mezivrstevného rozhraní

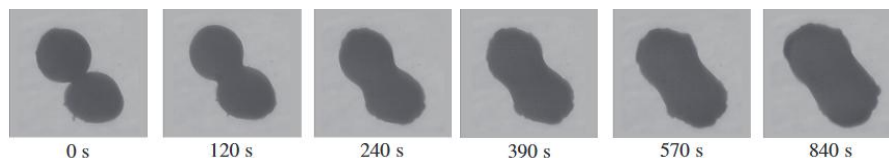
Mechanické vlastnosti a celková kvalita dílů vyráběných aditivními extruzními technologiemi jsou fundamentálně závislé na kvalitě mezivrstevného spoje [36]. Dosažení vysoké pevnosti tohoto rozhraní představuje kritickou výzvu, neboť přímo determinuje strukturální integritu, mechanickou únosnost a trvanlivost vytištěných objektů [39]. U funkčních a mechanicky namáhaných aplikací vede slabé mezivrstvé spojení k delaminaci vrstev², nebo předčasnému lomu a je hlavní příčinou výrazné mechanické anizotropie dílu. Pro spolehlivý tisk je nezbytné zpracovávat materiál v rámci optimálního procesního okna³. Tvorba spoje mezi dvěma polymerními vrstvami probíhá ve třech fázích (Obr. 2-17):

- 1) Fyzikální kontakt a smočení: Tavenina je extrudována na substrátní přičemž kvalita výsledného rozhraní je primárně závislá na teplotně závislé viskozitě polymeru, povrchové drsnosti substrátu a aplikovaném tlaku [36]. U extruzních technologií je těsného kontaktu dosaženo kombinací tepelné energie a lokálního hydrodynamického tlaku pod tryskou, který vtlačuje materiál do textury substrátu [36, 39].
- 2) Tvorba krčku: Vlivem povrchového napětí dochází k postupnému zvětšování styčné plochy mezi vrstvami a k tvorbě tzv. krčku. Pro úspěšný růst krčku musí mít materiál vhodnou viskozitu, což je závislé na teplotě a vlastnostech polymeru [39].
- 3) Molekulární difuze: V poslední fázi dochází k vzájemnému prolínání polymerních řetězců napříč rozhraním, čímž se vytvářejí nezbytné mezimolekulární propletence [36].



Obr. 2-17 Schéma tvorby spoje mezi dvěma polymerními vrstvami, upraveno dle [19]

Z hlediska termodynamiky je pro úspěšnou molekulární difuzi a vznik pevného spoje naprosto klíčový čas svaření, což je doba po kterou se teplota rozhraní udrží nad kritickou hranicí (Obr. 2-18). U amorfních polymerů musí být tato teplota nad teplotou skelného přechodu (T_g), aby řetězce získaly dostatečnou mobilitu k překonání rozhraní [8, 36].



Obr. 2-18 Časový vývoj tvorby krčku a difuze u materiálu ABS P400 při konstantní teplotě (200 °C). [40]

² Delaminace vrstev představuje strukturální selhání aditivně vyráběného dílu, které se projevuje fyzickým oddělením (rozlepením) sousedních vrstev polymeru v ose Z, kde je mezivrstvý spoj přirozeně nejslabší.

³ Procesní okno představuje optimální rozmezí procesních parametrů, v jehož rámci lze daný materiál úspěšně a stabilně zpracovávat a dosáhnout tak kvalitního výsledného produktu bez defektů.

Krystalizační kinetika polypropylenu

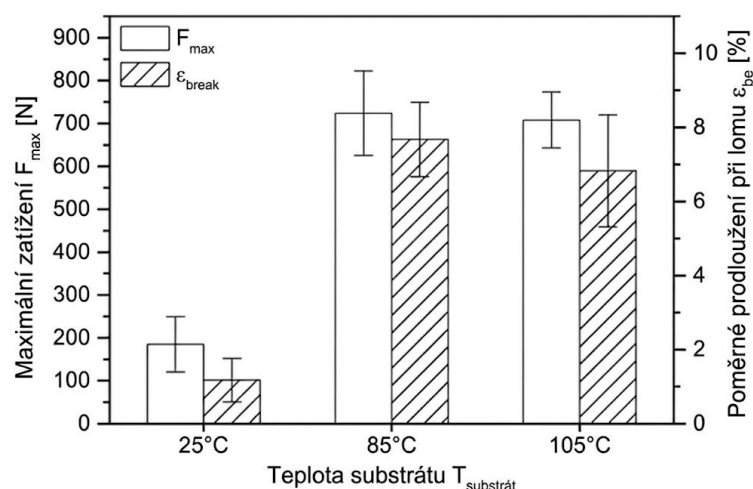
U semikrystalických polymerů, mezi které se polypropylen řadí, je dynamika tvorby spoje definována krystalizací. Aby mohla proběhnout úspěšná difuze, musí teplota na rozhraní lokálně překročit teplotu tání (T_m), čímž alespoň krátkodoběmu roztavení krystalických oblastí substrátu [36]. Nanesení horké vrstvy způsobí částečné natavení krystalických struktur zchladlé substrátní vrstvy. Toto lokální natavení je hlavním hybným mechanismem uvolnění řetězců PP pro jejich difuzi [36].

Zároveň však platí, že fyzický růst kontaktní plochy (krčku) může probíhat pouze do chvíle, než teplota klesne na teplotu krystalizace (T_c). Jakmile krystalizace započne, klesá mobilita řetězců a dochází k nárůstu viskozity, který další provazování mechanicky zastaví [36].

Studený spoj a termická historie u PP

Z povahy velkoformátového tisku vyplývá, že rozměry dílu a rychlost pohybu nástroje přímo determinují časovou prodlevu mezi nanesením dvou sousedních vrstev. Tato prodleva označovaná jako čas tisku vrstvy, představuje stěžejní faktor určující výslednou teplotu substrátní vrstvy v okamžiku depozice nové taveniny [41]. Tagscherer et al. upozorňují, že u rozměrných dílů tyto časy tisku vrstvy často překračují doporučené procesní okno [42]. Po jeho překročení klesne teplota předchozí vrstvy pod kritickou úroveň, nedojde k dostatečné difuzi molekul přes rozhraní a vzniká nekompletní fúzní spoj [42].

Extrémním případem tohoto jevu je hybridní aditivně-subtraktivní výroba, kde je tiskový proces záměrně přerušen kvůli obráběcí operaci, což vede k hlubokému prochlazení substrátu. Pokud teplota substrátní vrstvy klesne příliš nízkou, nedosáhne se na rozhraní požadovaných teplot a nedojde k uspokojivému stupni autoheze, což má za následek zásadní pokles mechanické pevnosti [36]. Tento rapidní pokles exaktně kvantifikovali Hertle et al. ve svých experimentech s polypropylenem (Obr. 2-19), kde zjistili, že při poklesu teploty substrátu z optimálních 85 °C na 25 °C klesla maximální nosnost spoje ve smyku ze 724 N na pouhých 185 N [36]. To představuje drastický propad pevnosti o zhruba 74 %.



Obr. 2-19 Závislost maximálního přeneseného zatížení mezi dvěma vrstvami na teplotě substrátu [36]

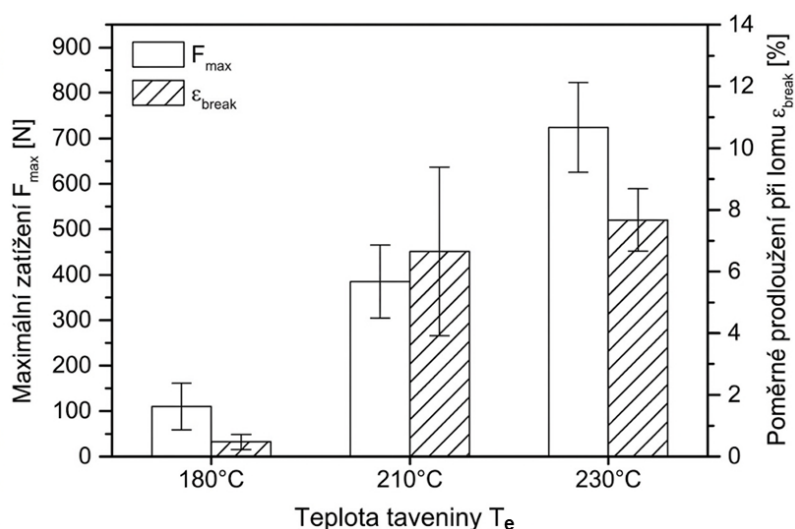
2.1.10 Vliv procesních parametrů na kvalitu výtisku

Tvorba kvalitního spoje je řízena termodynamickými mechanismy a časem. Míra, do jaké se tyto fyzikální předpoklady v reálném procesu naplní, je však plně determinována nastavením procesních parametrů. Tyto parametry určují celkovou termomechanickou historii materiálu a výslednou integritu i geometrickou přesnost dílu [2, 43].

Řízení extruze a teploty topných patron

Základními parametry extruzního procesu jsou otáčky šneku a teploty jednotlivých topných zón [7]. Samotné parametry však nejsou mezi různými systémy LFAM univerzálně přenositelné, neboť reálný průtok materiálu je determinován vlastnostmi konkrétního extruderu, například délkou kompresní a dávkovací zóny šneku nebo tepelnou kapacitou komponent či počtem topných zón. Rozhodujícím faktorem pro kvalitu tisku je tak reálná teplota polymerní taveniny v ústí trysky neboli extruzní teplota označená jako T_e , která určuje počáteční viskozitu materiálu a množství vnesené tepelné energie [36, 39].

Zvýšení teploty extruze vede k výraznému nárůstu únosnosti rozhraní, neboť materiál s nižší viskozitou a vyšší tepelnou energií snáze tvoří krček a déle setrvává v čase svaření [35, 39]. Hertle et al. při experimentech s polypropylenem (Obr. 2-20) zjistili, že při konstantní teplotě substrátu 85 °C vedlo zvýšení extruzní teploty ze 180 °C na 230 °C ke skokovému nárůstu maximální únosnosti spoje ve smyku ze 110 N na 724 N [36].

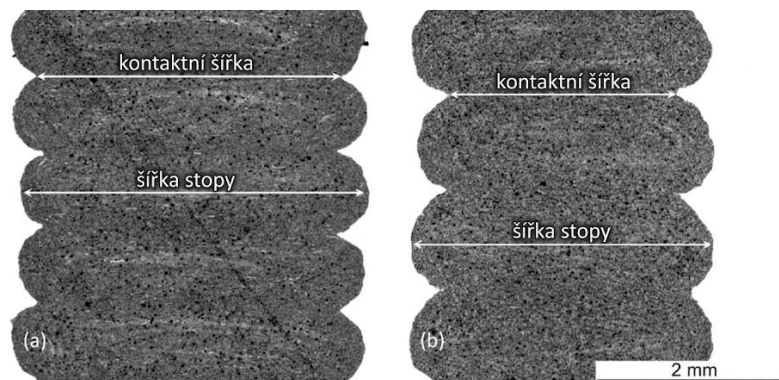


Obr. 2-20 Závislost maximálního přeneseného zatížení mezi dvěma vrstvami na teplotě taveniny [36]

Zvýšení teploty má však své fyzikální a vizuální limity. Při překročení kritické teploty taveniny dochází k tepelné degradaci polymerní matice, tvorbě pórů a nadměrnému pění, což se projevuje zhoršením rozměrové přesnosti i mechanických vlastností [36, 39]. Současně platí, že příliš vysoká extruzní teplota udržuje materiál po dlouhou dobu v nízko viskózním stavu, což vede ztrátě schopnosti materiálu udržet definovaný tvar, kdy spodní stěny nemají dostatečnou únosnost a bortí se pod tíhou dalších nanášených vrstev [41].

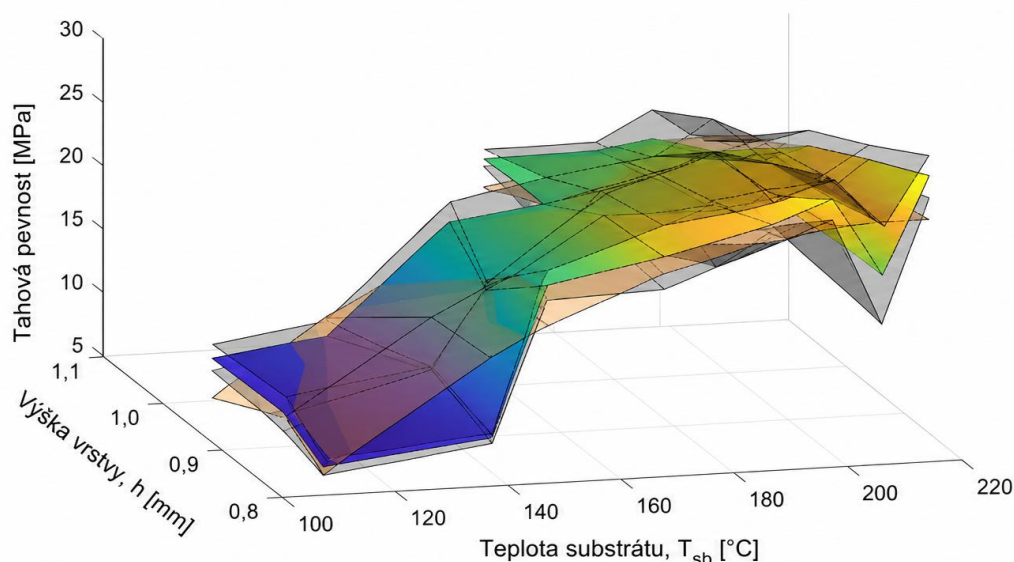
Řízení geometrie extrudované stopy

Rychlost pohybu robotického ramene v kombinaci s objemovým průtokem určuje finální geometrii tisknuté stopy, tedy její nominální a kontaktní šířku a její výšku (Obr. 2-21) [43].



Obr. 2-21 Vliv výšky vrstvy na šířku stopy, výška vrstvy a) 0,8 mm b) 1 mm, upraveno dle [41]

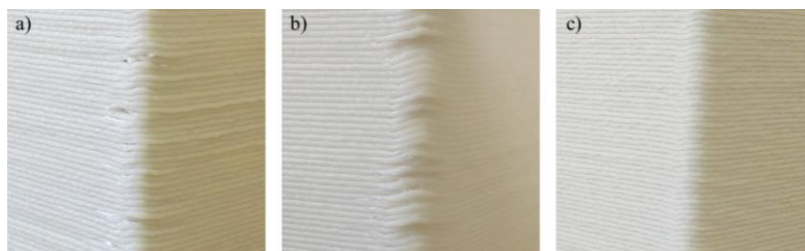
V případě rostoucí výšky tištěné vrstvy, při zachování konstantní rychlosti pohybu nástroje i objemovém průtoku materiálu, dochází k redukci celkové šířky tištěné stopy. Ještě výrazněji pak v tomto důsledku klesá kontaktní šířka mezi sousedními vrstvami, což omezuje jejich vzájemnou adhezi [41]. Tyto rozměrové parametry mají přímý vliv na mechanickou pevnost výsledného objektu. Obecně platí, že zmenšení výšky vrstvy vede k vyšší mezi pevnosti vztažené k šířce stopy. Menší výška vrstvy totiž zvyšuje kontaktní tlak mezi nově nanášenou taveninou a substrátní vrstvou, což vede k vyššímu poměru kontaktní šířky vůči celkové šířce stopy [41]. Tagscherer et al. experimentálně potvrdili, že při použití trysky o průměru 2 mm vedlo zvýšení vrstvy na 1,1 mm, k dosažení pouze 66 % pevnosti oproti nižším, optimalizovaným vrstvám (Obr. 2-22) [41].



Obr. 2-22 3D graf znázorňující závislost mezivrstvé pevnosti v tahu na výšce vrstvy a substrátní teplotě u materiálu PA6-40CF. Šedé plochy značí 95% intervaly spolehlivosti a oranžová plocha odpovídá vypočtenému lineárnímu regresnímu modelu [41].

Rychlost pohybu extruderu

Z hlediska vizuálních vlastností a geometrické přesnosti je translační rychlost kritická především pro kvalitu rohů a ostrých přechodů. Honarvar et al. při screeningu procesních parametrů u kompozitu PP-GF zjistili, že při výšce vrstvy 3 mm vedly depoziční rychlosti přesahující 30 mm/s k produkci velmi nekvalitních rohů (Obr. 2-23) [7]. Při dynamických změnách směru ve vysokých rychlostech nestihne tavenina dostatečně přilnout k podkladu a dochází k jejímu strhávání, čímž vznikají tvarové odchylky a necelistvosti dráhy [7].

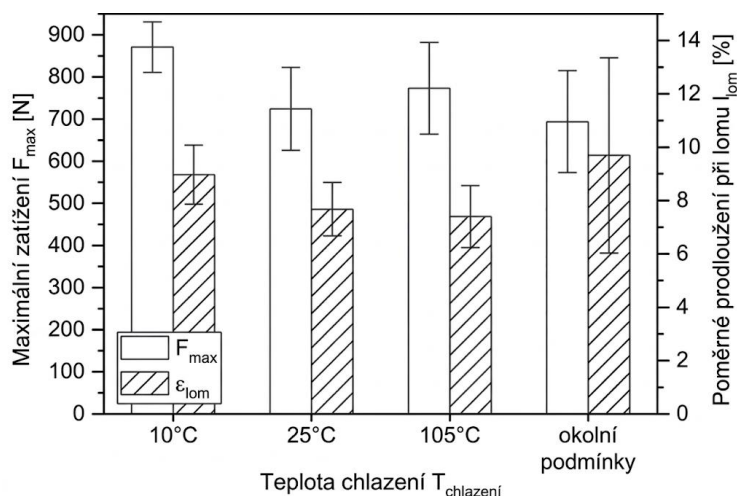


Obr. 2-23 Kvalita rohů tištěných vzorků. a) Nedostatečné natavení materiálu, b) Strhnutí materiálu vlivem vysoké rychlosti pohybu, c) Vyvážená kombinace parametrů [7]

Aktivní chlazení a vnitřní napjatost

U velkoformátového tisku je k minimalizaci hroucení materiálu často nutné využívat aktivní chlazení. Intenzita a způsob chlazení stopy přímo ovlivňují teplotní historii a rozvoj vnitřní napjatosti, přičemž fyzikální dopad se liší podle krystalické povahy materiálu [43].

U semikrystalických polymerů, jako je polypropylen, dochází při ochlazování k výraznému objemovému smrštění, které na rozhraní vrstev generuje silné smykové pnutí působící proti vazebným silám mezi vrstvami [36]. Hertle et al. prokázali paradoxní jev, aplikace externího chladicího systému tisknuté vrstvy vedla k vyšší pevnosti spoje mezi vrstvami a menší směrodatné odchylce v porovnání s přirozeným chlazením při teplotě okolí (Obr. 2-24) [36]. Tento jev autoři vysvětlují viskoelastickým modelem, kde prudká kontrakce vznikající bez užití externího chlazení, vyvolá sílu, která negativně ovlivňuje mezivrstvou pevnost [36].



Obr. 2-24 Závislost maximálního přeneseného zatížení mezi dvěma vrstvami na teplotě chlazení [16]

Naopak u amorfních, nebo méně smrštivých materiálů představuje příliš agresivní chlazení riziko. Wille et al. při testování aktivního ofuku stlačeným vzduchem prokázali, že nadměrné chlazení zkracuje dobu, po kterou se rozhraní nachází nad teplotou skelného přechodu, čímž omezuje prolínání makromolekul a vede k poklesu soudržnosti vrstev, až k delaminaci [43]. Aktivní chlazení je tak nezbytné primárně k zabránění kumulace tepla a deformacím u těles s krátkým časem vrstvy, avšak jeho samotná aplikace obecně snižuje mezivrstvou pevnost [43]. Výsledná kvalita tištěného dílu je vždy výsledkem balancování mezi dostatečnou tepelnou energií pro adhezi vrstev a nutností materiál ochladit pro dosažení tvarové stability [43]. Toto procesní okno je exaktně ohraničeno.

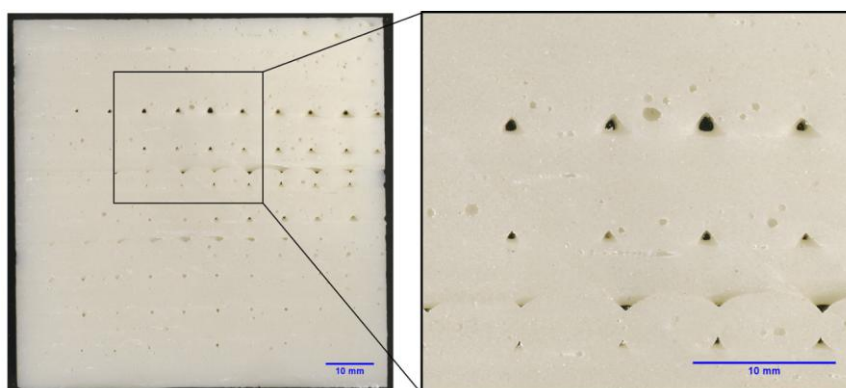
2.1.11 Typické defekty v technologii LFAM

Jak vyplynulo z předchozí analýzy, nevhodné nastavení procesních parametrů – vystoupení z procesního okna vede k narušení termomechanické rovnováhy a vzniku řady vizuálních i strukturálních vad. Zatímco defekty jako hroucení stěn, strhávání rohů či tepelná degradace, které jsou přímým důsledkem extrémů v teplotě a rychlosti depozice, byly definovány dříve, tato kapitola se zaměřuje primárně na makroskopické deformace plynoucí z vnitřního pnutí a na mikrostrukturní defekty omezující mechanickou integritu dílu

Porozita a mikrostrukturní necelistvosti

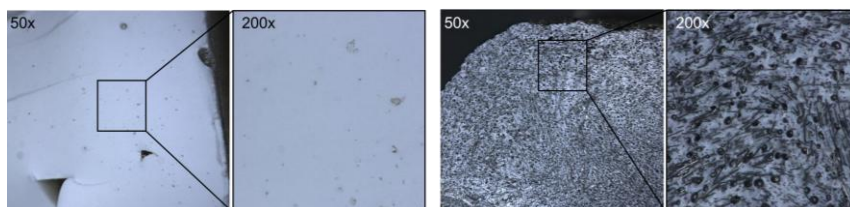
Přítomnost dutin v materiálu působí jako koncentrátor napětí a významně snižuje efektivní průřez pro přenos zatížení. V technologii velkoformátové extruze polymerů lze z hlediska morfologie identifikovat dva primární typy porozity [32]:

- Mezistopová porozita vzniká v důsledku tvaru extrudované stopy. Materiál vystupující z trysky získává přirozeně oválný průřez, což při skládání drah neumožňuje dokonalé vyplnění pravoúhlého prostoru (Obr. 2-25). To vede ke vzniku prázdných dutin v místech styku sousedních stop i jednotlivých vrstev vlivem omezeného difuzního spojení a nedostatečného přitlačení materiál u strategií s více než jedním perimetrem [35].



Obr. 2-25 Průřez výtisku se značnou mezistopovou porozitou, vpravo třikrát zvětšeno [32]

- Vnitřní porozita stopy se projevuje jako drobné póry vznikající přímo uvnitř mikrostruktury deponované stopy. Bylo zjištěno, že ačkoliv je pro velkoformátový tisk výhodné používat kompozitní materiály, samotné přidání výztužných vláken do polymerní matrice vede k prokazatelnému nárůstu vnitřní porozity (Obr. 2-26) [32]. Dalším zdrojem těchto necelistvostí je uvolňování těkavých látek při vysokých extruzních teplotách [32].



Obr. 2-26 Porovnání vnitřní porozity stopy mezi čistým ABS (vlevo) a ABS vyztuženým 13 % uhlíkových vláken, které mají průměr asi 5 μm (vpravo). Upraveno dle [32]

Deformace vnitřním pnutím

Kroucení dílu vlivem vnitřního pnutí představuje jeden z nejkritičtějších problémů velkoformátového tisku, a to obzvláště při zpracování semikrystalických polymerů. Fyzikální podstatou tohoto jevu je tepelná kontrakce materiálu během chladnutí. Nově nanesená horká vrstva se při ochlazování přirozeně smršťuje, čemuž brání již ztuhlé a chladnější spodní vrstvy [38]. Vzniklý teplotní gradient generuje vysoké vnitřní smykové pnutí a ohybové momenty, které vedou k deformacím dílu a k jeho případnému odtržení od tiskové podložky [1, 38]. Ačkoliv k tepelnému smršťování dochází u všech polymerů, s rostoucím objemem vytištěného materiálu se tyto tendence umocňují (Obr. 2-27 vlevo) [2].

Mezivrstvá delaminace

Pokud reziduální napětí vyvolané krystalizačním smršťováním překročí lokální únosnost spoje mezi jednotlivými vrstvami, dochází k jejich vzájemnému odtržení (Obr. 2-27) [1, 35, 38]. Iniclace těchto trhlin nastává primárně v místech s nejvyšší rychlostí chladnutí. Příliš rychlé zchladnutí vrstvy zkracuje dobu nezbytnou pro vzájemné prolínání polymerních řetězců, což drasticky omezuje makromolekulární fúzi. Tento defekt je přímým důsledkem vzniku studeného spoje, jehož fyzikální podstata byla popsána v kapitole 2.1.9 [38].



Obr. 2-27 Výtisk karoserie automobilu s rozsáhlými deformacemi vlevo, mezivrstvá delaminace vpravo

2.1.12 Mechanické vlastnosti velkoformátových dílů a jejich testování

Jak vyplynulo z předchozích analýz, termomechanická historie procesu extruze a chladnutí zanechává v materiálu specifickou mikrostrukturu. Důsledkem vrstveného ukládání materiálu je skutečnost, že výtisky jsou výrazně anizotropní a kvalita mezivrstvého spoje je zásadní pro celkovou pevnost dílu [39]. Vzhledem k tomu, že se mechanické vlastnosti dramaticky liší v závislosti na orientaci zatěžování vůči směru uložení tiskových drah, je nezbytné tyto charakteristiky testovat pomocí specializovaných postupů [32].

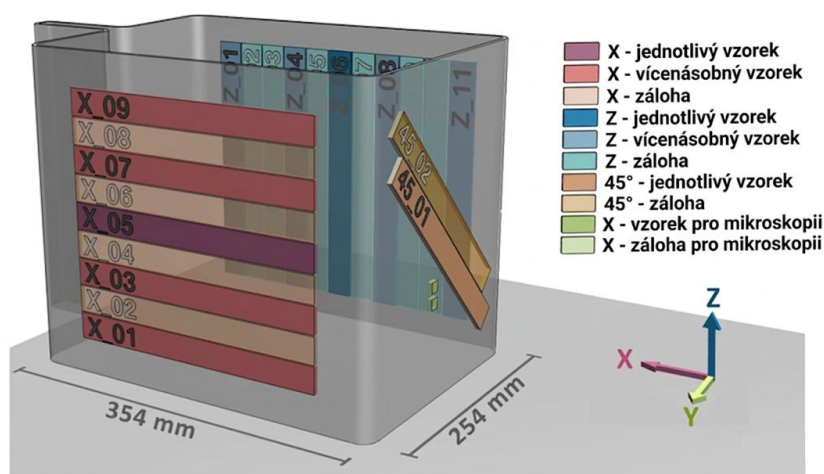
Extrakce a příprava zkušebních těles

Zásadním specifikem hodnocení v technologii LFAM je skutečnost, že zkušební vzorky se netisknou samostatně jako individuální tělesa normovaných tvarů. Důvodem je, že malé samostatné těleso vykazuje zcela odlišný časový interval nanášení vrstev, a tudíž i jinou teplotní historii a vnitřní napjatost než reálný rozměrný díl. Vzorky pro mechanické zkoušky se proto vyřezávají přímo z vytištěných celků, nejčastěji z obdélníkových struktur [32, 39].

K oddělování vzorků jsou využívány různé přístupy. Ve studiích zaměřených na kompozit PP-GF byly stěny vytištěných boxů rozřezány pomocí pásové pily, zatímco jiní autoři, například Tagscherer et al., využili řezání vodním paprskem [41]. V rámci přípravy se u tohoto postupu horních a spodních 25 mm výtisku záměrně odstraňuje, aby výsledky nebyly zkresleny přechodovými defekty vznikajícími na začátku a konci procesu extruze [41].

Při extrakci vzorků z těchto celků se definují různé roviny namáhání (Obr. 2-28):

- **Směr X (podélný):** Zkušební těleso je vyříznuto a následně zatěžováno rovnoběžně s tiskovou podložkou, tedy podél extrudované stopy.
- **Směr Z (příčný):** Těleso je vyříznuto kolmo a zatěžováno na tiskovou podložku, napříč vrstvami. Tento směr je kritický pro identifikaci pevnosti mezivrstevných spojů.
- **Směr 45°:** Vzorek je vyříznut pod úhlem pro posouzení kombinovaného namáhání a smykového chování [41].



Obr. 2-28 Schéma rozdělení tisknutého tělesa na zkušební vzorky pro tahovou zkoušku [41]

Klíčovým aspektem pro získání relevantních výsledků je zachování povrchové struktury. Povrch vzorků není po extrakci žádným způsobem mechanicky upravován a tělesa jsou testována v surovém stavu po tisku. Toto zachování struktury je nezbytné, neboť povrchové nerovnosti fungují jako přirozené koncentrátoři napětí a zásadně ovlivňují iniciaci lomu [7]. Před testováním mohou být vzorky kondicionovány v klimatické komoře, například při teplotě 70 °C a vlhkosti 62 % v souladu s normou DIN EN ISO 1110, což uměle urychluje degradaci a simuluje stav materiálu při reálném provozu [41].

Metodika a typy mechanických zkoušek

Protože pro hodnocení mechanických vlastností velkoformátových výtisků neexistuje samostatná norma, vychází se ze zkušebních norem pro konvenční plasty a kompozity [35]. Vzhledem k charakteristickému vlnitému povrchu výtisků musí být po odstranění otřepů tloušťka a šířka každého vzorku proměřena na několika místech. Tato data jsou nezbytná pro stanovení efektivní plochy průřezu použité při výpočtu napětí [41].

Vyhodnocování tahového napětí se dělí na dva základní přístupy. Obecná pevnost uvažuje celkovou šířku extrudované stopy. Nominální pevnost je naproti tomu definována na základě skutečné kontaktní šířky spoje mezi jednotlivými vrstvami (Obr. 2-21) [41]. Stanovení nominální pevnosti vyžaduje změření efektivní styčné plochy pomocí optické mikroskopie, jelikož standardní měření tloušťky posuvným měřítkem nedokáže postihnout hloubku mezer mezi drahami [41].

Podle metodiky Tagscherer et al. se volba konkrétního průřezu odvíjí od charakteru tištěné struktury [41]. Výsledky založené na celkové šířce vzorku jsou určeny primárně jako vstup pro výpočty a numerické simulace tenkostěnných dílů. Pro modelování mechanických vlastností vícestěnných struktur je relevantní nominální pevnost. Tento parametr nejlépe reprezentuje vnitřní soudržnost materiálu bez vlivu vnější geometrie jednotlivých stop [41].

Vlastní experimentální ověření zahrnuje tahové zkoušky pro stanovení meze pevnosti v tahu a posouzení soudržnosti ve směru osy Z. Pro testování se využívají vzorky v souladu s normou DIN EN ISO 527-4 (Obr. 2-29) [41, 42]. Odolnost vůči ohybovému namáhání je hodnocena pomocí ohybových zkoušek dle ISO 178 (Obr. 2-29) [7].

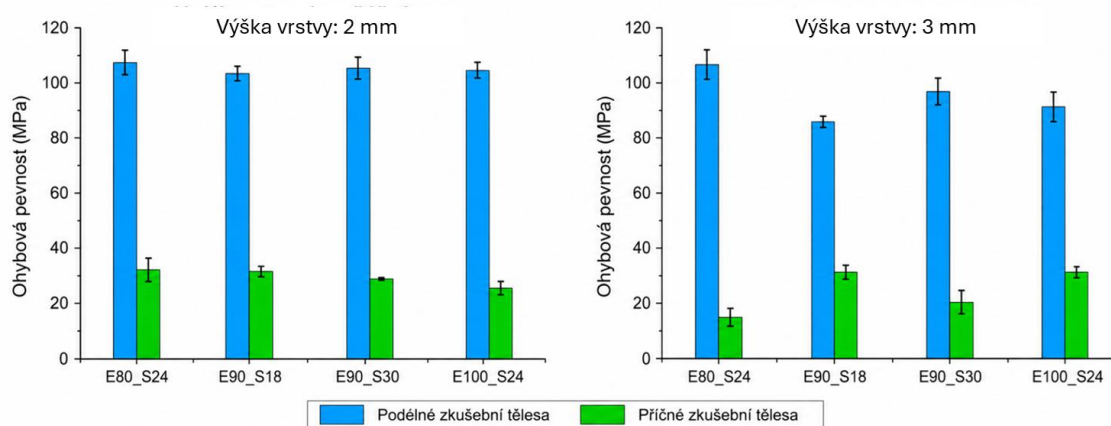


Obr. 2-29 Testování mechanických vlastností vzorků LFAM, zkouška v ohybu vlevo, zkouška v tahu vpravo

Mechanické vlastnosti dílů z PP + 30 % GF při velkoformátové výrobě

Mechanické vlastnosti recyklovaného PP s 30 hm. % skelných vláken při velkoformátové výrobě hodnotili Honarvar et al. [7]. Autoři sledovali vliv výšky vrstvy, rychlosti depozice a otáček extruderu na geometrii stopy a ohybovou pevnost vzorků vyřezaných z velkoformátově tištěných boxů. Testována byla tělesa ve směru uložených vrstev, a v příčné orientaci, kde výsledek více závisel na kvalitě mezivrstvého spojení [7].

Nejvyšší ohybová pevnost v podélném směru dosáhla přibližně 108 MPa. V příčném směru byla maximální hodnota pouze 34 MPa, zatímco nejnižší hodnota příčných vzorků klesla až na 14 MPa. Výsledky jsou zobrazeny v Obr. 2-30. Nejlepší příčná pevnost tedy odpovídala přibližně 31 % nejlepší podélné pevnosti. Rozdíl mezi oběma směry zatěžování byl proto i při optimalizovaném procesním okně výrazný a potvrzoval, že mechanické vlastnosti LFAM dílů z PP + 30 % GF byly primárně omezeny kvalitou mezivrstvého rozhraní [7].



Obr. 2-30 Ohybová pevnost vzorků s výškou vrstvy 2 mm vlevo a 3 mm vpravo

Teplotní analýza Honarvar et al. doplnila mechanické zkoušky o sledování mezivrstvé teploty. Po tepelné stabilizaci zůstala teplota rozhraní ve 20. vrstvě u všech testovaných parametrických kombinací nad teplotou krystalizace materiálu. Honarvar et al. uváděli pro recyklovaný PP + 30 % GF teplotu krystalizace 113 °C, přičemž pro nerecyklovaný PP + 30 % GF byla uvedena hodnota 114 °C. Při výšce vrstvy 2 mm se hodnoty po prvním ochlazení pohybovaly přibližně mezi 152 a 160 °C, při výšce vrstvy 2,5 mm mezi 160 a 165 °C a při výšce vrstvy 3 mm klesaly až ke 140 °C. [7].

Z hlediska procesních parametrů byly nejlepší výsledky dosaženy při výškách vrstev 2 a 2,5 mm. Podélné vzorky při těchto výškách dosahovaly pevností nad 100 MPa, zatímco výška vrstvy 3 mm vedla k častějšímu poklesu pevnosti i ke zhoršení kvality rohů. U příčných vzorků byla podle regresního vyhodnocení významným faktorem zejména výška vrstvy. Autoři dále uvedli, že při výšce vrstvy 3 mm neměla rychlost depozice překročit 18 mm/s, protože většina vzorků s touto výškou vrstvy vykazovala zhoršenou kvalitu rohů. U výšky vrstvy 2,5 mm byla jako méně vhodná uváděna rychlost depozice 30 mm/s, zatímco stabilnější výsledky byly spojeny s nižší rychlostí depozice [7].

2.1.13 Strategie potlačení efektu studeného spoje

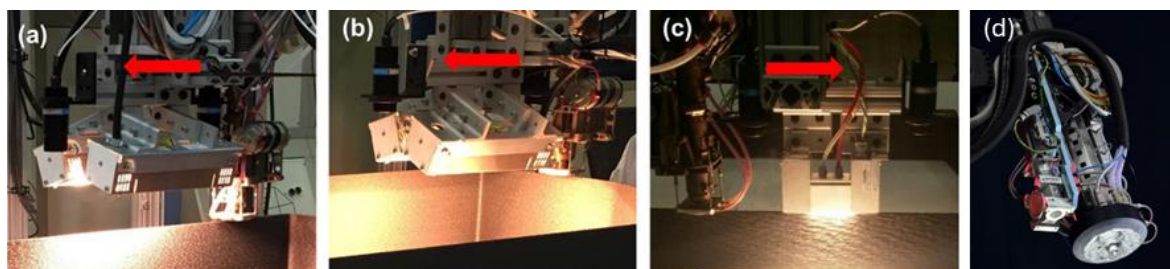
Integrita mezivrstevového rozhraní představuje zásadní technologickou bariéru, která limituje pevnost a definuje vysokou míru anizotropie velkoformátových výtisků. Tento problém je nejvíce patrný v segmentové a hybridní výrobě, kde technologické prodlevy výrazně překračují kritický čas svaření. V extrémních případech dochází k depozici taveniny na substrát o teplotě okolí, což znemožňuje difuzi polymerních řetězců (viz kapitola 2.1.9). Pro potlačení negativních dopadů studeného spoje se v současném výzkumu uplatňují tři hlavní směry spojení segmentů a to tepelný, chemický a mechanicko-tvarový. [42].

Tepelná obnova mezivrstevového spoje

Tyto strategie jsou založeny na lokálním dodání tepelné energie do zchladlého substrátu bezprostředně před depozicí nové vrstvy [39].

Předehřívání infračervenými zářiči: Tagscherer et al. (2022) aplikovali integraci dvou IR zářičů o výkonu 150 W bezprostředně před a za extruzní trysku při tisku kompozitu PA6 (Obr. 2-31) [42]. Tento zásah prokazatelně zvýšil tahovou pevnost zchladlých vzorků tak, že se přiblížila referenčním hodnotám dílů tištěných v optimálním teplotním okně. Limitujícím faktorem je však obtížná regulace, kde nadměrný výkon nebo dlouhá expozice u krátkých drah mohou způsobit deformaci či hroucení stěn, nebo roztavení detailů [8, 42].

Lokální předehřev pomocí LED: Alternativu představují systémy využívající vysoce výkonné LED diody, jako je například zařízení DEMEX (Obr. 2-31) [44]. Systém operuje ve viditelném spektru a umožňuje lokalizovaný ohřev substrátu. Limitací je však silná závislost na barvě materiálu; u tmavých polymerů je absorpce energie efektivní, u světlých či transparentních kompozitů dochází k odrazu záření, což účinnost ohřevu snižuje. Přes vysokou míru kontroly procesu je nevýhodou těchto systémů vysoká pořizovací cena [44].



Obr. 2-31 Tepelná obnova mezivrstevového spoje: (a-c) pomocí IR zářičů [8] (d) pomocí zařízení DEMEX [44]

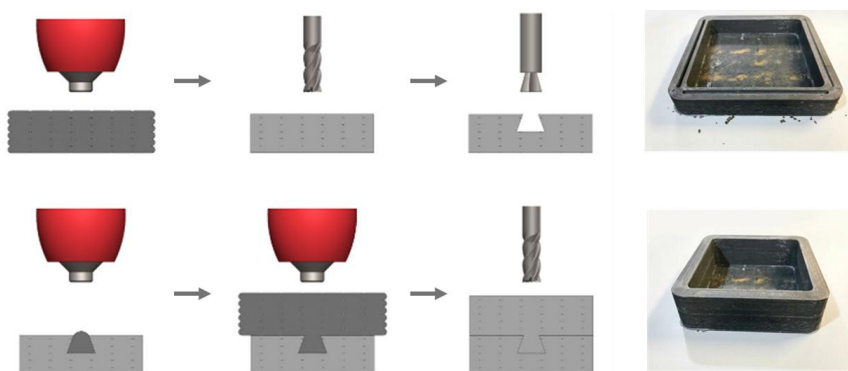
Chemický spoj

Tyto metody modifikují strukturu povrchu pro zvýšení afinity a molekulárního propojení [9]. Výzkum se zaměřuje na úpravu povrchové chemie studeným plazmatem nebo na integraci reverzibilních chemických vazeb do materiálů se schopností automatické regenerace [9]. Z hlediska plné automatizace jsou však tyto metody problematické, neboť aplikace adhezních promotérů často vyžaduje manuální zásah do výrobního cyklu [9].

Tvarový spoj

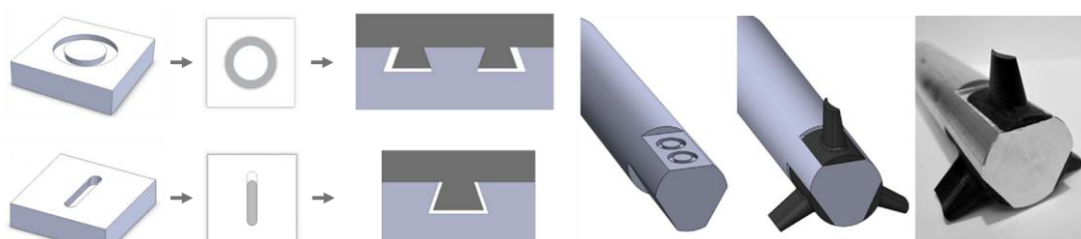
V hybridních procesech, kde dochází ke zchladnutí substrátu vlivem obrábění, se nabízí řešení formou obrábění a následné přetisknutí geometrických zámků [6]. Tento přístup nespolehlivě plně na obnovu fúzního svaru, ale využívá tvarového spoje. Zásadní výhodou je skutečnost, že pevnost spoje není závislá na termodynamické či chemické kompatibilitě materiálů. To umožňuje vytvářet spoje mezi zcela nesoudržnými materiály, jako je kombinace kovu a polymeru, kde k molekulární difuzi nedochází [6]. Tento princip rozpracoval výzkumný tým kolem E. Weřlena ve dvou navazujících experimentálních studiích [6, 45].

Iterativní tisk polymer-polymer: První práce se zaměřila na strukturální rozhraní vznikající při střídání aditivní extruze a obrábění kompozitu ABS s 20 % obsahem uhlíkových vláken [6]. Experimentální metodika spočívala ve vyfrézování drážek různých geometrií do vytištěné polymerní základny. Do drážek byla následně deponována horká tavenina, po zaplnění drážky se pokračovalo v extruzi a tisku dalších vrstev. Takto vznikl další segment, s původním segmentem spojený pomocí tvarového spoje (Obr. 2-32) [6].



Obr. 2-32 Znárodnění postupu tvorby tvarového spoje pomocí přetisknuté drážky [6]

Multi-materiálový spoj kov-polymer: Na tento výzkum navázala druhá studie aplikující princip tvarových zámků pro spojení hliníkového substrátu a extrudovaného kompozitu ABS-CF [45]. Experimentálně byl potvrzen zásadní vliv objemové kontrakce polymeru na stabilitu a integritu spoje (Obr. 2-33). U přímých, otevřených drah došlo během procesu tuhnutí k odtažení polymeru od stěn drážky, což vedlo k uvolnění zámku. Tvarové uzamčení se ukázalo jako funkční pouze u uzavřených nebo zvlněných trajektorií, kde smrštění materiálu vyvolalo efekt sevření, který zajistil pevné obemknutí vnitřní geometrie kovového substrátu a zvýšil tak mechanickou odolnost rozhraní (Obr. 2-33) [45].



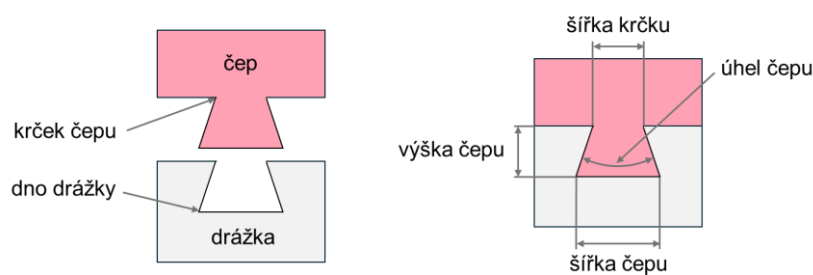
Obr. 2-33 Porovnání otevřené a uzavřené kontury drážky vlevo, případná aplikace vpravo [45]

2.1.14 Rybinový spoj

Úvod a motivace použití rybinového spoje

Rybinový spoj představuje typ tvarového zámku s charakteristickou lichoběžníkovou geometrií, která je tvořena komplementárním spojením čepu a drážky [46]. Podstatou tohoto konstrukčního řešení je tvarové uzamčení, které fyzicky zamezuje nedestruktivnímu rozpojení komponent v axiálním směru, přičemž k přenosu sil dochází přes kontaktní plochy. Geometrie spoje je určena klíčovými rozměry, mezi něž patří šířka krčku čepu, maximální šířka hlavy, celková hloubka zámku a úhel rozevření bočních ploch.

V rámci konstrukce jsou identifikována dvě hlavní kritická místa limitující celkovou únosnost. Prvním je krček čepu, který jakožto nejužší místo profilu představuje kritický průřez namáhaný tahem. Druhou kritickou oblastí je dno drážky, kde dochází k vysoké koncentraci napětí. Právě v této části dochází nejčastěji k selhání spoje v důsledku rozevření drážky, což vede ke ztrátě tvarového spoje a následnému vysunutí čepu [47].



Obr. 2-34 Popis konstrukce a geometrie rybinového spoje

Hlavní motivací pro aplikaci rybinového spoje v moderním inženýrství je nezávislost na chemické kompatibilitě materiálů spojovaných součástí a možnost eliminace chemických pojiv a mechanických spojovacích prvků, jako jsou nýty či šrouby [45, 46].

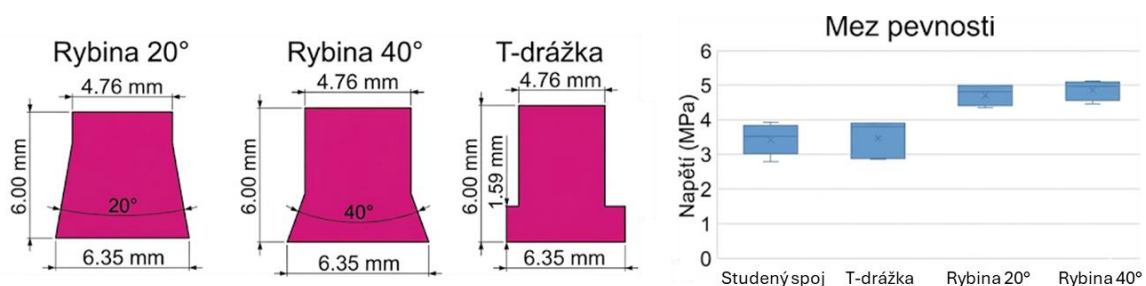
Typické aplikace v inženýrství

Dostupná literatura identifikuje několik klíčových oblastí nasazení:

- Dřevěné a historické konstrukce: V tradiční architektuře spojuje trámy a využívá anizotropie dřeva pro dosažení vysoké nosnosti a vynikající odolnosti vůči zemětřesení. Příkladem je například Zakázané město či dřevěné pagody [48].
- Letecký a strojírenský průmysl: Kritickou aplikací je ukotvení kořenů lopatek plynových turbín k rotoru, kde rybina odolává extrémním odstředivým silám, a dále využití v modulárních a sendvičových kompozitních strukturách [46].
- Biomedicína: Rybina zajišťuje mechanickou stabilitu u fixace zubních náhrad a implantátů, a to bez nutnosti použití potenciálně toxických lepidel [46].

Klíčové parametry ovlivňující únosnost

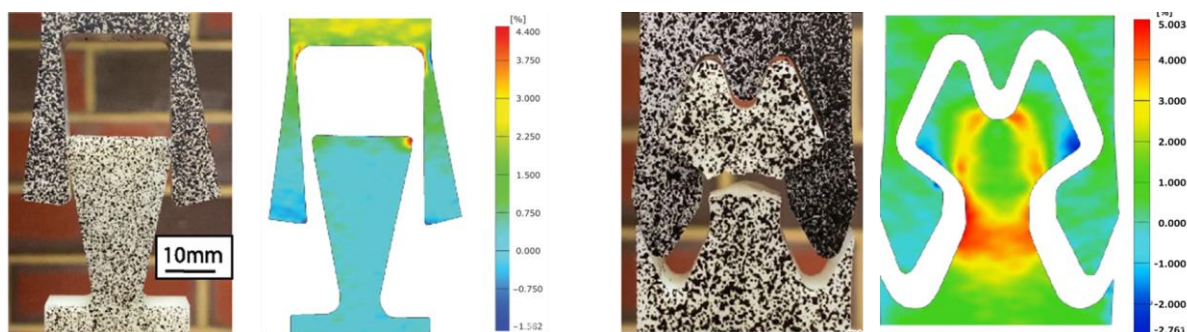
Zásadním parametrem únosnosti každého tvarového spoje je jeho geometrie. Weflen et al. v již zmiňované studii zaměřené na tvarové spojování segmentů při hybridní výrobě porovnávali rybinové drážky s úhly 20° a 40° se studeným tupým spojem vzniklým nanesením polymeru na obrobený substrát a dále s drážkou ve tvaru T (Obr. 2-35) [6]. Tahové zkoušky ukázaly, že profil T-drážky nepřinesl oproti tupému spoji zlepšení, což autoři přisuzují nedokonalému zatečení taveniny do ostrých rohů. Naproti tomu rybinové spoje vykazovaly výrazné zvýšení únosnosti. Varianta s úhlem 20° zvýšila mez pevnosti v tahu o 37 % a varianta s úhlem 40° o 41 % ve srovnání s plochým studeným spojem (Obr. 2-35). Hlavním omezením však zůstává, že výsledná pevnost tvarového zámku nedosahovala ani poloviny pevnosti mezivrstvého spoje při kontinuálním tisku [6].



Obr. 2-35 Geometrie obráběných drážek studie a jejich výsledná pevnost v tahu [6]

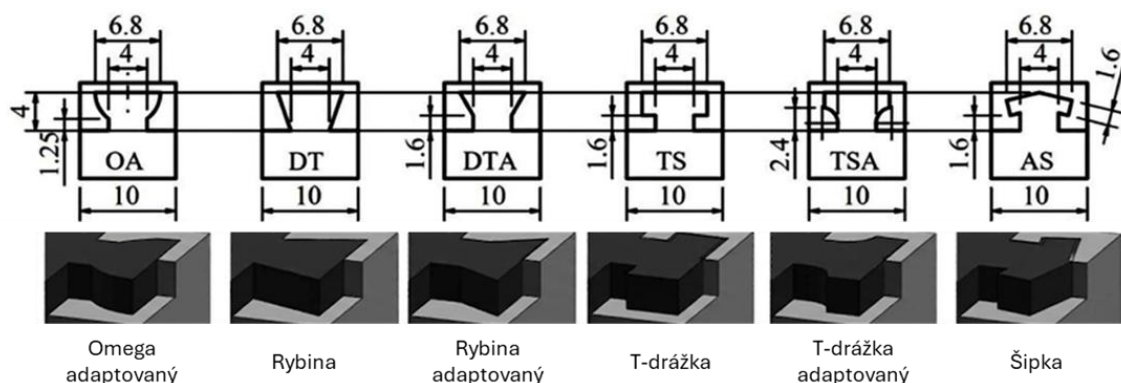
Účinnost rybinového zámku je kriticky závislá na jeho geometrii, která definuje kompromis mezi odporem proti vytažení a strukturální integritou krčku čepu. Výzkum zaměřený na uhlíkové kompozity, kde byl zkoumán široký rozsah úhlů rybiny od 8° do 48° , prokázal, že při fixní výšce čepu leží maximum tahové únosnosti v úzkém rozmezí 40° až 46° [48].

Naopak geometrie s velmi tupými úhly představují značná rizika. Výzkum hybridních spojů hliníkové drážky a nylonového čepu identifikoval kritický mechanismus selhání u úhlu 22° , kdy čep efektivně působil jako klín vyvolávající stranové rozevírání stěn drážky (Obr. 2-36) [47]. Tento jev způsobil ztrátu integrity spoje již při nízkém nominálním napětí 4,9 MPa, což představuje zásadní rozdíl ve srovnání s bio inspirovanými tvary s opěrnými zámky, které efekt rozevření snížily dokázaly přenést napětí až 22,6 MPa (Obr. 2-36) [47].



Obr. 2-36 Vlevo mechanický spoj rybinovou drážkou, vpravo mechanický spoj bioinspirovaným zámkem

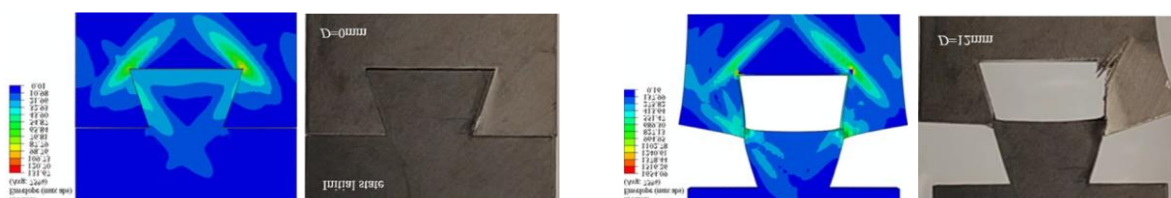
Mechanické zámky se úspěšně využívají i v multi-materiálovém 3D tisku na principu extruze filamentu pro spojení chemicky nekompatibilních polymerů [49]. V experimentech zaměřených na materiály ASA a TPU dosáhl nejlepších výsledků adaptovaný rybinový spoj s prodlouženým krčkem, který dosáhl meze pevnosti 10,22 MPa (Obr. 2-37) [49].



Obr. 2-37 Vzorky mechanických zámků multi-materiálového FFF tisku [49]

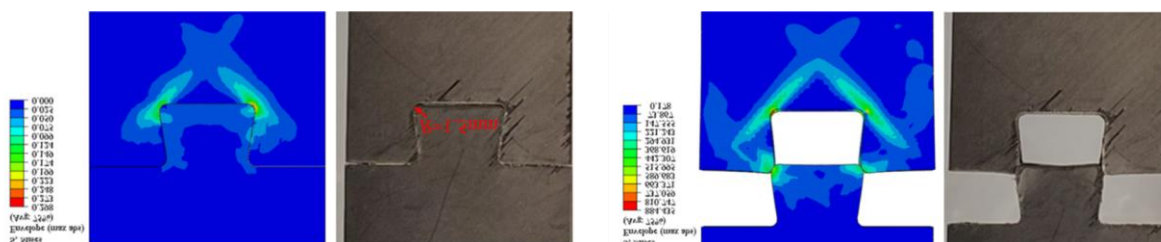
Rozložení napětí, kontaktní podmínky a iniciace porušení

Qin et al. prokázali, že mechanismus tvarového styku v rybinovém spoji generuje výrazné nehomogenní pole napětí, jehož charakter je silně závislý na poměru tuhostí obou komponent [48]. Numerické simulace v součinnosti s optickou analýzou deformací shodně identifikují dno drážky jako primární místo iniciace lomu [48]. U kompozitů vyztužených uhlíkovými vlákny dochází vlivem transformace tahového zatížení k tlakovému poškození matrice a následné destrukci vláken přímo ve vnitřních rozích drážky (Obr. 2-38) [48].



Obr. 2-38 Rozložení napětí a deformace v rybinovém spoji z uhlíkového kompozitu [48]

Ačkoliv je ve strojírenství zaoblování rohů standardem pro eliminaci vrubových účinků, u rybinových spojů může být tento zásah kontraproduktivní. Rádus ve dně drážky sice snižuje napětí na samotném čepu, ale zároveň zvýší koncentraci napětí v materiálu drážky a snižuje celkovou tuhost uložení, což vede k selhání při znatelně nižším zatížení [48].



Obr. 2-39 Rozložení napětí a deformace v rybinovém spoji se zaoblenými rohy z uhlíkového kompozitu [48]

2.2 Shrnutí hlavních zjištění

Velkoformátový 3D tisk polymerů představuje vysoce produktivní metodu výroby rozměrných dílů. Z technologických, geometrických či důvodů překročení rozměrových limitací pracoviště je často nezbytné tiskový proces rozdělit na dílčí prostorové jednotky, takzvané segmenty [4]. Tato dekompozice modelu umožňuje mimo jiné zkrátit celkové výrobní časy, nebo zvýšit tvarovou komplexitu bez nutnosti masivních podpůrných struktur, například tiskem každého segmentu v jiné orientaci extruderu vůči základnímu segmentu. Zásadním důvodem pro segmentové strategie je ale především možnost integrace obráběcích procesů, což umožňuje iterativní provoz hybridní aditivně-subtraktivní technologie [45].

Zásadním problémem segmentové strategie je vznik studeného spoje na rozhraní jednotlivých segmentů [6]. Nově nanášený materiál je ukládán na již vychladlý substrát, jehož teplota se blíží okolnímu prostředí, což zásadně omezuje vznik kvalitního difuzního spojení [8]. Pro vytvoření pevného mezivrstvého spoje je nezbytné, aby teplota v oblasti rozhraní zůstala po určitou dobu nad kritickou hodnotou umožňující difuzi polymerních řetězců [39]. U semikrystalických polymerů, mezi něž patří i polypropylen, musí být lokálně překročena teplota tání, aby došlo k natavení krystalických struktur a vzájemné reptaci makromolekul [39]. Po poklesu teploty pod krystalizační mez dochází k prudkému nárůstu viskozity a proces provazování řetězců se prakticky zastavuje [36].

Důsledkem absence účinné difuze je drastický propad mechanických vlastností v oblasti rozhraní [8]. Experimentální studie prokazují, že u studených spojů polypropylenu klesá pevnost spoje až na přibližně 20 až 25 % hodnot dosahovaných při kontinuálním tisku v optimálním teplotním okně [36, 41]. Tento jev je doprovázen vysokou anizotropií, v horších případech je studený spoj také zdrojem delaminace. Ta je způsobena kombinací vnitřního pnutí a objemových změn při chladnutí, které mohou vést k lokálnímu oddělení vrstev [39].

Literatura identifikuje přístupy, které se snaží tento problém eliminovat, například pomocí lokálního předehřevu substrátu pomocí laserových či infračervených zdrojů. Implementace těchto přístupů je ale v robotických buňkách technicky složitá z pohledu řízení procesu a ekonomicky náročná. V rámci hybridního procesu také přináší riziko tepelné a geometrické degradace již přesně obrobených funkčních ploch [6].

Alternativní přístup spojování segmentů představují strategie založené na využití tvarových spojů. Tyto metody kombinují obrábění a následnou depozici materiálu, kdy jsou do chladného substrátu vytvořeny definované geometrické prvky, například drážky, které jsou následně vyplněny taveninou. Výsledný spoj je tak založen nejen na adhezních mechanismech, ale i na mechanickém zaklínění materiálu. [6]. Experimentální výsledky ukazují, že vhodně navržené geometrie, například rybinové zámky, mohou zvýšit únosnost spoje o 37–41 % ve srovnání s depozicí na rovinný obrobený povrch [6].

2.3 Mezera v poznání

Navzdory prokázanému potenciálu mechanických zámků zůstává v současném stavu poznání několik významných bílých míst, která omezují jejich efektivní nasazení ve výrobě.

Prvním z nich je nedostatečné pochopení vlivu geometrie spojovacího prvku na výsledné mechanické vlastnosti. Dosavadní práce, reprezentované zejména studií Weflena et al., se zaměřily pouze na porovnání několika základních geometrií, jako jsou rybinové drážky s úhly 20° a 40° nebo T-drážky [6]. Zcela však chybí systematická analýza parametrů, jako jsou šířka, hloubka nebo tvarové poměry. Není tak dostatečně objasněno, jak tyto parametry ovlivňují rozložení napětí, iniciaci trhlin a mechanismy porušení. Z dostupných výsledků navíc vyplývá, že pevnost spoje nedosáhla ani poloviny pevnosti kontinuálního tisku [6]. Významným neprobádaným aspektem zůstává také vztah mezi geometrií drážky a charakteristickými rozměry tiskové stopy.

Další omezení souvisí s aplikačním rozsahem dosavadních experimentů. Předchozí experimenty byly realizovány v rámci relativně masivních tištěných dílů, tvořených více perimetry vedle sebe. Ve studii Weflena byla použita šířka vzorku 22 mm, tvořeného čtyřmi až pěti perimetry [6]. V praxi velkoformátového 3D tisku se ale velmi často setkáváme s díly, které jsou konstruovány jako tenkostěnné struktury tvořené pouze jedinou tiskovou stopou o šířce typicky 8 až 15 mm [7, 38]. Experimentální ověření funkčnosti těchto strategií pro jednovrstvé struktury proto zůstává otevřenou otázkou.

Funkčnost strategie byla ověřena v rámci obráběcího centra s vysokou tuhostí přesností a opakovatelností. V rámci systematické rešerše nebyl nalezen experiment, který by ověřil principy strategie na velkoformátovém pracovišti. V robotických systémech, které jsou typické pro velkoformátový tisk, však dochází k vyšším odchylkám v přesnosti polohování i stabilitě procesu. Vliv těchto faktorů na kvalitu vytvořeného spoje zatím nebyl zmapován.

Další dosud nedostatečně popsáný aspekt představuje vliv tlaku taveniny při vyplňování geometricky omezeného prostoru drážky. Na rozdíl od volné depozice je v tomto případě materiál částečně uzavřen, což může vést ke zvýšení kontaktního tlaku mezi taveninou a substrátem. Tlak taveniny přitom přímo ovlivňuje výslednou kvalitu kontaktu dvou vrstev polymer, což se podepisuje na výsledné kvalitě mezivrstvého spojení [36].

Chybějící poznatky se dají shrnout následujícími body:

- Není dostatečně popsán vliv geometrických a rozměrových parametrů mechanického zámku na výslednou pevnost spoje.
- Nebylo ověřeno, zda lze princip mechanického zámku spolehlivě realizovat na robotickém velkoformátovém pracovišti.
- Chybí experimentální ověření funkčnosti mechanických zámků u skořepinových výtisků tvořených jedním perimetrem.
- Nebyl popsán vliv přeextruze při vyplňování drážky na výslednou pevnost spoje.

3 CÍL PRÁCE

Cílem práce je objasnit vliv výrobních strategií na pevnost segmentových spojů u dílů vyráběných pomocí velkoformátové hybridní aditivně-subtraktivní technologie polymerů v robotické buňce

Dílčí cíle diplomové práce:

- identifikovat metody spojování segmentů s potenciálem využití ve velkoformátové aditivní výrobě polymerů
- vyvinout a ověřit procesní parametry pro spojování segmentů, zahrnující návrh parametrického algoritmu v prostředí Grasshopper pro generování výrobních drah a výrobu zkušebních vzorků
- navrhnout a integrovat hybridní strategie spojování segmentů, kombinující aditivní a subtraktivní kroky, včetně tvorby algoritmu pro návrh dráhové geometrie, nastavení technologických podmínek a výroby vzorků, včetně kalibrace a nutných úprav výrobního HW
- experimentálně ověřit, analyzovat a zhodnotit mechanické vlastnosti segmentových spojů vyrobených jednotlivými strategiemi

Druh výzkumu: aplikovaný výzkum

3.1 Výzkumné otázky

Jedna z možných strategií spojování segmentů spočívá v obrobení drážky do vychladlého primárního segmentu. Geometrie této drážky je situována symetricky k ose tiskové stopy a její trajektorie přesně kopíruje tisknutou stopu. V následném kroku je v rámci aditivní operace do obrobené drážky deponována nová tavenina, čímž vzniká tvarový zámek tvořící přechod do sekundárního segmentu. Pro stanovení mechanických vlastností a popis mechanismu selhání takto vytvořeného spoje, je zásadní studium vlivu geometrických parametrů drážky a procesního nastavení depozice taveniny, zejména vlivu vyplňování drážky objemem materiálu, který přesahuje její teoretickou kapacitu – takzvaná přextruze.

Výzkumná otázka 1:

Jak ovlivňuje geometrie obrobené drážky, včetně její polohy vůči tiskové stopě, výslednou pevnost segmentového spoje v tahu?

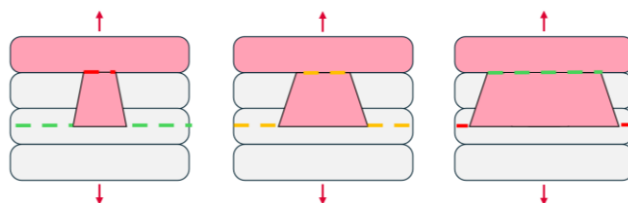
Výzkumná otázka 2:

Jaký vliv má míra přextruze při vyplňování drážky na celkovou pevnost hybridního spoje?

3.2 Hypotézy

Hypotéza 1 – Větší nosná šířka substrátu vede k vyšší pevnosti spoje

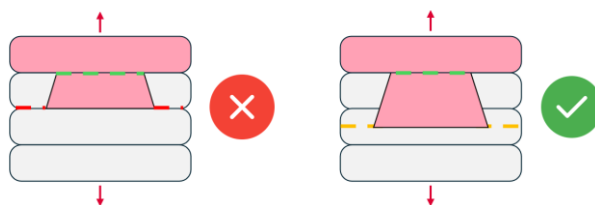
Pevnost segmentového spoje vykazuje nelineární závislost na šířce krčku drážky. Při malých šířkách je pevnost limitována mezivrstvým rozhraním v oblasti krčku. S jeho zvětšováním dochází k nárůstu únosnosti až do okamžiku, kdy se kritický průřez přesune do objemu substrátního segmentu. V tomto bodě dosahuje spoj maximální pevnosti. Další zvětšování šířky vede ke snížení pevnosti v důsledku oslabení nosného průřezu substrátu [47, 48].



Obr. 3-1 Schématické znázornění první hypotézy

Hypotéza 2 – Dno drážky ležící uvnitř tiskové stopy vede k vyšší pevnosti spoje

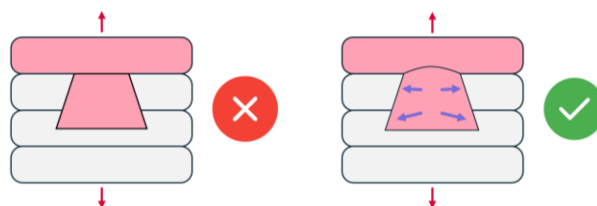
Umístění dna drážky v oblasti mezivrstvého rozhraní vede ke snížení pevnosti spoje oproti jeho umístění v homogenním objemu tiskové stopy. Důvodem je nižší soudržnost materiálu v mezivrstvém směru, která dosahuje pouze 13–33 % pevnosti materiálu ve směru tisknuté stopy, což podporuje iniciaci a šíření trhlin v této oblasti [7].



Obr. 3-2 Schématické znázornění druhé hypotézy

Hypotéza 3 – Cílená přeextruze drážky vede k vyšší pevnosti spoje

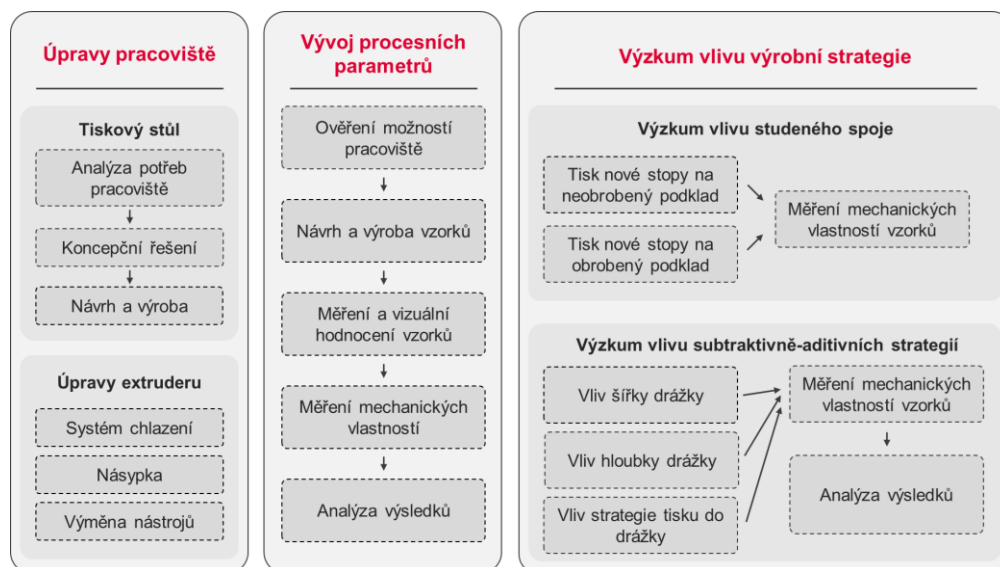
Při vyplňování drážky objemem taveniny převyšujícím její geometrickou kapacitu dochází vlivem omezení prostoru a viskozity taveniny k nárůstu lokálního tlaku. Tento tlak zvyšuje míru přítlaku taveniny k povrchu drážky, čímž dochází ke zlepšení smáčení a zvětšení skutečné kontaktní plochy mezi materiály. Vyšší stupeň těsného kontaktu podporuje vznik mezivrstvé vazby a tím tato záměrná přeextruze vede ke zvýšení pevnosti spoje [36].



Obr. 3-3 Schématické znázornění třetí hypotézy

4 MATERIÁL A METODY

Tato kapitola popisuje materiálové, přístrojové a metodické uspořádání experimentální části práce. V návaznosti na cíle a hypotézy uvedené v kapitole 3 byla metodická část rozdělena do tří navazujících částí viz schéma postupu na Obr. 4-1. První celek se zabýval popisem a úpravou experimentálního robotického pracoviště pro hybridní aditivně-subtraktivní výrobu. Druhý celek byl zaměřen na vymezení procesního okna a optimalizaci tiskových procesních parametrů pro materiál PP GF30 na použitém šnekovém extruderu. Třetí celek popisoval metodiku výzkumu vlivu výrobní strategie segmentového spoje na pevnost v tahu.



Obr. 4-1 Schéma postupu práce

Úprava robotického pracoviště zahrnovala zejména návrh tiskové platformy, úpravy extruderu D-Pro S, řešení chlazení a přípravu rozhraní pro střídání aditivních a subtraktivních operací. Tato část byla nezbytná pro dosažení opakovatelné polohy nástrojů, dostatečné tuhosti během obrábění a stabilních podmínek při výrobě zkušebních těles.

Vymezení procesního okna tisku materiálu PP GF30 sloužilo ke stanovení takového nastavení teplot, otáček šneku, rychlosti pohybu nástroje, geometrie stopy a intenzity chlazení, které umožňovalo stabilní výrobu modelových těles pro následné mechanické testování. Hodnocení procesních parametrů bylo provedeno na základě vizuálních, geometrických a technologických kritérií, vlastní výsledky jsou uvedeny v kapitole 5.

Výzkum vlivu výrobní strategie byl metodicky navržen jako soubor referenčních měření, screeningových experimentů, diagnostiky procesních nejistot, korekčních opatření a finálního plánovaného experimentu. Tato část zahrnovala návrh segmentového spoje, přípravu robotických trajektorií v prostředí Grasshopper a KUKA|prc, definici referenčních variant, výrobu modelových těles, obrobení zkušebních vzorků a metodiku tahových zkoušek.

4.1 Experimentální výrobní zařízení

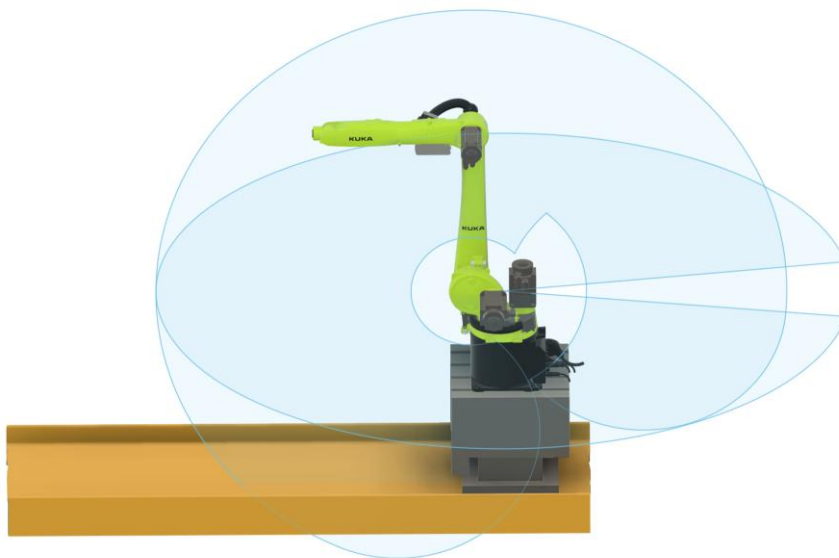
Experimentální část této práce a výroba vzorků byly prováděny na pracovišti robotické buňky pro hybridní výrobu, která spadá pod odbor revizního inženýrství a aditivních technologií Ústavu konstruování. Pracoviště bylo původně navrženo pro tiskové aplikace a během tvorby diplomové práce bylo stále fázi adaptace pro hybridní výrobu. Z tohoto důvodu bylo nutné provést některé konstrukční úpravy zařízení i v rámci diplomové práce za účelem eliminace geometrických odchylek a zajištění reprodukovatelnosti procesních podmínek. Robotické pracoviště je tvořeno následujícími prvky:

- Robotický manipulátor
- Tisková platforma
- Extruzní jednotka
- Systém dopravy materiálu
- Obráběcí vřeteno

V následujících kapitolách budou jednotlivé prvky robotického pracoviště popsány společně s úpravami provedenými v rámci diplomové práce.

4.1.1 Robotický manipulátor

Hlavním členem robotického pracoviště je šestiosé robotické rameno KUKA KR8 R1620, které má jmenovitou nosnost 8 kg a maximální dosah 1620 mm. Tento manipulátor disponuje relativně dobrou opakovatelností 0,04 mm (ISO 9283) [50]. Robot je společně s litinovým podstavcem připevněný k 3 m dlouhému I profilu jmenovitého rozměru 750 mm.



Obr. 4-2 Robotický manipulátor se znázorněným maximálním dosahem připevněný k základně

4.1.2 Tisková platforma

Výchozí stav tiskové platformy

Původní tisková platforma byla tvořena masivním litinovým odlitkem, na kterém byla uchycena lehká konstrukce z hliníkových úhelníků nesoucí vyhřívanou magnetickou tiskovou podložku o rozměrech 500×500 mm s možností výměnných magnetických desek. Platforma však nebyla pevně ukotvena vůči robotickému systému, a její relativní poloha vůči robotu tak nebyla jednoznačně definována.

Toto uspořádání umožňovalo nechtěný relativní pohyb platformy, například při nárazu obsluhy, což vedlo k nutnosti opakované kalibrace systému. Zásadním nedostatkem v kontextu hybridní subtraktivně-aditivní výroby byla rovněž nízká tuhost lehké hliníkové konstrukce, která nepříznivě ovlivňovala dynamické vlastnosti sestavy a kvalitu obrábění. Magnetická tisková podložka navíc není vhodná pro subtraktivní operace z hlediska tuhosti ani bezpečného upnutí obrobku, a tento koncept je proto pro obrábění nevhodný.



Obr. 4-3 Původní tisková platforma

4.1.3 Požadavky na nově vzniklou tiskovou platformu

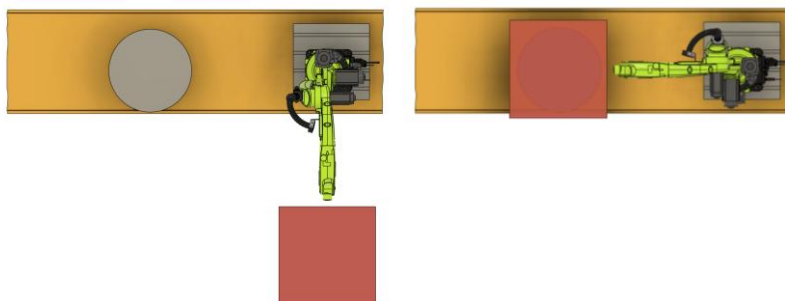
Nová tisková platforma musí mít pevně definovanou polohu vůči robotickému systému, dostatečnou tuhost pro zajištění kvality obrábění a univerzální konstrukci umožňující upnutí různých tiskových desek. Zároveň musí být umístěna tak, aby byl maximálně využit pracovní prostor robota, nebyla omezena funkce otočného stolu a bylo možné pracoviště efektivně zastřešit ochrannou buňkou při minimální zastavěné ploše.

Koncepty architektury robotického pracoviště

Cílem návrhu bylo vytvořit univerzální a tuhou platformu umožňující upnutí různých tiskových podložek, například vyhřívaných magnetických desek nebo standardních OSB desek. Tyto desky jsou v praxi velkoformátového tisku často využívány z důvodu hrubé struktury, která je vhodná mechanické zakotvení nanášeného polymeru, nízké ceny a možnosti přišroubování samotného výtisku k tiskové podložce pro eliminaci odtržení dílu.

První koncept uvažoval samostatný litinový stůl ukotvený k podlaze s nadstavbou z hliníkových extrudovaných profilů. Toto řešení neomezovalo funkci otočného stolu, avšak vyžadovalo větší půdorysnou plochu viz Obr. 4-4 vlevo.

Druhý koncept spočíval v návrhu platformy pevně uchycené k ocelovému I-nosníku o délce 3 m a průřezu 750 × 200 mm, na kterém je uložen robot. Toto řešení bylo prostorově úspornější, což vedlo k jeho zvolení. Nevýhodou konceptu byla nemožnost využití otočného stolu bez rekonfigurace pracoviště v podobě demontáže tiskové desky viz Obr. 4-4 vpravo.

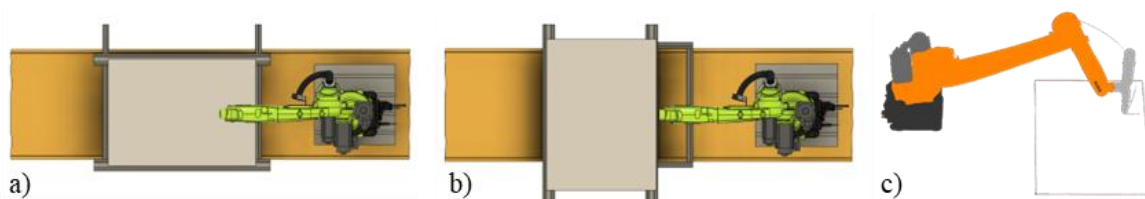


Obr. 4-4 Koncepty rozložení tiskového pracoviště

Předběžný návrh platformy

Platforma byla navržena kolem rotačního stolu o průměru 600 mm a s ohledem na použití standardních OSB desek o rozměrech 625 × 2050 mm (uvažuje se použití poloviny desky), čímž je definována minimální šířka desky umožňující bezpečné upnutí. Byly posuzovány dvě orientace desky vůči robotickému rameni a I-nosníku, přičemž kratší strana desky mohla být orientována rovnoběžně (Obr. 4-5 a), nebo kolmo k ose nosníku (Obr. 4-5 b).

Volba optimální orientace byla provedena na základě studie dosahů robotického ramene realizované v prostředí Grasshopper, která umožnila vyhodnotit dostupnost pracovního prostoru s využívaným nástrojem. Na základě této analýzy byla zvolena orientace s kratší stranou desky rovnoběžnou s osou I-nosníku viz Obr. 4-5 c).

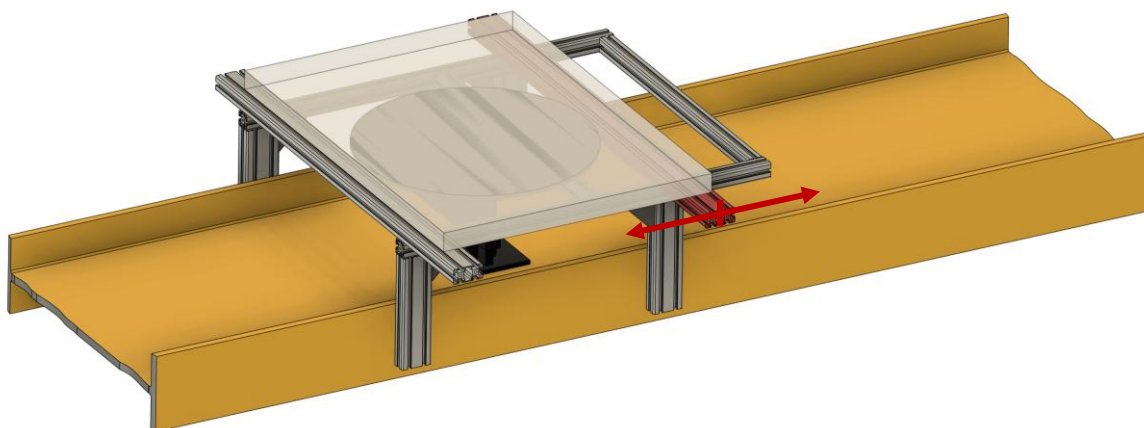


Obr. 4-5 Koncepty orientace tiskové platformy

Konstrukční návrh modulární tiskové platformy

Základna platformy byla konstruována jako samonosný rám z extrudovaných profilů 40×40 mm a 40×80 mm z hliníkové slitiny, který je pomocí šroubových spojů pevně uchycen k ocelovému I-profilu, který nyní nese celý robotický systém. Konstrukce zahrnuje čtyři výškově stavitelné nohy, obvodový rám a jeden pevný a druhý posuvný příčník.

Posuvný příčník (znázorněn červeně na Obr. 4-6) umožňuje přizpůsobení upínací rozteče a upnutí deskových materiálů o délce 600–1500 mm a šířce až 1400 mm. Tisková deska je k příčníkům uchycena šesti šrouby se zásuvnými maticemi vedenými v drážkách profilů.



Obr. 4-6 Model nově navržené tiskové platformy

Použitelné tiskové desky

V praxi byla platforma dimenzována zejména pro použití standardních OSB desek o rozměrech 625×2050 mm, přičemž nejčastěji byla využívána polovina desky. Tento rozměr představuje kompromis mezi maximálním využitím pracovního prostoru robota a dostatečnou plochou pro tisk velkoformátových vzorků. Finální podoba realizované platformy je na Obr. 4-7, vlevo v nekrytované konfiguraci s polypropylenovou deskou ve funkci tiskového podkladu a vpravo v krytované konfiguraci s umístěnou OSB deskou.



Obr. 4-7 Nově realizovaná modulární tisková platforma v nekrytované i krytované konfiguraci

4.1.4 Extruder D-Pro S

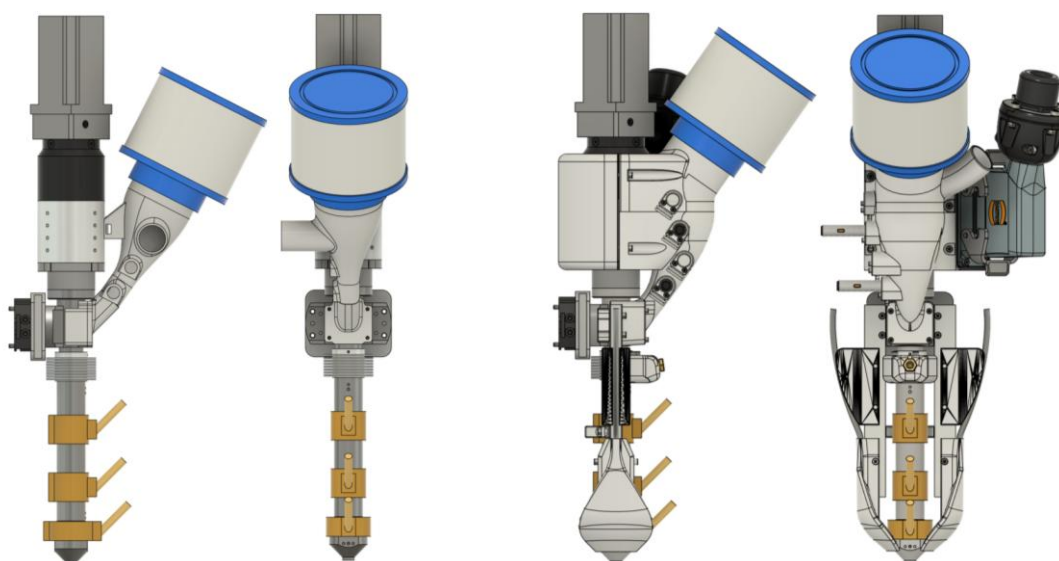
Aditivní část výroby v rámci hybridní buňky byla realizována pomocí šnekového extruderu D - Pro S (3Deposition, Česko) (Obr. 4-8) s parametry sumarizovanými v Tab. 3. Extruder byl v rámci práce upraven o nový systém chlazení tisknuté stopy a držák konektoru kabeláže umožňující výměnu nástrojů, porovnání s původní verzí je uvedeno v Obr. 4-8

Základní konstrukce extruderu

Hlavní nosnou komponentou extruderu je centrální těleso, které tvoří strukturní základ pro upevnění všech podsystémů. Prostřednictvím tohoto dílu se také zařízení připevňuje k přírubě robotického manipulátoru. V potřeby hybridní výroby byl mezi přírubu ramene a koncový efektor umístěn výměník nástrojů SWA-007 (Schunk GmbH & Co. KG, Německo) a deska pro odložení nástroje v dokovací stanici při střídání výrobních operací.

K dolní části centrálního tělesa je ze spodní strany našroubovaná komora se samotným šnekem. Zakončení komory je opatřeno vnějším závitem pro instalaci vyměnitelných trysek s různými průměry výstupního otvoru. Teplotní pole v procesu extruze je řízeno soustavou tří topných těles, z nichž dvě jsou umístěna na plášti tavné komory a třetí je připevněno přímo na tělese trysky. V horní části komory se nachází hliníkový žebrovaný chladič – heatbreak, tedy teplotní bariéra mezi opravní a přechodovou částí šneku viz kapitola 2.1.7.

Materiál ve formě granulátu je do procesu distribuován gravitačně z násypky upevněné k základnímu tělesu extruderu. Kontinuální doplňování materiálu do násypky je realizováno pneumatickým podavačem na principu Venturiho ejektoru. Pro monitoring a řízení hladiny materiálu v zásobníku slouží dvojice kapacitních senzorů, které detekují mezní stavy naplnění. Pohon extruzního šneku zajišťuje dvoufázový servomotor situovaný v horní části zařízení. Krouticí moment je přenášen přes planetovou převodovku a spojku s elastickým členem, která kompenzuje případné nesouososti a tlumí rázy v pohonném řetězci.



Obr. 4-8 Model extruderu D Pro-S v původní konfiguraci vlevo a finální konfiguraci vpravo

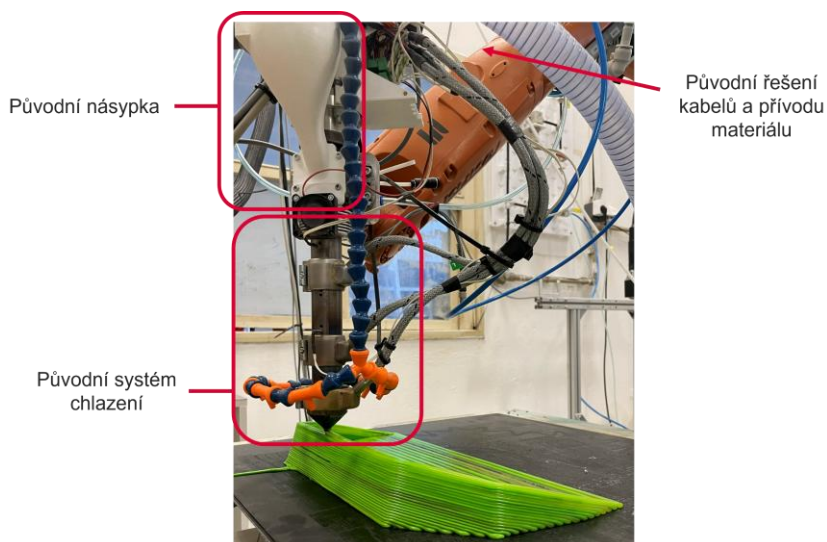
Tab. 3 Parametry extruderu D - Pro S

Parametr	Hodnota	Jednotka
Topný výkon	4 x 130	W
Průměr komory	18	mm
Poměr L/D	14:1	[-]
Kompresní poměr šneku	2,2:1	[-]
Kroutící moment motoru	3	Nm
Převodový poměr	20:1	[-]
Průměr otvoru trysky	2, 4, 6	mm

Původní stav extruderu a definice úprav

Původní konfigurace extruderu byla pro účely výzkumu vyhodnocena jako technicky nevyhovující, a to především z hlediska reprodukovatelnosti procesních parametrů. Provizorní charakter původního systému chlazení stopy neumožňoval exaktní replikaci procesních parametrů během výroby vzorků navazujících experimentálních měření. Kritickým prvkem se ukázala také konstrukce násypky, která v kombinaci používaným materiálem PP 30GF způsobovala nestabilitu toku taveniny a následnou nekonzistenci tisku.

V rámci implementace strategie iterativní hybridní výroby bylo dále nezbytné adaptovat extruder pro automatickou výměnu nástrojů v robotické buňce. Tato modifikace vyžadovala návrh spolehlivého uložení externí kabeláže a přívodu materiálu při současné integraci vyvažovacího zařízení. Poslední zásadní úpravou bylo zvýšení chladicího výkonu v oblasti heatbreaku, což vedlo k celkové změně koncepce systému jeho fungování. Nevyhovující moduly původního tiskového zařízení jsou znázorněny v Obr. 4-9.



Obr. 4-9 Extruder v původní konfiguraci

4.1.5 Úprava systému chlazení

Původní systém chlazení extrudované stopy byl realizován pomocí segmentových hadic s malým průřezem výstupních trysek, rozmístěných po obvodu kruhového prstence ve větší vzdálenosti od tiskové trysky. Proud vzduchu proto nebyl dostatečně koncentrován do oblasti bezprostředně u deponované stopy, což snižovalo účinnost chlazení. Dalším nedostatkem náchylnost ke kolizi při tisku s nakloněnou tiskovou hlavou, kdy mohlo docházet ke kontaktu chladicích prvků s podložkou nebo již vytvořenou geometrií. Hadice zároveň neměly dostatečnou tuhost, tak nebyla zajištěna opakovatelnost jejich polohy.

Systém chlazení – Požadavky na nové řešení

Na základě analýzy nedostatků původního řešení byly pro návrh nového systému chlazení stanoveny následující technické požadavky:

- přesně definovatelná a replikovatelná poloha chladicích trysek vůči tiskové trysce
- zachování plynulé regulace průtoku vzduchu pomocí řídicího systému
- zajištění mechanické stability systému nezávisle na kinematice robotu
- minimalizace rizika kolizí při tisku s nakloněným extruderem

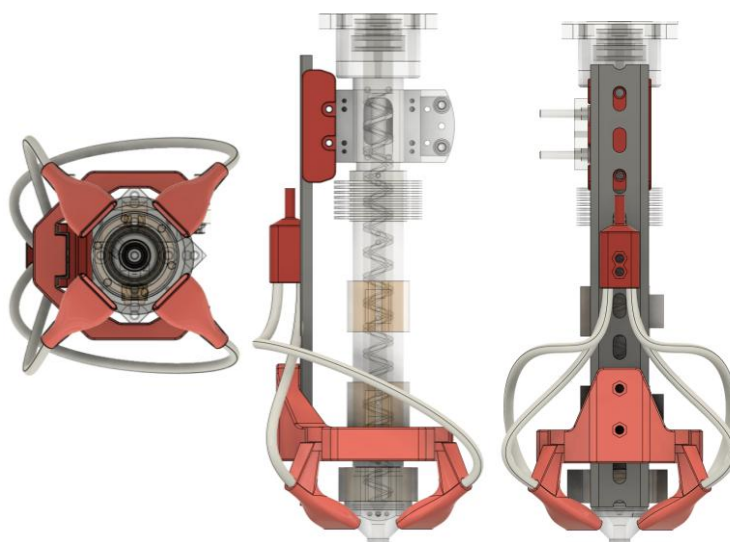
Systém chlazení – 1. iterace

První iterace byla navržena jako modulární systém integrovaný na těleso extruderu. Základem byl FDM tištěný nosič upevněný k centrální komponentě extruderu, na který byla instalována DIN lišta orientovaná ve směru osy extruderu. Lišta umožňovala výškové nastavení v rozsahu ± 5 mm a nesla poloprstenec ve tvaru písmene C sloužící jako montážní rozhraní pro chladicí trysky. Nosič byl navržen asymetricky, aby nedocházelo ke kolizi s elektroinstalací topných těles tavné komory.

Konstrukce umožňovala instalaci až čtyř FDM tištěných trysek s difuzorovou geometrií, která převáděla kruhový přírodní průřez na široké zploštělé ústí. Tím bylo dosaženo rozptýleného, ale směrově řízeného proudění vzduchu, které bylo podle literatury vhodné pro chlazení deponovaného polymeru [42]. Každá tryska byla připojena samostatnou hadicí ke společnému rozdělovači. Shodná délka hadic zajišťovala obdobný tlakový spád a symetrické rozdělení průtoku. Celý systém byl napojen na pneumatickou jednotku s proporcionálním ventilem a zpětnou vazbou z průtokového senzoru. První iterace je zobrazena na Obr. 4-10.

Zhodnocení první iterace

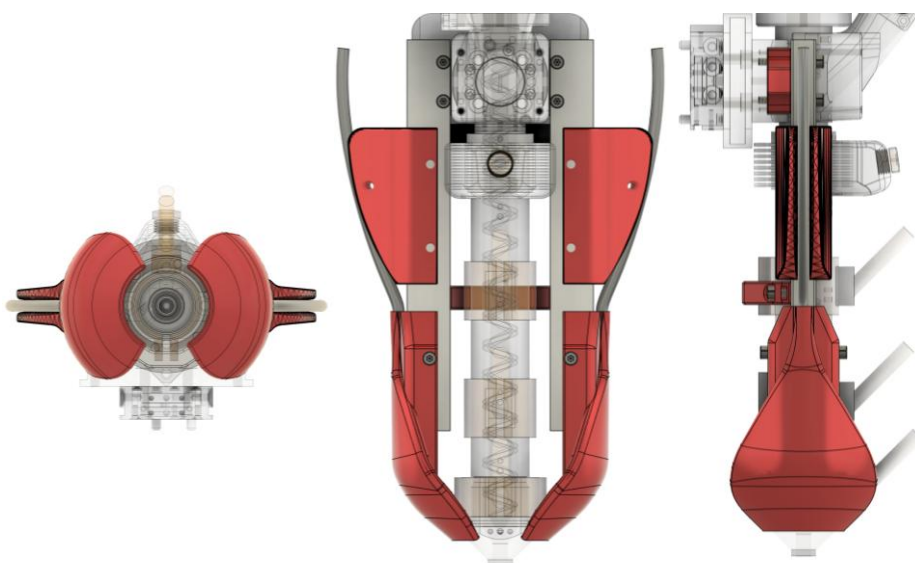
Během testování první iterace byly zjištěny dva zásadní nedostatky. Při vyšších průtocích pravděpodobně vznikalo ve vnitřním prostoru trysek intenzivní turbulentní proudění, které vedlo k neakceptovatelné hladině hluku. Druhým problémem byla kolize chladicího systému s extrudovanou stopou při náklonu extruderu větším než 19° .



Obr. 4-10 Model první iterace nového systému chlazení

Systém chlazení – 2. iterace

Pro odstranění těchto problémů byla navržena druhá iterace systému. Topná tělesa tavné komory byla pootočená o 90°, čímž vznikl prostor pro symetrické uspořádání nosných prvků. DIN lišta byla nahrazena dvojicí duralových I-profilů o rozměrech 22 × 13 mm, upevněných k centrální komponentě pomocí FDM tištěných adaptérů a šroubových spojů. Počet trysek byl snížen na dvě. Trysky byly umístěny do těsnější blízkosti osy extruze a svěrně fixovány k I-profilům pomocí dvojice protilehlých šroubů. Nežádoucímú náklonu trysek bylo zamezeno vytvořením tvarového zámku na rozhraní s profilem, výšková stavitelnost zůstala zachována. Kompaktnější uspořádání posunulo kolizní limit a umožnilo realizaci tisku s náklonem extruderu až 33°. Model systému se zobrazí na Obr. 4-11. Pro snížení hluku byla geometrie nových trysek optimalizována na základě zjednodušené CFD analýzy v prostředí Ansys Discovery pro dosažení efektivnějšího a stabilnějšího proudění.



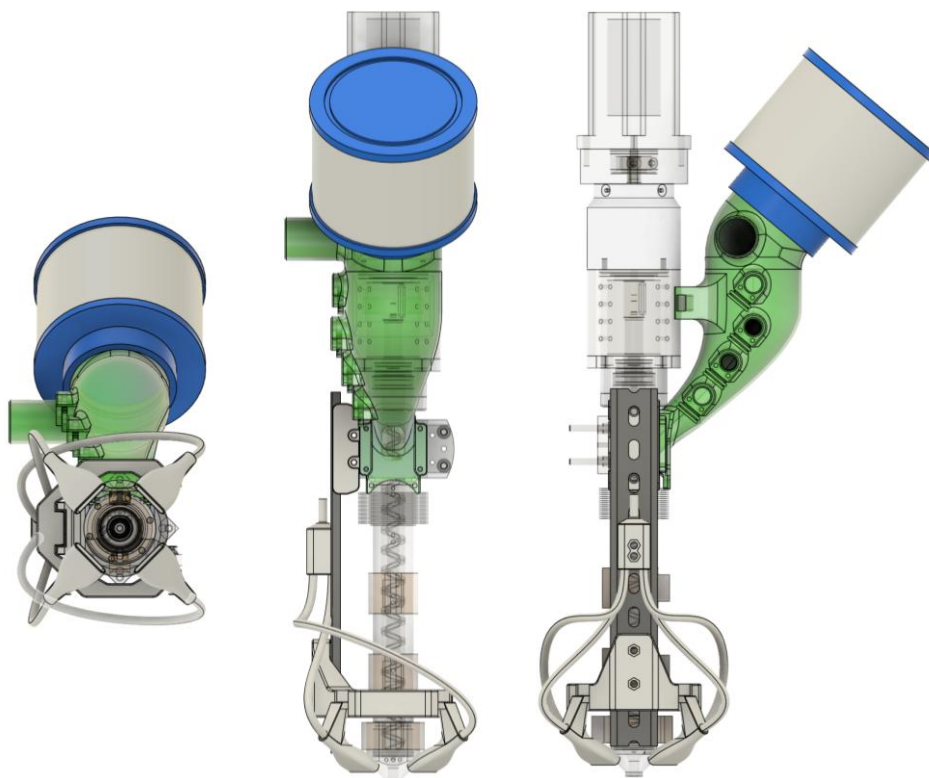
Obr. 4-11 Model finální iterace nově navrženého systému chlazení stopy

4.1.6 Úprava násypky granulátu

Zásadním problémem výchozího řešení násypky bylo nevhodně navržené zúžení v oblasti výstupního hrdla. Při zpracování materiálu PP 30GF docházelo v tomto místě ke vzniku klenbových efektů, které způsobovaly krátkodobé přerušení kontinuálního plnění šnekové komory. Následkem byla depozice nedostatečného množství materiálu, projevující se defekty ve struktuře výtisku. Tento jev byl vyvolán horšími sypanými vlastnostmi použitého granulátu, které jsou detailněji popsány v kapitole 4.2. Dalším problémem původního řešení bylo, že nepočítalo s integrací přívodního konektoru a přívodní hadice materiálu.

Úprava násypky granulátu – První iterace

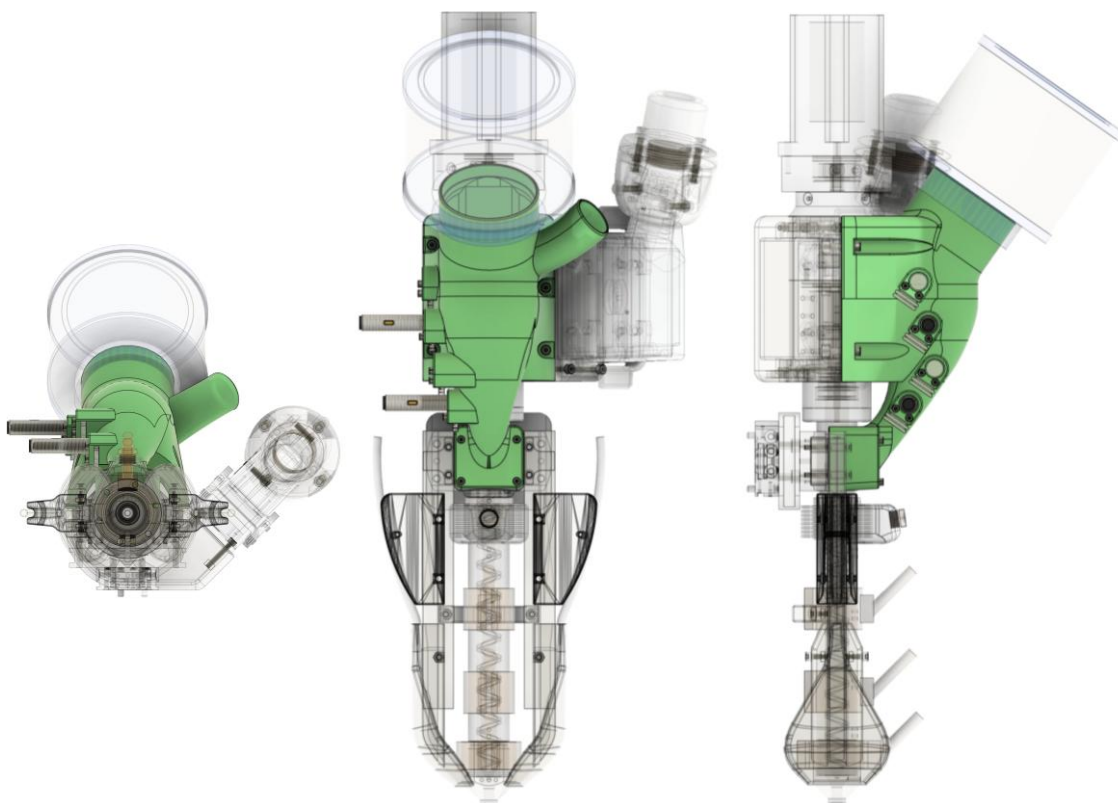
Na konstrukci nové násypky byly kladeny požadavky zajištění plynulého toku granulátu bez rizika přerušení dodávky materiálu a zlepšení integrace s přívodním rozhraním (viz Obr. 4-12). Nová komponenta byla navržena jako díl vyrobený aditivní technologií FDM. V rámci první fáze úprav byla zachována původní koncepce s optimalizací kritické geometrie. Došlo k rozšíření hrdla pro zlepšení průtoku materiálu a k navýšení celkového objemu násypky. Zvětšení objemu materiálu nad vstupem do komory přispělo k vyšší stabilitě plnění šneku. Způsob připojení k tělesu extruderu zůstal identický s původní verzí, tedy pomocí čtyř šroubových spojů v místě ústí do komory a doplňkové stahovací pásky. Z důvodu zvýšeného objemu byly integrovány další dvě polohy pro montáž kapacitních hladinových čidel, čímž byl celkový počet monitorovacích bodů zvýšen na čtyři. Funkčnost nové geometrie byla následně potvrzena v rámci testovacího provozu.



Obr. 4-12 Model první iterace násypky připevněný k extruderu

Úprava násypky granulátu – Druhá iterace

V druhé iteraci násypky byl modifikován způsob fixace k tělesu extruderu s důrazem na integraci chybějících funkčních rozhraní (viz Obr. 4-13). Funkci protikusy, který společně s násypkou vytvářel svěrnou objímku kolem těla extruderu, převzal nově navržený držák napájecího konektoru, jehož vývoj je detailně popsán v následující podkapitole. Toto řešení zajistilo vysokou tuhost a mechanickou stabilitu spoje a současně eliminovalo nedostatek původního konceptu, který s integrací silového rozhraní v blízkosti násypky nepočítal. Druhá iterace držáku tak představovala funkční propojení násypky a nosiče konektoru do jednoho konstrukčního celku, což umožnilo efektivní sdružení přívodu materiálu a elektrické energie do jednotného svazku, čímž se a zvýšila spolehlivost celého systému.

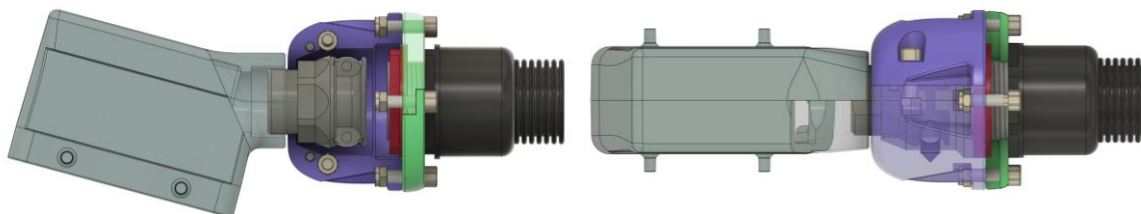


Obr. 4-13 Model finální iterace násypky připevněný k extruderu

4.1.7 Úprava pro automatickou výměnu nástrojů

Vzhledem k charakteru hybridní výrobní technologie je nezbytné zajištění automatické výměny nástrojů v průběhu procesu. V počáteční fázi vývoje probíhala výměna manuálně, neboť nebylo vyřešeno spolehlivé vedení kabeláže, přívodů stlačeného vzduchu a granulátu. Volně zavěšené kabely vykazovaly tendenci k zamotávání, což znemožňovalo bezpečné odkládání nástrojů do parkovacích pozic. Z tohoto důvodu vyvstala potřeba návrhu rozhraní pro pevné uchycení konektoru typu Harting. Konstrukce dílu musela umožnit instalaci konektoru s již osazenou elektroinstalací bez nutnosti její demontáže.

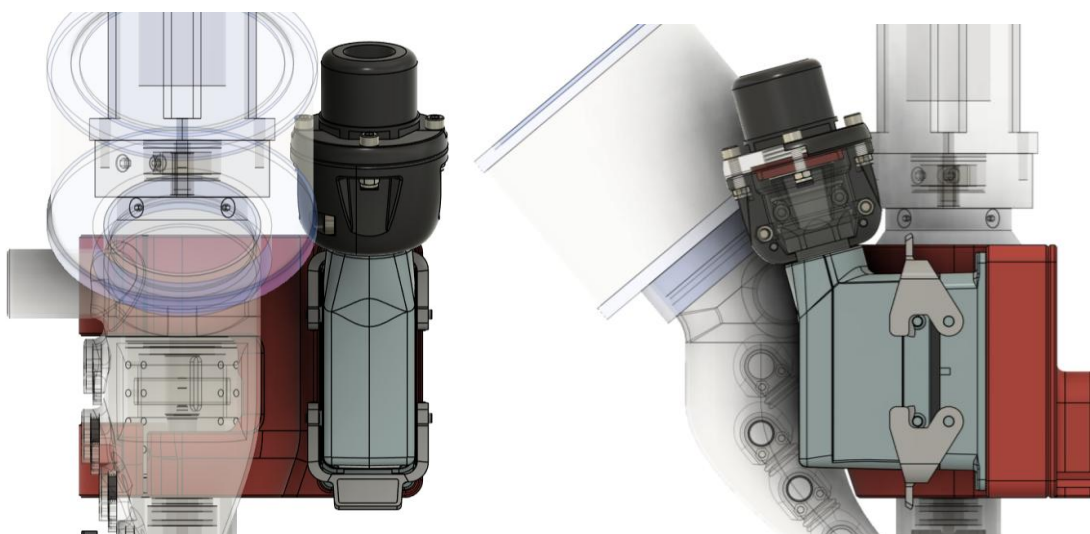
Jako klíčový prvek systému nadlehčování byl použit pružinový vyvažovač Tecna 9336 (TECNA, Itálie) s regulovatelnou nosností v rozsahu 2–4 kg. Toto zařízení zajišťovalo konstantní tah v kabelovém svazku, čímž byla eliminována volná délka kabeláže v pracovním prostoru a sníženo riziko jejího vniknutí do dráhy pohybu robotu. Jako hlavní komunikační a silové rozhraní byl zvolen průmyslový vícepinový konektor typu Han B (HARTING, Německo). Vzhledem k přítomnosti závitových zakončení na výstupu z konektoru i na vrapované ochranné trubici (husím krku) byla navržena složená redukce z několika dílů. Tato konstrukce umožnila propojení obou rozhraní bez nutnosti rozpojování stávající kabeláže. Konstrukční řešení vícedílné redukce je viditelné na Obr. 4-14.



Obr. 4-14 Navržená redukce pro spojení vrapované trubice s konektorem Han B

Úprava pro automatickou výměnu nástrojů – první iterace

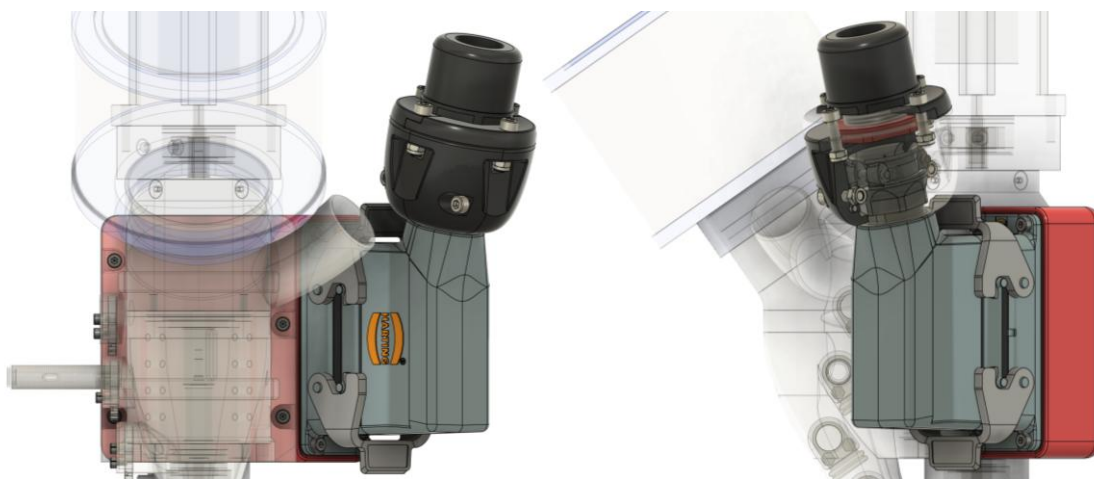
V první iteraci byl konektorový celek upevněn k robustnímu 3D tištěnému držáku, navrženému jako rozevíratelná svěrná objímka se šroubovým spojem. Držák byl svěrně uchycen k tělesu extruderu v oblasti uložení motoru. Konektor byl situován v horní části extruderu a orientován čelní stranou vertikálně vzhůru, čímž bylo dosaženo maximálního odstupu od tiskové roviny (viz Obr. 4-12). Držák byl navržen tak, aby nezasahoval do prostoru původní násypky a zároveň umožňoval úhlové nastavení v ose extruderu pro nalezení optimální provozní polohy.



Obr. 4-15 Model navrženého nosiče konektoru Han B

Úprava pro automatickou výměnu nástrojů – druhá iterace

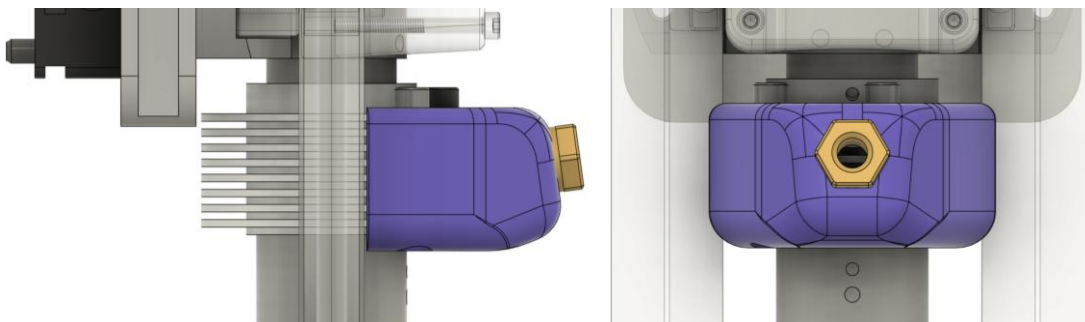
Na základě poznatků z testovacího provozu byla navržena druhá iterace držáku, která spočívala v jeho přímé integraci s násypkou granulátu (Obr. 4-16). Držák konektoru a násypka tvořily dvě části svěrné objímky, které byly spojeny čtyřmi šrouby. Toto uspořádání zajistilo tuhé spojení schopné přenášet síly vyvozené dříve zmíněným napínacím zařízením. Oproti předchozí verzi byl konektor pootočen o 45° vůči střední rovině extruderu směrem k zadní části extruderu. Tato modifikovaná poloha umožnila sdružení přívodní hadice materiálu a ochranné trubice kabeláže do jednoho kompaktního svazku vedeného podél osy vyvažovače. Tímto opatřením byla minimalizována pravděpodobnost vzájemné interakce prvků nebo jejich zamotání během komplexních trajektorií při automatizovaném provozu.



Obr. 4-16 Model finální iterace držáku konektoru umožňující automatickou výměnu nástrojů

4.1.8 Optimalizace chlazení heatbreaku

Optimalizace chlazení heatbreaku Během experimentálního ověřování tiskových procesních parametrů vyvstala potřeba navýšení topného výkonu v první zóně extruderu. Zvýšení tepelného toku v této oblasti vyvolalo požadavek na zintenzivnění chlazení heatbreaku, neboť původní systém s axiálním ventilátorem vykazoval nedostatečnou účinnost při stabilizaci teplotního gradientu. Z tohoto důvodu byl implementován systém nuceného chlazení s využitím stlačeného vzduchu, který je znázorněn na Obr. 4-17.



Obr. 4-17 Model difuzoru nově navrženého systému chlazení heatbreaku stlačeným vzduchem

Systém byl osazen proporcionálním ventilem, který umožňoval nastavení optimálního tlaku chladicího média. Přívod vzduchu byl realizován prostřednictvím hadice integrované do sdruženého svazku kabeláže a materiálového přívodu. K automatizaci procesu byl využit elektromagnetický ventil spínaný řídicím systémem robotické buňky. Algoritmus řízení otevíral ventil v okamžiku, kdy teplota v první topné zóně překročila stanovenou mezní hodnotu. Vlastní distribuce vzduchu byla zajištěna pomocí 3D tištěného difuzoru, který byl upevněn přímo na duralovém chladiči heatbreaku. Difuzor byl opatřen závitovou přípojkou pro spolehlivé spojení s přívodní hadicí.

4.1.9 Obráběcí vřeteno AMB

Pro operace subtraktivního opracování bylo v robotické buňce využito vysokootáčkové vřeteno AMB 1400 FME-W DI (AMB-Elektrik, Německo) (Obr. 4-18). Toto zařízení bylo k přírubě robotického manipulátoru připevněno prostřednictvím identického typu výměníku nástrojů (toolchangeru) jako v případě extruderu, což zajistilo plnou kompatibilitu a zaměnitelnost koncových efektorů v rámci hybridního výrobního procesu. Klíčovým funkčním prvkem vřetene byl integrovaný pneumatický systém pro automatickou výměnu nástrojů s upínacím rozhraním pro strmý kužel SK20. Toto řešení umožnilo plně automatizovanou substituci frézovacích nástrojů bez nutnosti manuálního zásahu operátora.



Obr. 4-18 Obráběcí vřeteno AMB 1400 FME-W DI

Jmenovitý výkon vřetene činil 1400 W při regulovatelném rozsahu otáček od 3 500 do 25 000 ot/min. S celkovou hmotností 3,2 kg a kompaktní konstrukcí o jmenovitém průměru upínací části 43 mm představovalo zařízení koncový efektor s nízkým vlivem na dynamické zatížení robotického ramene. Parametry vřetene relevantní pro integraci a provoz v robotické buňce jsou shrnuty v tabulce 4-2.

Tab. 4 Základní parametry obráběcího vřetene AMB 1400 FME-W DI

Parametr	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý příkon	1400	W
Rozsah otáček	3 500 – 25 000	ot/min
Upínací rozhraní	SK20 / ER16	[-]
Hmotnost	3,2	kg
Jmenovitý průměr krčku	43	mm

4.2 Vymezení procesního okna tisku materiálu PP-30GF

4.2.1 Použitý materiál

V experimentální části byl použit zakázkově připravený kompond Remapylen 1173 PP30GF dodaný společností Remarkplast compounding s.r.o. Jednalo se o kompozit na bázi polypropylenové matrice vyztužené 30 hm. % skelných vláken. Materiál byl dodán ve formě pelet vyráběných technologií strunové granulace za studena. Tvar granulátu, zejména ostré hrany, ovlivňoval jeho sypné vlastnosti a mohl zvyšovat riziko hromadění před vstupem do komory šneku. Tento jev mohl vést k nehomogennímu dávkování a kolísání extruze.

Protože se jednalo o pilotní zakázkovou šarži, nebyl k materiálu v době řešení dostupný technický datový list s mechanickými, tepelnými a reologickými vlastnostmi ani doporučenými procesními parametry pro technologii FGF. Přestože bylo možné v literatuře dohledat parametry pro obdobné materiály na bázi PP GF30, jejich přímé převzetí nebylo možné, protože procesní parametry závisí na konkrétní konstrukci extruderu [51]. Z tohoto důvodu bylo nutné navrhnout vlastní procesní okno odpovídající použitému robotickému pracovišti a konkrétní šarži materiálu. Před použitím byl materiál skladován v uzavíratelných obalech a sušen při teplotě 80 °C po dobu minimálně 90 minut.

Vymezení procesního okna při krátkém čase vrstvy

Procesní okno bylo vymezeno jako rozsah podmínek, ve kterém bylo možné materiál stabilně zpracovávat, dosáhnout souvislé extruze, přijatelné geometrické stability a omezit vznik vizuálních i strukturálních defektů viz kapitola 2.1.9. Vymezení bylo zaměřeno především na menší zkušební výtisky s délkou jedné vrstvy do 1 m, které sloužily jako výchozí geometrie pro následnou výrobu experimentálních těles. U těchto výtisků byla kritická zejména doba tisku jedné vrstvy t_{layer} . Při krátké hodnotě t_{layer} se extruder vracel nad předchozí vrstvu dříve, než byl materiál dostatečně zpevněný.

Důsledkem byla lokální akumulace tepla což vedlo ke snížení tvarové stability a postupnému zvlnění stěn výtisku. Spodní vrstvy obvykle vykazovaly pravidelnou skladbu, zatímco s rostoucí výškou se deformace zvyšovala, protože nově nanášený materiál nebyl ukládán na dostatečně stabilní podklad viz Obr. 4-19. Regulace teplotní historie byla řešena kombinací rychlosti pohybu nástroje, objemového toku materiálu a aktivního chlazení tisknuté stopy.



Obr. 4-19 Defekt výtisku způsobený akumulací tepla při krátkém čase vrstvy

4.2.2 Rešeršní východiska pro návrh počátečních parametrů

Počáteční rozsah procesních parametrů byl stanoven na základě odborné literatury zabývající se zpracováním polypropylenu a polypropylenových kompozitů ve velkoformátové aditivní výrobě. Z rešerše vyplynulo, že hlavními procesními veličinami určujícími kvalitu výtisku jsou teplota extrudované taveniny, teplota substrátu, objemový průtok, rychlost pohybu nástroje, výška vrstvy, šířka kontaktní plochy mezi vrstvami a způsob chlazení. Tyto mechanismy byly popsány v kapitole 2.1.10.

Z literatury bylo možné převzít zejména orientační rozsahy teplot extruze, rychlosti pohybu a výšky vrstvy. Přímý přenos konkrétních hodnot však nebyl možný, protože reálné chování procesu zásadně záviselo na konstrukci a rozměrech používaného extruderu. Zvláště hodnoty definované prostřednictvím otáček šneku, protože otáčky samy o sobě neudávají objemový ani hmotnostní průtok bez znalosti konkrétního extruderu.

Jako orientační zdroje byly použity zejména práce Hertle et al. a Honarvar et al. [7, 36]. První z uvedených prací poskytla východisko pro posouzení vlivu teploty taveniny a teploty substrátu na pevnost mezivrstevového spoje u polypropylenu. Druhá práce byla relevantní vzhledem ke zpracování polypropylenu plněného 30 % skelných vláken a k hodnocení vizuální stability geometrie. Hodnoty z literatury sloužily pouze k vymezení počátečního rozsahu experimentů, nikoli jako přímo použitelné nastavení procesu viz Tab. 5.

Tab. 5 Orientační procesní parametry převzaté z literatury

Parametr	Označení	Hertle et al. (2016) [36]	Honarvar et al. (2026) [7]
Zkoumaný materiál	[-]	čistý polypropylen (PP homopolymer 505P).	recyklovaný polypropylen s 30 % skelných vláken (PP + 30 % GF).
Průměr trysky	d_h	3 mm	5 mm
Zkoumaný rozsah extruzních teplot	T_e	180 - 230 °C	220 - 250 °C
Určená optimální extruzní teplota	T_e	230 °C	225 °C
Zkoumaný rozsah rychlostí pohybu robota / tisku	v_a	36 mm/s	18-30 mm/s
Doporučená rychlost	v_a	36 mm/s	24 mm/s
Zkoumané výšky vrstvy	h	1,5 mm	1,5 – 3 mm
Doporučená výška vrstvy	h	1,5 mm	2 mm
Optimalizační kritérium	[-]	mezivrstevová pevnost a mikroskopická kvalita fúzní zóny.	ohybová pevnost, vizuální kvalita a stabilita struktury

4.2.3 Vymezení sledovaných procesních proměnných

V rámci experimentů byly rozlišeny řízené procesní parametry, sledované výstupy a konstantní podmínky tisku. Mezi řízené parametry patřily teploty topných zón extruderu T_1 , T_2 a T_3 , otáčky šneku n , rychlost pohybu robotického manipulátoru v_a a intenzita aktivního chlazení tisknuté stopy Q_c . Tyto veličiny ovlivňovaly teplotu taveniny, objemový průtok materiálu, geometrii stopy, dobu tisku jedné vrstvy t_{layer} a rychlost ochlazování výtisku.

Sledovanými výstupy byly stabilita extruze, souvislost tisknuté stopy, tvarová stabilita stěn a teplota substrátu T_s před nanesením následující vrstvy. Teplota T_s byla definována jako teplota horního povrchu předchozí vrstvy v místě následného nanesení nové stopy. Primárním cílem při ladění tiskových parametrů bylo zajistit, aby tato setrvala nad hranicí teploty krystalizace polypropylenu T_c . U semikrystalických polymerů je udržení teploty substrátu T_s nad bodem krystalizace termodynamickou podmínkou pro vznik kvalitního fúzního spoje, v případě poklesu pod tuto hranici by došlo ke snížení jeho pevnosti.

Teplotní režim byl řízen nastavením tří topných zón extruderu D-Pro S a intenzitou aktivního chlazení tisknuté stopy formou nastavení objemového průtoku vzduchu. Extruder měl dvě topné zóny na těle tavné komory a třetí topnou zónu v oblasti trysky. Nastavené teploty jednotlivých zón nebyly ztotožňovány se skutečnou teplotou extrudovaného materiálu, protože výsledná teplota taveniny závisela také na době setrvání materiálu v komoře, otáčkách šneku a tepelné setrvačnosti sestavy. Změna nastavení topných zón se proto projevila až po výměně materiálu přítomného v komoře za nově přiváděný granulát.

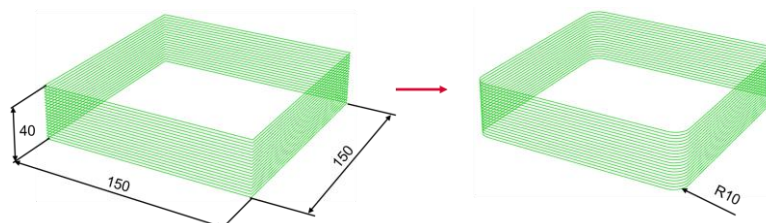
Rozsahy testovaných parametrů byly stanoveny na základě rešeršních východisek, možností použitého zařízení a výsledků počátečních screeningových experimentů. Průměr trysky d_n a výška vrstvy h byly ponechány konstantní, zatímco teploty topných zón, otáčky extruderu, rychlost posuvu a intenzita chlazení byly měněny v rozsazích uvedených v Tab. 6

Tab. 6 Rozsah procesních parametrů použitých při vymezení procesního okna

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
Průměr trysky	d_n	4	mm
Výška tisknuté vrstvy	h	2	mm
První topná zóna	T_1	100 - 125	°C
Druhá topná zóna	T_2	230 - 330	°C
Topná zóna trysky	T_3	245 - 345	°C
Otáčky extruderu	n	15 – 33,6	ot/min
Rychlost posuvu	v_a	7 – 30	mm/s
Intenzita chlazení stopy	Q_c	0-80	l/min

4.2.4 Testovací geometrie a generování trajektorie

Testovací geometrie vycházela z uspořádání používaného v dostupných studiích [7, 43] a byla zvolena také s ohledem na navazující experimenty v dalších fázích práce. Pro experimenty byly generovány tiskové trajektorie s čtvercovým půdorysem o rozměrech $150 \times 150 \times 40 \text{ mm}^3$, který byl tištěn jako uzavřený obvod (Obr. 4-20 vlevo). Délka jedné vrstvy činila přibližně 600 mm bez započtení švu a případných rádiusů.



Obr. 4-20 Původní geometrie vlevo, aktualizovaná geometrie pro tisk širších stop vpravo

Krátká délka vrstvy byla zvolena jako nejnepríznivější případ z hlediska akumulace tepla. Při nízké hodnotě času vrstvy t_{layer} se extruder rychle vracel nad předchozí vrstvu, což zvyšovalo teplotu substrátu a riziko ztráty tvarové stability výtisku. Současně však tento stav vytvářel příznivé podmínky pro difuzní spojení vrstev, protože předchozí vrstva zůstávala před nanesením nové stopy na vyšší teplotě. Z rešerše dále vyplývá, že u semikrystalických polymerů, jako je polypropylen, může externí chlazení přispět ke zvýšení mezivrstvé pevnosti omezením kontrakce a smykového pnutí vznikajícího při chladnutí viz 2.1.10 [36].

Geometrie byla použita pro posouzení stability extruze, tvarové stability stěn, chování materiálu v rozích a vlivu aktivního chlazení. V počáteční fázi byly použity vzorky s ostrými rohy. U variant s větší šířkou stopy byla geometrie následně doplněna o rádiusy 10 mm (Obr. 4-23 vpravo), aby se omezilo lokální hromadění materiálu při změně směru pohybu, v důsledku čehož vznikaly defekty (Obr. 4-21). Šev byl ponechán jako sledovaný prvek bez snahy o jeho maskování. Procesní parametry stanovené na této geometrii bylo možné následně převést na větší výtisky zejména snížením intenzity chlazení, protože s rostoucí délkou vrstvy se prodlužoval t_{layer} a klesala míra lokální akumulace tepla.



Obr. 4-21 Defekt vzniklý v důsledku akumulace materiálu v ostrém rohu výtisku

Veškerá výrobní data pro robotický manipulátor byla připravena v prostředí Grasshopper, což je vizuální programovací prostředí integrované do CAD softwaru Rhinoceros 3D.

4.2.5 Strategie experimentálního postupu

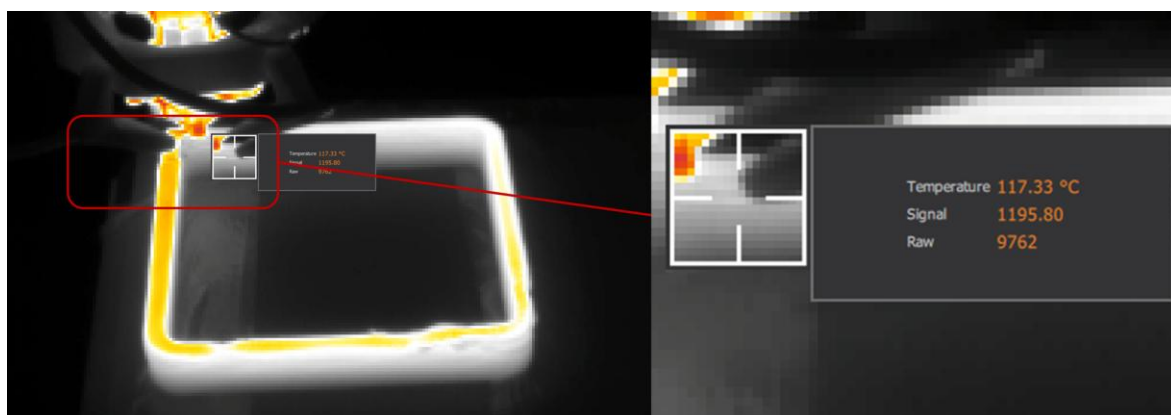
Experimentální postup byl rozdělen do tří navazujících etap. V první etapě byly provedeny screeningové experimenty zaměřené na základní posouzení zpracovatelnosti materiálu při různém nastavení extruderu a rozdílném průtoku materiálu. Cílem bylo ověřit, při jakém nastavení topných zón a otáček šneku docházelo ke stabilnímu natavení materiálu a souvislé extruzi bez zřetelného kolísání průtoku. Současně bylo sledováno, zda se při vyšších otáčkách šneku neprojevuje nedostatečné natavení nově přiváděného granulátu.

Ve druhé etapě byly iteračně upravovány teploty topných zón, otáčky extruderu, rychlost posuvu a intenzita chlazení. Na základě těchto experimentů byly vybrány kombinace parametrů, které umožňovaly stabilní extruzi, souvislou stopu a přijatelnou tvarovou stabilitu výtisku v celém průběhu tiskového cyklu. Konečné porovnání jednotlivých kombinací bylo provedeno pomocí vícekritériální analýzy popsané v kapitole 4.2.6.

V poslední etapě byla pro zvolené teplotní nastavení extruderu stanovena závislost objemového průtoku materiálu na otáčkách šneku. Tento krok byl proveden až po určení vhodného teplotního režimu, protože viskozita taveniny, jiné reologické vlastnosti a tím i skutečný průtok materiálu závisí na její teplotě. Zjištěná závislost následně umožnila dopočítávat potřebné otáčky extruderu pro požadovanou šířku tisknuté stopy.

Použitá měřicí zařízení

Teplota během tisku byla měřena pomocí termokamery WIC-IND-336 (Workswell, Česko). Kamera byla umístěna tak, aby snímala oblast nanášení materiálu a horní povrch předchozí vrstvy. Pomocí termografického záznamu byla posuzována teplota extrudovaného materiálu T_e po výstupu z trysky a teplota substrátu T_s těsně před nanášením následující vrstvy (Obr. 4-22). V počátečních fázích byl pro orientační kontrolu používán také kontaktní teploměr. Jeho nevýhodou bylo riziko lokální deformace čerstvě nanášené tiskové stopy při dotyku sondy s materiálem, proto sloužilo pouze ke kalibraci termografického měření.

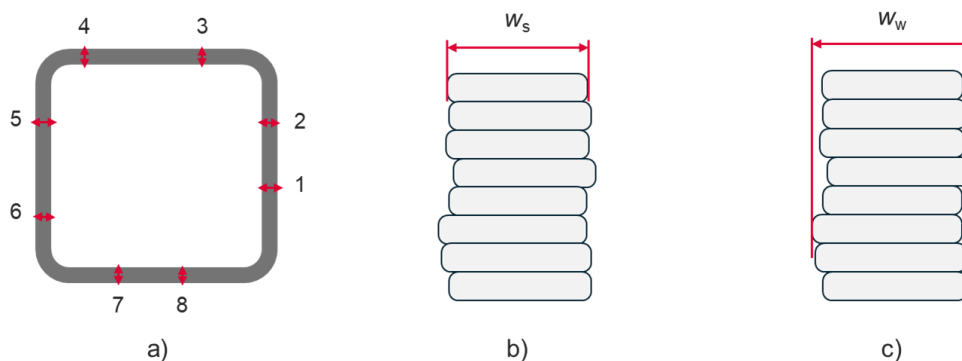


Obr. 4-22 Termografické měření teploty extrudovaného materiálu T_e a teploty substrátu T_s

4.2.6 Hodnocení procesních parametrů

Kvalita vytištěných testovacích vzorků byla hodnocena pomocí souboru kvalitativních a kvantitativních kritérií. Cílem hodnocení bylo porovnat jednotlivé sady procesních parametrů z hlediska stability procesu, pravidelnosti extruze, geometrické opakovatelnosti a produktivity tisku. Výsledkem hodnocení bylo bezrozměrné skóre každé sady procesních parametrů, které bylo následně použito pro výběr nejvhodnější kombinace nastavení.

Kvantitativní hodnocení zahrnovalo index produktivity tisku, variabilitu šířky stopy, variabilitu šířky stěny a rozdíl mezi průměrnou šířkou stopy a průměrnou šířkou stěny. Šířka poslední vytištěné stopy byla označena jako w_s a sloužila k posouzení homogenity extruze (Obr. 4-23 b). Šířka stěny měřená přes deset vrstev byla označena jako w_w a byla použita pro hodnocení přesnosti ukládání jednotlivých vrstev nad sebe (Obr. 4-23 c). Na každém vzorku bylo provedeno osm měření náhodně rozmístěných po obvodu čtvercové geometrie (Obr. 4-23 a). Veškeré délkové rozměry byly v rámci práce měřeny posuvným měřítkem Mitutoyo 505-732 (Mitutoyo, Japonsko) s rozlišením 0,01 mm a tolerancí 0,02 mm.



Obr. 4-23 Schéma znázorňující hodnocení rozměrové stability tisku

Kvalitativní hodnocení zahrnovalo vizuální kvalitu extruze a celkovou vizuální stabilitu tisku. Vizuální kvalita extruze popisovala stav samotné tisknuté stopy, zejména její homogenitu, souvislost, známky nedostatečného natavení materiálu, přítomnost degradovaného materiálu nebo projevy podextruze. Vizuální stabilita tisku hodnotila výtisk jako celek, zejména pravidelnost ukládání vrstev, zřetelné vychýlení vrstev od střednice stěny, kvalitu švu a chování materiálu v rozích.

Hodnocení produktivity tisku

Produktivita tisku byla vyjádřena pomocným indexem produktivity I_p , který byl stanoven jako součin rychlosti posuvu nástroje v_a a otáček šnekového extruderu n . Tento index nepředstavoval přímý hmotnostní ani objemový průtok, ale sloužil jako relativní veličina pro porovnání jednotlivých sad procesních parametrů.

$$I_p = v_a \cdot n \quad (1)$$

Hodnocení variability šířky stopy a šířky stěny

Variabilita šířky stopy byla určena z osmi měření šířky poslední vytištěné stopy w_s . Na každé stěně čtvercového výtisku byla náhodně provedena dvě měření. Cílem tohoto hodnocení bylo určit, jak rovnoměrná byla šířka samostatné extrudované stopy po obvodu výtisku. Nejprve byla ze všech naměřených hodnot vypočtena průměrná šířka stopy podle vztahu

$$\bar{w}_s = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m w_{s,i} \quad (2)$$

kde $\bar{w}_s$ je průměrná šířka stopy, $w_{s,i}$ je i -tá naměřená hodnota šířky stopy a m je počet měření. V tomto případě bylo pro každý výtisk provedeno $m = 8$ měření na náhodných místech.

Následně byla vypočtena směrodatná odchylka šířky stopy. Směrodatná odchylka vyjadřuje, jak výrazně se jednotlivé naměřené hodnoty liší od jejich průměru. Čím je její hodnota vyšší, tím méně rovnoměrná byla měřená šířka stopy. Výpočet byl proveden podle vztahu

$$s_{w_s} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (w_{s,i} - \bar{w}_s)^2} \quad (3)$$

kde s_{w_s} je směrodatná odchylka šířky stopy. Ve jmenovateli je použita hodnota $m - 1$, protože výpočet vychází z konečného souboru měření provedeného na konkrétním výtisku.

Pro porovnání jednotlivých sad procesních parametrů byl následně použit koeficient variace. Koeficient variace vyjadřuje relativní velikost směrodatné odchylky vzhledem k průměrné hodnotě. Díky tomu bylo možné porovnávat variabilitu šířky stopy i v případech, kdy se jednotlivé vzorky lišily absolutní hodnotou šířky. Nižší hodnota koeficientu variace odpovídala rovnoměrnější šířce tisknuté stopy. Výpočet koeficientu variace šířky stopy:

$$CV_{w_s} = \frac{s_{w_s}}{\bar{w}_s} \quad (4)$$

Variabilita šířky stěny byla určena obdobným způsobem. Místo šířky vrstvy byla měřena celková šířka stěny w_w ve výšce deseti vrstev. Toto měření sloužilo k posouzení přesnosti ukládání jednotlivých vrstev nad sebe. Hodnotícím kritériem byl opět koeficient variace CV_{w_w} , vypočtený jako poměr směrodatné odchylky šířky stěny k její průměrné hodnotě.

$$CV_{w_w} = \frac{s_{w_w}}{\bar{w}_w} \quad (5)$$

Odchylka mezi šířkou vrstvy a šířkou stěny

Nejvýznamnějším geometrickým kritériem byla relativní odchylka mezi průměrnou šířkou stěny a průměrnou šířkou samostatné stopy. Toto kritérium vyjadřovalo, do jaké míry se výsledná šířka vícevrstvé stěny lišila od šířky jednotlivé vrstvy. Vztah pro výpočet:

$$\Delta w = (\bar{w}_w - \bar{w}_s) / \bar{w}_s \quad (6)$$

kde $\bar{w}_w$ je průměrná šířka stěny a $\bar{w}_s$ je průměrná šířka tisknuté stopy. Schéma měření šířky stopy a šířky stěny je uvedeno na Obr. 4-23.

Pro společné vyhodnocení byla všechna kritéria převedena na bezrozměrné hodnoty v rozsahu 0 až 1. Hodnota 1 odpovídala nejlepšímu výsledku v daném kritériu a hodnota 0 nejhoršímu výsledku v rámci porovnávaného souboru procesních parametrů. Přepočet byl proveden relativně vůči minimální a maximální hodnotě daného kritéria. U kritérií, kde vyšší hodnota znamenala lepší výsledek, byl použit vztah:

$$x_{i,norm} = (x_i - x_{min}) / (x_{max} - x_{min}) \quad (7)$$

U kritérií, kde nižší hodnota znamenala lepší výsledek, například u variability šířky nebo geometrické odchylky, byl použit obrácený vztah:

$$x_{i,norm} = (x_{max} - x_i) / (x_{max} - x_{min}) \quad (8)$$

Následně byla provedena vícekriteriální analýza. Výsledné skóre každé sady procesních parametrů bylo určeno jako vážený součet normalizovaných hodnot jednotlivých kritérií:

$$S = \sum w_i \cdot x_{i,norm} \quad (9)$$

Kde S je výsledné skóre sady procesních parametrů, w_i je váha i-tého kritéria a $x_{i,norm}$ je normalizovaná hodnota i-tého kritéria. Váhy jednotlivých kritérií byly stanoveny Saatyho metodou párového porovnání. Tato metoda spočívá v postupném porovnání všech dvojic kritérií podle jejich relativní důležitosti. Výsledkem je čtvercová matice párového porovnání, ze které se po normalizaci stanoví váhový vektor kritérií. Vyšší váha znamená větší vliv daného kritéria, jednotlivé váhy parametrů jsou popsány v Tab. 7.

Tab. 7 Hodnoty vážených parametrů vícekriteriální analýzy

Parametr	Váha
Produktivita tisku	0,026838
Vizuální stabilita tisku	0,096957
Vizuální kvalita extruze	0,213312
Variabilita šířky vrstvy	0,177621
Variabilita šířky objektu	0,177621
Šířky objektu × šířka vrstvy	0,307649

Výpočet hmotnostního toku v závislosti na otáčkách extruderu

Po stanovení vhodného teplotního nastavení extruderu byla určena závislost hmotnostního a objemového toku materiálu na otáčkách šneku. Materiál byl při konstantních otáčkách extrudován po dobu 30 s, poté byl zvážěn a byl zjištěn jeho objem. Pro každou hodnotu otáček bylo měření opakováno šestkrát v rozsahu 1–30 ot/min a získaná data byla použita pro vykreslení závislosti hmotnostního i objemového toku na otáčkách extruderu.

4.3 Výzkum vlivu výrobní strategie

Výzkum vlivu výrobní strategie navazoval na úpravu robotického pracoviště a na optimalizaci tiskových procesních parametrů materiálu PP GF30, popsané předchozích kapitolách. Tato část práce byla zaměřena na návrh a experimentální ověření metodiky výroby segmentového spoje, u kterého bylo rozhraní mezi primárním a sekundárním segmentem upraveno subtraktivní operací. Navržená strategie vycházela z předpokladu, že geometricky definovaná drážka obrobená do již vychladlé tiskové stopy může vytvořit mechanický tvarový zámek a současně definovat kontaktní oblast pro následné zatisknutí nové taveniny.

Motivací návrhu tvarového spoje bylo omezení negativního vlivu studeného spoje, který vzniká při nanášení nové taveniny na již vychladlý substrát. Tento problém je významný nejen u mechanicky namáhaných dílů, ale také u pohledových dílů, které nemají být po vytištění celoplošně obráběny. Z tohoto důvodu byla metodika navrhována tak, aby byl tvarový spoj lokalizován uvnitř jedné tiskové stopy a aby v ideálním případě nebyl z vnějšího povrchu výtisku rozpoznatelný. Cílem tedy nebylo vytvořit dodatečný vnější spojovací prvek, ale integrovat mechanické zaklesnutí přímo do objemu již existující tiskové stopy.

Experimentální postup byl členěn do několika navazujících fází. Schéma postupu je znázorněno na Obr. 4-24. Nejprve byly stanoveny referenční mechanické vlastnosti kontinuálně tištěných vzorků a vzorků se studeným spojem. Následně byly provedeny screeningové experimenty zaměřené na ověření vyrobitelnosti hybridního spoje a identifikaci hlavních procesních nejistot. Na základě těchto zjištění byla metodika doplněna o korekce aditivních a subtraktivních drah, úpravu způsobu kotvení výtisku k pracovní základně, změnu strategie obrábění a úpravu upnutí vzorků při mechanickém testování. Finální fáze výzkumu byla provedena jako plánovaný experiment zaměřený na vliv šířky drážky, hloubky drážky a koeficientu přextruze.

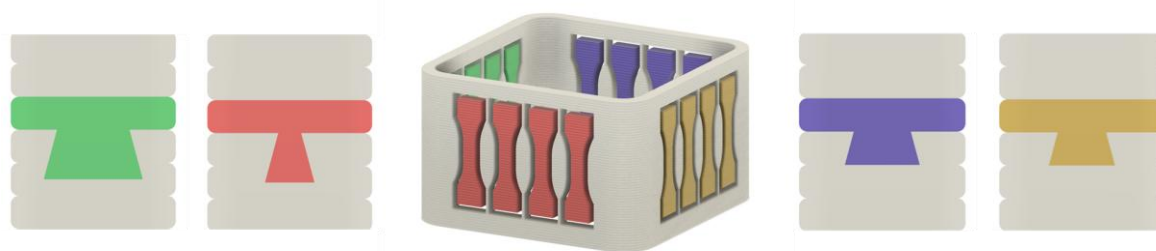


Obr. 4-24 Schéma výzkumného postupu pro ověření vlivu výrobní strategie

4.3.1 Metodika tvorby hybridního spoje a definice procesních kroků

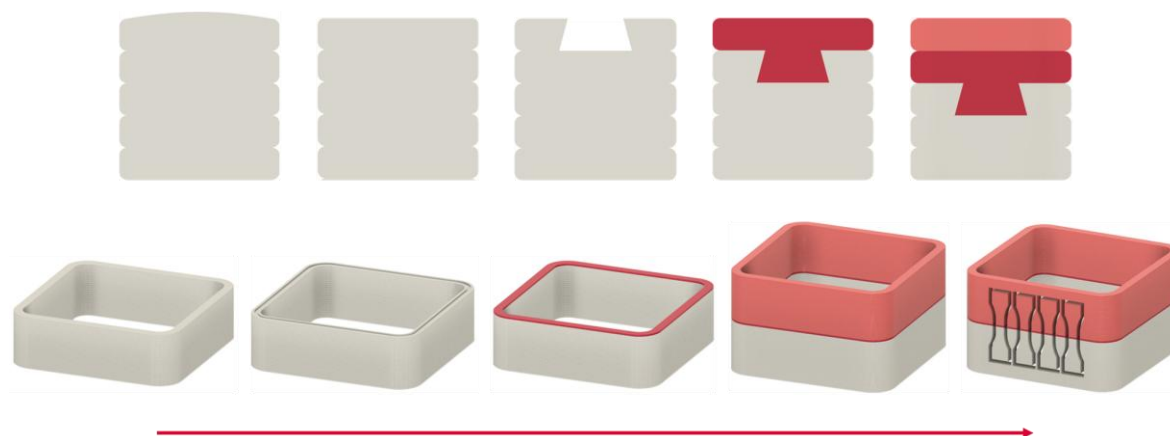
Pro účely výzkumu byly segmentové spoje vytvářeny na zjednodušených modelových tělesech. Tento přístup umožnil opakovatelnou výrobu vzorků, kontrolované obrábění rozhraní a následnou extrakci zkušebních těles pro tahovou zkoušku. Metodika navazovala na přístup použitý ve studii Weflen et al. [6], kde byla tvarová rozhraní hybridní výroby posuzována na menších modelových tělesech, ze kterých byly vyřezávány zkušební vzorky.

Modelové těleso bylo navrženo tak, aby každá jeho stěna představovala samostatnou experimentální sekci s definovanou kombinací výrobních parametrů. Z každé stěny byly následně obrobena čtyři zkušební vzorky ve tvaru psí kosti nazývané dogbones (Obr. 4-25).



Obr. 4-25 Znáznornění sad zkušebních vzorků v rámci tisknutého modelu

Hybridní spoj byl tvořen mezi primárním a sekundárním segmentem. Primární segment představoval spodní část modelového tělesa, která byla vyrobena aditivně a následně ponechána k vychladnutí. Po vychladnutí byla horní plocha primárního segmentu obrobena do referenční roviny. Do této roviny byla podle příslušné experimentální varianty vyfrézována drážka, která byla následně mechanicky očištěna. Sekundární segment byl následně vytištěn tak, aby první stopa nové taveniny zaplnila obrobenou drážku a vytvořila tvarové rozhraní mezi oběma segmenty. Po výrobě sekundárního segmentu byl celý model ponechán ke zchladnutí a následně byly ze stěn odebrány jednotlivé zkušební vzorky. Tento postup odpovídal cyklické hybridní výrobě, ve které se aditivní a subtraktivní operace střídaly v rámci jednoho pracoviště. Schéma výroby těles znázorňuje Obr. 4-26.



Obr. 4-26 Schéma výroby segmentového spoje a schéma výroby modelového tělesa

Definice proměnných

Řízenými proměnnými experimentu byly šířka drážky w_g , hloubka drážky h_g a koeficient přeextruze k_e . Šířka drážky určovala půdorysný rozměr tvarového zámku v rámci jedné tiskové stopy. Změna šířky byla prováděna odsazením obráběcí trajektorie od střednice tiskové stopy. Hloubka drážky byla nastavena změnou hloubky zasunutí obráběcího nástroje směrem do primárního segmentu. Tento přístup umožnil použít stejný obráběcí nástroj pro všechny varianty a zachovat konstantní úhel stěn drážky. Při výrobě bylo zohledněno, že změna hloubky neodpovídá prostému geometrickému škálování celé drážky při větší hloubce drážky, viz Obr. 4-27. Koeficient přeextruze určoval množství materiálu dodaného do drážky při jejím zaplňování a byl definován jako poměr mezi skutečně dodaným objemem taveniny a teoretickým objemem potřebným k zaplnění obrobené drážky.



Obr. 4-27 Schéma změny šířky obráběné drážky při použití jednoho nástroje

Referenční experimenty

Experimentální postup byl rozdělen do tří navazujících částí. První část tvořily referenční experimenty, jejichž účelem bylo stanovit výchozí mechanické vlastnosti kontinuálně tištěných těles a referenční pevnost studeného spoje. Referenční experimenty zahrnovaly zjištění pevnosti při zatěžování ve směru tisknutých stop, změření mezivrstvé pevnosti a pevnost segmentového rozhraní vytvořeného tiskem na vychladlý substrát. Pro odlišení vlivu stavu povrchu primárního segmentu byla referenční pevnost studeného spoje posuzována jak při tisku na neobrobený povrch, tak při tisku na povrch obrobený do roviny.

Screeningové experimenty

Druhou část tvořily screeningové experimenty. Jejich cílem bylo ověření vyrobitelnosti navržené hybridní strategie, předběžné posouzení vlivu zvolených geometrických a procesních proměnných a vymezení vhodného návrhového prostoru pro další testování. Screening sloužil především k rozpoznání základních trendů, k ověření a k identifikaci procesních omezení, která mohla ovlivnit následné mechanické zkoušky.

Finální plánovaný experiment

Třetí část představoval finální plánovaný experiment. Ten byl navržen na základě poznatků ze screeningové fáze a byl zaměřen na podrobnější vyhodnocení vlivu šířky drážky, hloubky drážky a koeficientu přeextruze v zúženém rozsahu hodnot. Cílem této fáze bylo vytvořit datový soubor vhodný pro regresní vyhodnocení, posouzení interakcí mezi proměnnými a určení kombinace parametrů vedoucí k nejvyšší pevnosti hybridního segmentového spoje.

V průběhu screeningové fáze se ukázalo, že výsledná pevnost spoje nebyla ovlivněna pouze nominálně nastavenými proměnnými, ale také opakovatelností jednotlivých výrobních a zkušebních kroků. Byly identifikovány tři hlavní skupiny procesních nejistot:

- První oblast procesních nejistot souvisela s přesností polohování nástrojů, zejména s kalibrací nástrojů a vzájemným sladěním tiskových a obráběcích drah.
- Druhá oblast zahrnovala jevy ovlivňující skutečnou geometrii primárního segmentu po vychladnutí, především adhezi k pracovní základně, warping, tedy nežádoucí deformaci výtisku vznikající v důsledku smrštění materiálu při chladnutí, a celkové rozměrové smrštění výtisku.
- Třetí oblast byla spojena s mechanickým testováním, kde se jako kritické ukázaly zejména sousost vzorku ve zkušebních čelistech, možné poškození při upínání a konfigurace horní čelisti.

4.3.2 Metodika kalibrace nástrojů a výrobních drah

Hybridní výroba segmentového spoje vyžadovala shodu aditivních a subtraktivních operací v jednom souřadném systému. Proto byla součástí metodiky kalibrace nástrojů, korekce relativní polohy trajektorií a kompenzace rozměrových změn výtisku po vychladnutí.

Kalibrace TCP

TCP, tedy Tool Center Point, představuje pracovní bod nástroje, jehož poloha je řídicím systémem používána při výpočtu trajektorie. U extruderu odpovídal TCP teoretickému středu výstupního otvoru trysky, pro účely kalibrace byla vyrobena kalibrační tryska znázorněna na Obr. 4-28 vpravo. U obráběcího vřetene TCP odpovídal špičce nástroje, pro účely kalibrace byl do vřetene upnut kalibrační hrot viz Obr. 4-28 vlevo.

Kalibrace TCP byla provedena čtyřbodovou metodou vůči stacionárnímu kalibračnímu hrotu. Nástroj byl postupně naváděn do stejného referenčního bodu z několika orientací. Aby byl omezen vliv vůlí v převodovkách robotického ramene, bylo do referenčního bodu najížděno stejným způsobem a ze stejného směru. Řídicí software umožňoval akceptovat kalibraci při chybě do 0,5 mm, pro potřeby vyšší přesnosti hybridní výroby však byla stanovena přísnější interní podmínka maximální chyby 0,25 mm.



Obr. 4-28 Kalibrace obráběcího vřetene vlevo, kalibrační tryska extruderu vpravo

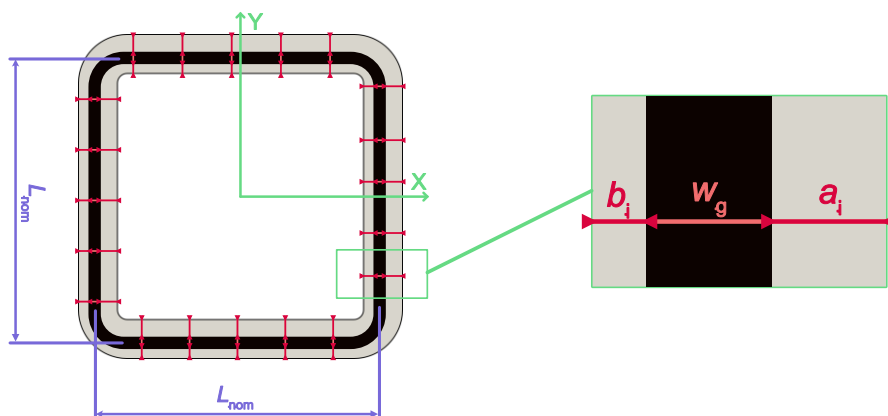
Korekce trajektorií

I přes pravidelnou kalibraci byly v průběhu prvních hybridních zkoušek zjištěny vzájemné odchylky mezi aditivními a subtraktivními trajektoriemi, z toho důvodu byly zavedeny dva způsoby korekce těchto odchylek.

První korekční postup využíval srovnání polohy extruderu a obráběcího vřetene vůči stacionárnímu referenčnímu bodu. K témuž bodu byl postupně naveden extruder a kalibrační hrot upnutý ve vřetenu. Rozdíl zaznamenaných poloh byl použit jako korekce subtraktivních trajektorií. Bylo nutné, aby se tento stacionární kalibrační bod nacházel v přímé blízkosti místa, kde byla následně prováděna daná subtraktivní operace. Odchylka polohy je z povahy reverzní kinematiky, která řídí pohyby robotického manipulátoru, závislá na poloze v prostoru. Tato metoda umožňovala provést hrubou korekci polohy nástrojů ve všech třech osách, avšak nepostihovala skutečné smrštění vytištěného tělesa po vychladnutí.

Z tohoto důvodu byla vyvinuta druhá korekční metoda založená přímo na hybridní výrobě. Primární segment byl vytištěn záměrně s výškovým přídavkem nejméně dvou vrstev. Po vychladnutí byla horní část segmentu obrobena o výšku jedné vrstvy tak, aby bylo odhaleno mezivrstvé rozhraní a vznikla referenční rovina. Do této roviny byla následně obrobena kalibrační drážka s půdorysnou trajektorií shodující se s trajektorií použitou při tisku bez použití korekce. Hloubka kalibrační drážky byla nastavena na 0,75 násobek výšky vrstvy. Tato drážka nesloužila jako funkční spoj, ale jako metrologický prvek pro zjištění skutečné polohy obráběcí trajektorie vůči vytištěné stěně.

Po obrobení kalibrační drážky bylo na každé stěně provedeno minimálně deset měření. V pěti místech byla změřena vzdálenost mezi drážkou a vnější hranou stěny a ve stejných příčných řezech byla změřena vzdálenost mezi drážkou a vnitřní hranou stěny. Měření vnější i vnitřní vzdálenosti muselo být provedeno na jedné přímce, aby bylo možné určit skutečný posun drážky vůči střednici stěny. Pro každou dvojici měření byl posun drážky stanoven jako polovina rozdílu obou vzdáleností. Průměrováním jednotlivých měření byl získán průměrný posun drážky pro danou stěnu. Schéma měření šířky zbytku stopy, podle kterého byla prováděna následující kalibrace je znázorněno na Obr. 4-29.



Obr. 4-29 Schéma měření stopy pro kalibraci tiskových a obráběcích trajektorií a výpočet smrštění

Měřená data byla zapisována do textového souboru ve stanovené konvenci a následně načítána přímo do Grasshopper skriptu. Nejprve byla zapisována hodnota příslušná straně ležící ve směru kladné osy a následně hodnota na protilehlé straně stejného řezu. Skript z těchto hodnot vypočítal posun drah ve směru X a Y a současně měřítko smrštění výtisku. Ve zjednodušené podobě byl posun pro jednotlivý řez určen vztahem

$$\delta_i = \frac{(a_i - b_i)}{2} \quad (10)$$

kde a_i a b_i představovaly dvojici vzdáleností mezi kalibrační drážkou a protilehlými hranami stěny. Výsledná korekce polohy byla určena jako průměr hodnot δ_i pro danou stěnu a následně jako průměr odpovídajících stěn ve směru příslušné osy.

Korekce smrštění byla určena z rozdílu mezi nominální délkou trajektorie a skutečnou polohou protilehlých stěn. Použitý vztah lze vyjádřit ve zjednodušené podobě:

$$k = \frac{(L_{nom} + \Delta_+ - \Delta_-)}{L_{nom}} \quad (11)$$

kde L_{nom} představovala nominální vzdálenost stěn v daném směru a Δ_+ a Δ_- představovaly vypočtené posuny stěn v kladném a záporném směru osy viz Obr. 4-29. Tím bylo možné trajektorie následných subtraktivních i aditivních operací nejen posunout, ale také škálovat podle skutečného smrštění primárního segmentu.

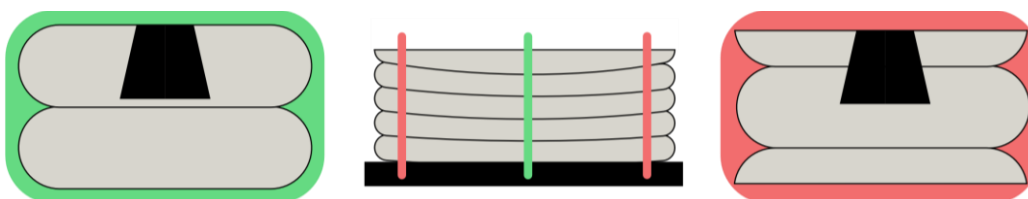
Tato hybridní korekční metoda byla použitelná pouze v případě, že po obrobení kalibrační drážky zůstal na obou stranách drážky dostatek materiálu pro měření. Pokud byla odchylka nekorigovaných drah větší než polovina šířky stěny, nebylo možné změřit obě vzdálenosti a metoda ztrácela vypovídací schopnost. V takovém případě bylo nutné nejprve provést hrubou korekci pomocí stacionárního referenčního bodu, využít korekci KRL programu v reálném čase, nebo zavést prostorovou korekci přímo v prostředí Grasshopper.

Orientace souřadného systému

Kromě smrštění a korekce výrobních drah byla řešena také orientace souřadného systému pracovní základny vůči základnímu souřadnému systému robotického ramene. Při původní orientaci byly hlavní tiskové a obráběcí trajektorie vedeny v kolmých směrech vůči základně robota. V této konfiguraci se při pohybech vedených zejména směrem k robotu objevovalo periodické „skákání“ koncového efektoru. Tento jev nebyl vázán pouze na obrábění, projevoval se také při tiskových pohybech bez působení řezných sil. Z tohoto důvodu nebyl považován za důsledek samotné nízké tuhosti při obrábění, ale za projev nepříznivé kinematické konfigurace robotického ramene. Periodický charakter pohybu naznačoval možnost pohybu v blízkosti singulární oblasti. Pro finální metodiku byl proto souřadný systém pracovní základny pootočen o 40° vůči původní orientaci. Tím byly hlavní pracovní trajektorie přesunuty mimo směry, ve kterých se oscilace projevovaly nejvýrazněji.

4.3.3 Metodika zajištění adheze výtisku k tiskové základně

Významnou procesní nejistotou byla adheze výtisku k pracovní základně. Nedostatečné ukotvení primárního segmentu způsobovalo nejen riziko odtržení výtisku, ale také změnu rovinnosti horní plochy, která byla následně obráběna. Tento jev byl kritický zejména proto, že poloha dna drážky vůči mezivrstvému rozhraní byla jednou ze sledovaných proměnných. Pokud se rohy výtisku zvedly od pracovní základny, docházelo při obrábění k nerovnoměrnému úběru materiálu. V rozích mohla být odebrána výška dvou nebo více vrstev, zatímco ve střední části tělesa pouze jedna vrstva. Tím se měnila skutečná poloha dna drážky vůči vrstvám primárního segmentu, problém znázorněn na Obr. 4-30.



Obr. 4-30 Schematicky zobrazený problém špatné adheze výtisku k podložce

V počáteční fázi byly vzorky tištěny na vyhřívanou magnetickou podložku s povrchem BuildTak. I při zvýšené teplotě však docházelo k výraznému warpingu a zvedání rohů výtisku. Následně byla ověřena polypropylenová lepicí páska, která zlepšila počáteční adhezi, avšak při vyšším vnitřním pnutí docházelo k porušení lepicí vrstvy. Dalším krokem bylo použití masivní polypropylenové desky s hrubým povrchem, která zlepšila adhezi kombinací materiálové kompatibility a mechanického zaklesnutí, ale u větších modelových těles neposkytovala dostatečnou opakovatelnost.

Pro finální metodiku byla proto použita zdvojená OSB deska. Její hrubý povrch umožnil mechanické zakotvení první vrstvy a zvýšená tuhost omezila prohnutí podložky vlivem smrštění výtisku. Kontaktní plocha mezi výtiskem a deskou byla dále zvětšena pomocí technologického prvku typu raft, vytvořeného v první vrstvě jako cikcak trajektorie. Po jeho vytištění byl proces krátce přerušen, raft byl připevněn k OSB desce samořeznými vruty a bezprostředně poté byl přetištěn primárním segmentem, aby se omezil vznik studeného spoje. Tím vzniklo dodatečné spojení základny a výtisku, postup je znázorněn na Obr. 4-31.



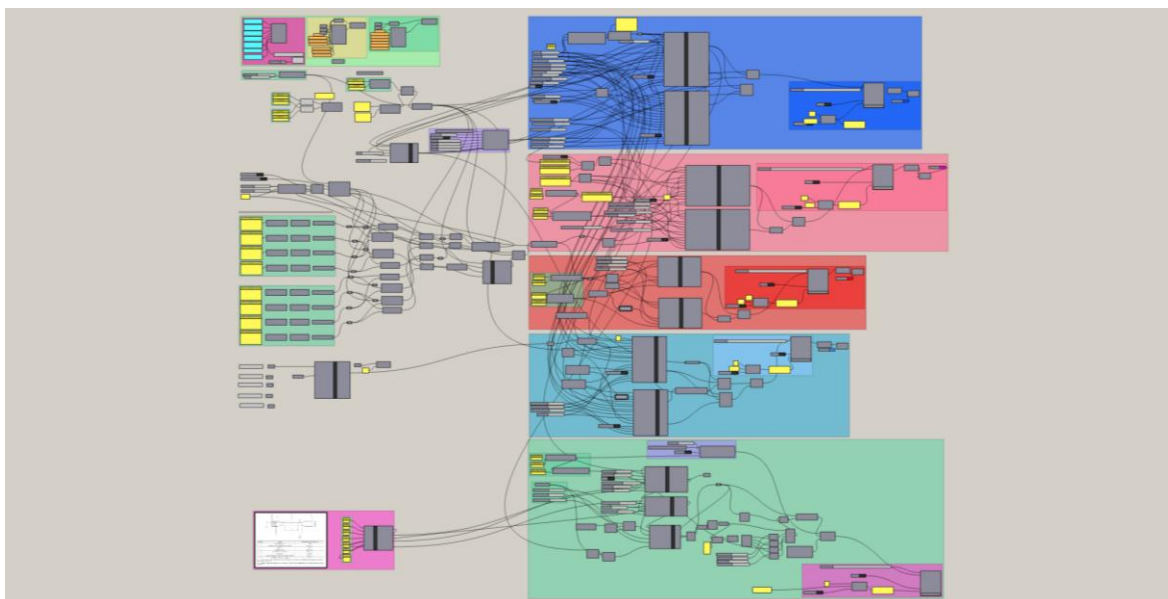
Obr. 4-31 Kroky použití technologického raftu pro upevnění výtisku na podložce

4.3.4 Parametrický model a příprava výrobních dat

Výrobní data byla připravována v prostředí Grasshopper a následně převáděna do robotických KRL programů pomocí KUKA|prc. V jednom parametrickém modelu byly sdruženy příkazy pro tvorbu veškerých výrobních operací a kalibrace a jednotlivé bloky byly barevně odděleny viz Obr. 4-32. Nastavení geometrických a procesních parametrů, zejména šířky a hloubky drážky a koeficientu přextruze, probíhalo automaticky po načtení CSV souboru s plánovanými kombinacemi experimentu. Parametrický model zahrnuje nástroje pro tvorbu trajektorie pro tisk primárního segmentu, obrábění referenční roviny, obrábění kalibrační a funkční drážky, tisk sekundárního segmentu a finální obrobení zkušebních těles. Pro každou technologickou operaci byl následně vytvořen samostatný KRL program, který byl následně nahrán do řídicí jednotky robota. Před odesláním programu do robotického manipulátoru byla provedena simulace v rámci Grasshopper skriptu.

Parametrický model nesloužil pouze k definici geometrie drah, ale také k řízení technologických stavů výrobního procesu. Zapínání a vypínání extruze, změna otáček šneku, spínání chlazení a zapínání obráběcího vřetene byly programovány přímo ve skriptu. Toto řešení bylo možné díky řídicímu systému buňky, ve kterém byly vybrané funkce extruderu a periférií ovládány prostřednictvím PLC. Tím bylo možné přímo propojit geometrii drážky, požadovaný objem taveniny a odpovídající nastavení extruderu.

Model také umožňoval korekci polohy obráběcích drah vůči skutečně vyrobenému tělesu a kompenzaci rozměrových změn vzniklých během chladnutí viz kapitola 4.3.2. Dále byl součástí skriptu výpočet průřezu drážky, který sloužil ke stanovení požadovaného objemového toku taveniny při jejím zaplňování. Protože byla v předchozí části práce určena závislost objemového toku na otáčkách šneku, bylo možné pro danou geometrii drážky a rychlost pohybu nástroje dopočítat otáčky extruderu odpovídající zvolenému koeficientu k_e .

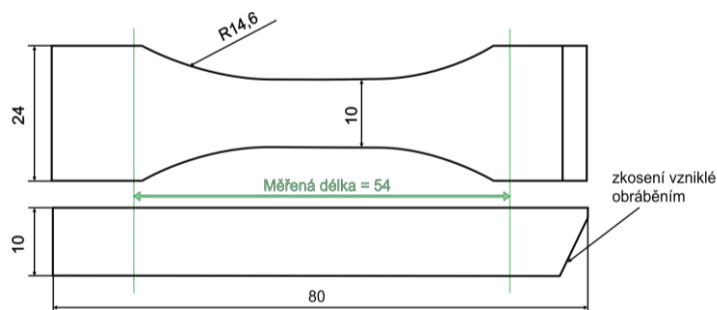


Obr. 4-32 Parametrický model pro přípravu výrobních dat

4.3.5 Metodika tahových zkoušek

Mechanické vlastnosti vyrobených vzorků byly hodnoceny tahovou zkouškou. Tahové zkoušky byly realizovány na univerzálním zkušebním stroji SHIMADZU AGX 100 kN (Shimadzu Corporation, Japonsko). Pro měření deformace byl použit extenzometr MFA 25 viz Obr. 4-35. Vzorky byly upínány pomocí svěrných čelistí, avšak původně dostupné čelisti umožňovaly upnutí vzorků do šířky 8 mm, proto byly vyrobeny čelisti se svěrnou šířkou až 14 mm, které byly přizpůsobeny vzorkům vyráběným technologií LFAM viz Obr. 4-36.

Geometrie zkušebního tělesa vycházela z normy ISO 527-4, bylo zvoleno testovací těleso 1B typu dogbone [49]. Geometrie tělesa byla upravena s ohledem na rozměry výtisků a možnosti obrábění viz Obr. 4-33. Vzorky byly testovány ve stavu po obrobení z modelového tělesa bez jakékoli dodatečné úpravy povrchu. Po výrobě byly skladovány nejméně 16 hodin v laboratorním prostředí při teplotě 23 ± 2 °C a relativní vlhkosti 38 %.



Obr. 4-33 Geometrie a rozměry zkušebního tělesa finální metodiky

Test započal předepnutím vzorku silou 10 N, které probíhalo rychlostí 1 mm/min. Po dosažení předpětí byl vzorek zatěžován do porušení rychlostí příčnicku 2 mm/min. Během zkoušky byl zaznamenáván průběh síly, posuvu příčnicku a deformace vzorku.

Hlavní hodnocenou veličinou bylo maximální přenesené obecné napětí. Toto napětí bylo stanoveno z maximální naměřené síly a obecné plochy průřezu definované jako součin šířky obrobeného zkušebního vzorku a nominální šířky tiskové stopy. Výpočet tedy nevycházel ze skutečné kontaktní plochy v místě lomu, protože cílem práce bylo porovnat strategie na základě jednotně definované obecné plochy, nikoliv stanovit lokální napětí ve skutečné lomové ploše. Maximální přenesené obecné napětí bylo stanoveno podle vztahu:

$$\sigma_{gen} = \frac{F_{max}}{b_s \cdot w_s} \quad (12)$$

kde σ_{gen} je maximální obecné napětí, F_{max} je maximální síla zaznamenaná při tahové zkoušce, b_s je šířka zkušebního vzorku a w_s je nominální šířka tiskové stopy viz Obr. 4-34.

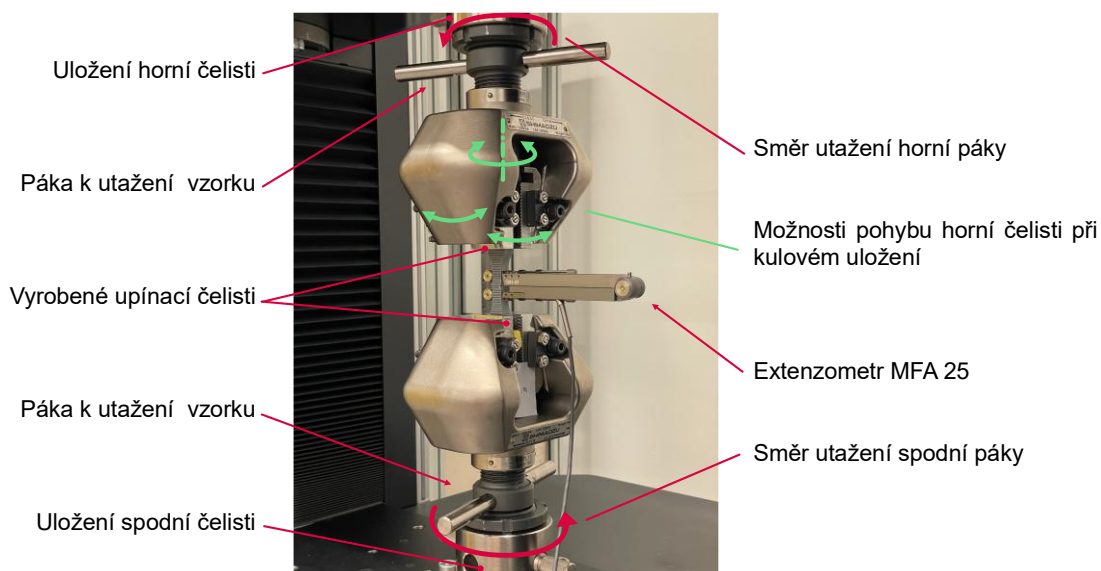


Obr. 4-34 Rozměry vzorků použité pro výpočet obecného napětí u tahové zkoušky

Procesní nejistoty tahové zkoušky

První procesní nejistotou bylo původně použité kulové uložení horní čelisti. Spodní čelist byla uložena pevně, zatímco horní umožňovala kromě naklopení také malé natočení, viz Obr. 4-35. Toto řešení mělo kompenzovat nesouososti mezi vzorkem a osou zkušebního stroje. Pokud však byl vzorek sevřen v čelisti, která nebyla při upnutí orientována svisle ve směru zatěžování, mohlo při následné zkoušce docházet ke snaze čelisti vrátit se do rovnovážné polohy. Do vzorku tak mohlo být kromě tahového zatížení vnášeno také ohybové namáhání, takže zkouška nemusela odpovídat čistému jednoosému tahu.

Další nejistota souvisela se samotným upínáním. Vzorek byl do čelistí sevřen ručním otáčením pákového mechanismu, viz Obr. 4-35, přičemž kulově uloženou horní čelist nebylo možné během upínání aretovat. Pokud při dotahování došlo k jejímu natočení, mohl se krouticí moment přenést přes sevřenou část vzorku. Protože vzorek nebyl torzně zajištěn, mohlo dojít k jeho zkroucení a poškození ještě před zahájením zkoušky. Tento vliv byl kritický zejména u vzorků s nízkou tuhostí a u vzorků obsahujících studený nebo hybridní segmentový spoj, kde mohl přispět ke zvýšenému rozptylu naměřených hodnot.



Obr. 4-35 Konfigurace tahové zkoušky s upnutým vzorkem

Pro finální metodiku bylo použito pevné uložení horní čelisti, které odstranilo možnost jejího natočení při upínání a omezilo riziko ohybového přetížení při zatěžování. Souosé ustavení vzorku bylo zajištěno pomocí vyrobených magnetických středících přípravků, viz Obr. 4-36 a orientace vzorku byla při upínání kontrolována vodováhou.



Obr. 4-36 Použití magnetických středících přípravků společně s vyrobenými čelistmi

4.3.6 Mikroskopická analýza

Pro vybrané sady finálního experimentu byla provedena mikroskopická analýza segmentového rozhraní. Pro hodnocení dané sady výrobních parametrů byly použity neporušené středové vzorky odebrané ze stěn testovaných modelových těles z oblasti mezi druhým a třetím vzorkem. Tato poloha nejlépe reprezentovala stav spoje pro danou výrobní sadu vzorků. Středové vzorky byly postupně broušeny brusnými papíry za mokra až do zrnitosti P800. Následně byla provedena analýza pomocí stereomikroskopu Olympus SZX7 s připojenou digitální zrcadlovkou Canon EOS 1200D při zvětšení 20×.

4.3.7 Finální experiment a použité procesní parametry

Finální experiment představoval závěrečnou fázi tohoto experimentálního výzkumu. Navazoval na rozšířený screening, ve kterém byly současně měněny všechny hlavní zkoumané faktory v širším rozsahu hodnot. Rozšířený screening sloužil k ověření dříve pozorovaných trendů a k předběžnému určení oblasti, ve které bylo možné očekávat vyšší pevnost segmentového spoje. Oproti screeningu byl návrhový prostor finálního experimentu zúžen tak, aby se měření soustředilo na oblast s největším praktickým potenciálem. Použité rozsahy faktorů jsou uvedeny v Tab. 8.

Tab. 8 Rozsah faktorů použitých v rozšířeném screeningu a finálním experimentu

Faktor	Označení	Rozšířený screening	Finální plánovaný experiment
Šířka drážky	wg	3,0–6,0 mm	3,0–4,5 mm
Hloubka drážky	hg	2,0–4,0 mm	2,0–4,0 mm
Koeficient přeextruze	ke	1,0–1,5	1,1–1,4

Regrese plochy odezvy

Návrh experimentu byl připraven v softwaru Minitab jako vícefaktorový plán určený pro vyhodnocení pomocí regrese plochy odezvy. Tato metoda byla zvolena proto, že cílem práce nebylo pouze porovnat několik izolovaných variant, ale popsat vliv všech zkoumaných parametrů na pevnost spoje současně, protože se parametry mohou vzájemně ovlivňovat.

Testování všech možných kombinací parametrů by vzhledem k výrobní náročnosti jednotlivých vzorků nebylo prakticky proveditelné. Proto byl použit plánovaný experiment, ve kterém byly zvoleny takové kombinace parametrů, aby bylo možné s menším počtem zkoušek posoudit hlavní trendy, vzájemné vazby a vliv na pevnost jednotlivých parametrů.

Regrese plochy odezvy byla v této práci použita jako praktický nástroj pro vyhodnocení vlivu parametrů. Vytvořený matematický model touto metodou popisoval sledovanou odezvu, tedy maximální přenesené obecné napětí, jako funkci zkoumaných faktorů.

Lineární členy modelu vyjadřovaly základní růst nebo pokles pevnosti při změně faktoru, kvadratické členy umožňovaly zachytit zakřivení průběhu a interakční členy popisovaly situaci, kdy účinek jednoho faktoru závisel na hodnotě jiného faktoru. Výstupem vyhodnocení byly koeficienty modelu, p-hodnoty jednotlivých členů, grafy hlavních efektů, grafy interakcí a konturové grafy.

Statistické ukazatele S, R-sq, R-sq(adj) a R-sq(pred) byly používány pouze jako kontrola toho, nakolik vytvořený matematický model odpovídal skutečným naměřeným datům a zda v datech nezůstával významný nevysvětlený vliv. Ukazatel S, označovaný jako směrodatná chyba regrese, vyjadřuje typickou velikost rozdílu mezi naměřenou hodnotou a hodnotou vypočtenou modelem. Je proto uveden ve stejných jednotkách jako sledovaná odezva, tedy v MPa. Ukazatel R-sq, tedy koeficient determinace, udává, jakou velkou část variability naměřených dat model popisuje. Například hodnota R-sq = 80 % znamená, že model popisuje přibližně 80 % rozdílu mezi naměřenými hodnotami. Ukazatel R-sq(adj), tedy upravený koeficient determinace, tuto hodnotu koriguje s ohledem na počet členů v modelu. Ukazatel R-sq(pred), tedy predikovaný koeficient determinace, vyjadřuje schopnost modelu odhadovat nové hodnoty, které nebyly použité k sestavení modelu.

Tyto ukazatele sloužily pouze k ověření, zda model dostatečně popisuje naměřené trendy; hlavní interpretace byla zaměřena na významnost jednotlivých členů modelu a na grafické posouzení vlivu zkoumaných faktorů.

Procesní parametry použité pro výrobu zkušebních těles

Pro zajištění porovnatelnosti jednotlivých variant byla všechna modelová tělesa vyráběna při konstantních tiskových procesních parametrech. Tyto parametry vycházely z procesního okna stanoveného v kapitole 4.2. Jejich přehled je uveden v Tab. 9.

Tab. 9 Tiskové procesní parametry použité při výrobě finálních modelových těles

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotka</i>
Výška vrstvy	2	mm
Teplota první topné zóny T1	125	°C
Teplota druhé topné zóny T2	270	°C
Teplota tryskové zóny T3	295	°C
Otáčky šneku	21,3	ot/min
Rychlost pohybu nástroje	12	mm/s
Intenzita chlazení tisknuté stopy	80	l/min

Po dokončení aditivní části výroby následovaly subtraktivní operace, které zahrnovaly obrobení referenční roviny a drážky a následné frézování zkušebních těles. Pro tyto operace byly použity dva typy nástrojů. Přehled jejich základních parametrů je uveden v Tab. 10.

Tab. 10 Přehled použitých obráběcích nástrojů

Operace	Nástroj	Materiál a provedení	Průměr řezné části	Počet břitů	Délka řezné části	Celková délka
Obrábění roviny a dogbone vzorků	Izar 9416-4	Karbidová leštěná fréza	4 mm	1	15 mm	45 mm
Obrábění drážky	Haas 03-2804	Karbidová rybinová fréza bez povlaku	3 mm	2	2,36 mm	38 mm

Řezné podmínky byly stanoveny s ohledem na doporučení výrobců nástrojů a následně upraveny pro obrábění kompozitního polymeru PP GF30. Při volbě parametrů bylo nutné omezit lokální tavení materiálu. Použité parametry pro jednotlivé operace viz Tab. 11.

Tab. 11 Obráběcí parametry použité při výrobě finálních zkušebních těles

Operace	Řezná rychlost	Posuv na zub	Otáčky vřetene	Rychlost posuvu	Maximální hloubka záběru
Obrábění roviny a dogbone vzorků	125 m/min	0,04 mm	9947 ot/min	6,63 mm/s	2 mm
Obrábění drážek	80 m/min	0,015 mm	8488 ot/min	4,24 mm/s	4 mm

4.3.8 Postup výroby vzorků finálního experimentu

V počáteční fázi finálního experimentu byla modelová tělesa vyráběna ve dvojicích na jedné tiskové základně, aby bylo možné efektivně využít technologickou prodlevu potřebnou pro vychladnutí primárního segmentu. Po zjištění výraznějších rozdílů mezi jednotlivými tělesy byl postup upraven a další modelová tělesa byla vyráběna na tiskové platformě samostatně.

Před zahájením každé aditivní operace bylo nutné stabilizovat vlastnosti vytékající taveniny. Z tohoto důvodu byly nejprve tisknuty homogenizační housenky o délce 300 nebo 120 mm. Jejich účelem bylo vytlačit přehřátou taveninu, která se delší dobu nacházela v komoře extruderu, a nahradit ji novou dávkou materiálu s ustálenými vlastnostmi viz Obr. 4-37.



Obr. 4-37 Homogenizační housenka

Po dokončení každé tiskové operace, tedy i po dokončení homogenizační housenky, bylo provedeno řízené oddělení tiskové stopy. Pro tento účel byla do výrobního programu zahrnuta rutina, která nejprve ukončila extruzi, následně provedla rychlý odjezd extruderu od výtisku rychlostí 80 mm/s a až poté vypnula aktivní chlazení. Vzhledem k přítomnosti skelných vláken v materiálu PP GF30 nedocházelo při odjezdu trysky k výraznému stringování, tedy k nežádoucímu vytahování tenkých vláken zbytkové taveniny mezi tryskou a výtiskem. Tisková stopa tak byla oddělena čistě, bez významného ulpívání materiálu mimo požadovanou oblast depozice, viz Obr. 4-38.



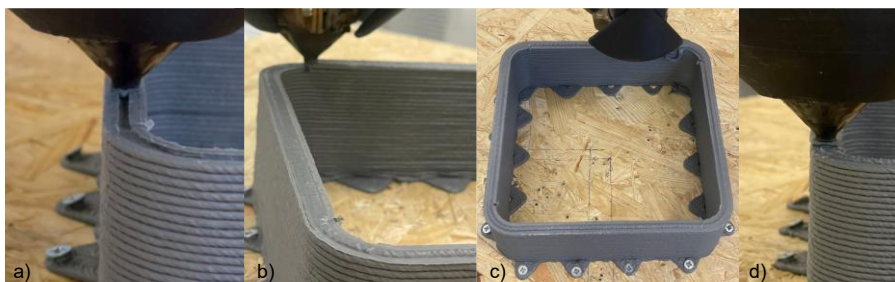
Obr. 4-38 Detail na řízené oddělení taveniny od výtisku vpravo

Po homogenizační housence následoval tisk raftu, který byl po dokončení mechanicky přichycen k tiskové podložce. Detailnější popis postupu tvorby raftu je uveden v kapitole 4.3.3. Po přichycení raftu byl zahájen tisk primárního segmentu. První vrstva, která byla nanášena přímo na raft a tiskovou podložku, byla tištěna bez aktivního chlazení, aby se podpořila adheze k podkladu. Aktivní chlazení bylo zapnuto až od druhé vrstvy a v tomto režimu byl následně vytištěn celý primární segment.

Po dokončení tisku primárního segmentu byl výtisk ponechán k vychladnutí na teplotu vhodnou pro obrábění. Chladnutí bylo urychleno proudem stlačeného vzduchu. Po dosažení dostatečné tuhosti materiálu byly provedeny kalibrační kroky popsané v kapitole 4.3.2. Pro obrábění byly použity řezné podmínky uvedené v Tab. 11. Po kalibraci byla horní plocha primárního segmentu obrobena do referenční roviny. Toto srovnání sloužilo k vytvoření jednotných výchozích podmínek pro následné obrábění funkčních drážek viz kapitola 4.3.3.

Funkční drážky byly obráběny do srovnané horní plochy primárního segmentu podle příslušné kombinace faktorů. Řezné podmínky použité při obrábění drážek jsou uvedeny v Tab. 11. Šířka drážky byla určena odsazením půdorysných drah nástroje, hloubka drážky byla řízena polohou nástroje v ose Z a koeficient přeextruze byl nastaven prostřednictvím objemového toku taveniny při následném zaplňování drážky. Obrábění každé drážky bylo provedeno ve dvou průjezdech. První průjezd vytvořil požadovanou geometrii drážky, zatímco druhý průjezd sloužil k začištění jejího povrchu. Po dokončení obrábění byly z drážky odstraněny třísky a otřepy. Povrch byl vysát a následně očištěn papírovou utěrkou navlhčenou izopropylalkoholem. Před tiskem sekundárního segmentu byla ponechána technologická prodleva nutná pro odpaření izopropylalkoholu.

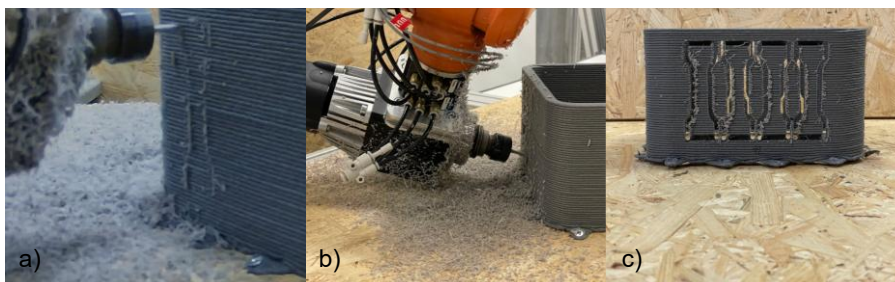
Tisk sekundárního segmentu byl proveden pomocí korigované trajektorie viz kapitola 4.3.2, aby bylo dosaženo přesného navázání na primární segment. Při zaplňování drážky byl objemový tok extruderu nastaven podle plochy průřezu drážky, rychlosti pohybu nástroje a požadovaného koeficientu přeextruze. Pro vytvoření dostatečného tlaku nutného k zatlačení taveniny do obrobené drážky bylo nezbytné, aby spodní plocha trysky byla v kontaktu s horní referenční plochou primárního segmentu viz Obr. 4-39 a). Plnění drážky probíhalo bez aktivního chlazení, stejně jako první navazující stopa sekundárního segmentu viz Obr. 4-39 d). Aktivní chlazení bylo zapnuto až od začátku druhé vrstvy sekundárního segmentu.



Obr. 4-39 a) detail plnění drážky taveninou, b) detail zaplněné drážky s koeficientem extruze 1, c) zaplněná drážka, d) detail tisku první stopy sekundárního segmentu nad zaplněnou drážkou

Po dokončení tisku bylo modelové těleso ponecháno k vychladnutí na pokojovou teplotu. Finální zkušební vzorky typu dogbone byly z modelového tělesa vyrobeny obráběním. První průjezd trajektorie dogbone byl použit jako kontrolní průjezd po povrchu výtisku viz Obr. 4-40 a). Pokud se nástroj nacházel mimo požadovanou polohu vůči skutečnému povrchu, byla provedena korekce drah v reálném čase. Tato korekce byla realizována jako funkce naprogramovaná v řídicím systému robotické buňky, která umožňovala dodatečně upravit polohu vykonávané trajektorie bez opětovného generování výrobního programu.

V oblasti blízké pracovní základně bylo vřeteno nakloněno tak, aby nedošlo ke kolizi těla vřetene se základnou viz Obr. 4-40 b). Osa frézy byla v této oblasti skloněna pod úhlem 20° , což se projevilo na geometrii vzorku, ale nijak to neohrožovalo jeho integritu. Vzorky byly během obrábění ponechány v modelovém tělese uchycené tenkou blánou materiálu, která bránila jejich uvolnění před dokončením operace viz Obr. 4-40 c). Po dokončení obrábění bylo modelové těleso odšroubováno ze základny a jednotlivé vzorky byly následně odděleny od tisknutého tělesa zalamovacím nožem nebo pilkou s maximální opatrností.



Obr. 4-40 Obrábění kontur jednotlivých vzorků, a) kontrolní průjezd pro kalibraci polohy, b) náklon vřetene při přiblížení k tiskové základně, c) obrobené vzorky držené pomocí blan v modelovém tělese

5 VÝSLEDKY

5.1 Výsledky optimalizace tiskových parametrů

Optimalizace tiskových parametrů byla zaměřena na nalezení stabilního procesního okna pro tisk materiálu PP GF30. Z provedených experimentů vyplynulo, že na kvalitu tisku měly nejvýraznější vliv otáčky šneku extruderu, intenzita chlazení a teplota první topné zóny extruderu. Při teplotě první topné zóny přibližně 80 °C nebylo dosaženo homogenní extruze a tisk vykazoval výraznou nestabilitu. Po zvýšení této teploty na hodnotu přibližně 125 °C došlo ke zlepšení kvality extrudované stopy i stability celého procesu. Dále byla identifikována limitní návratová teplota substrátu. Při návratových teplotách nad 130 °C docházelo při době tisku jedné vrstvy 60 s k nestabilnímu tisku a lokálnímu bortění vrstev.

Na základě vícekritériálního vyhodnocení bylo stanoveno procesní okno uvedené v Tab. 12. Hodnocení zohledňovalo stabilitu extruze, homogenitu vytlačovaného materiálu, geometrii tiskové stopy, návratovou teplotu substrátu a tvarovou stabilitu výtisku během stavby.

Tab. 12 Stanovené procesní okno pro tisk materiálu PP GF30

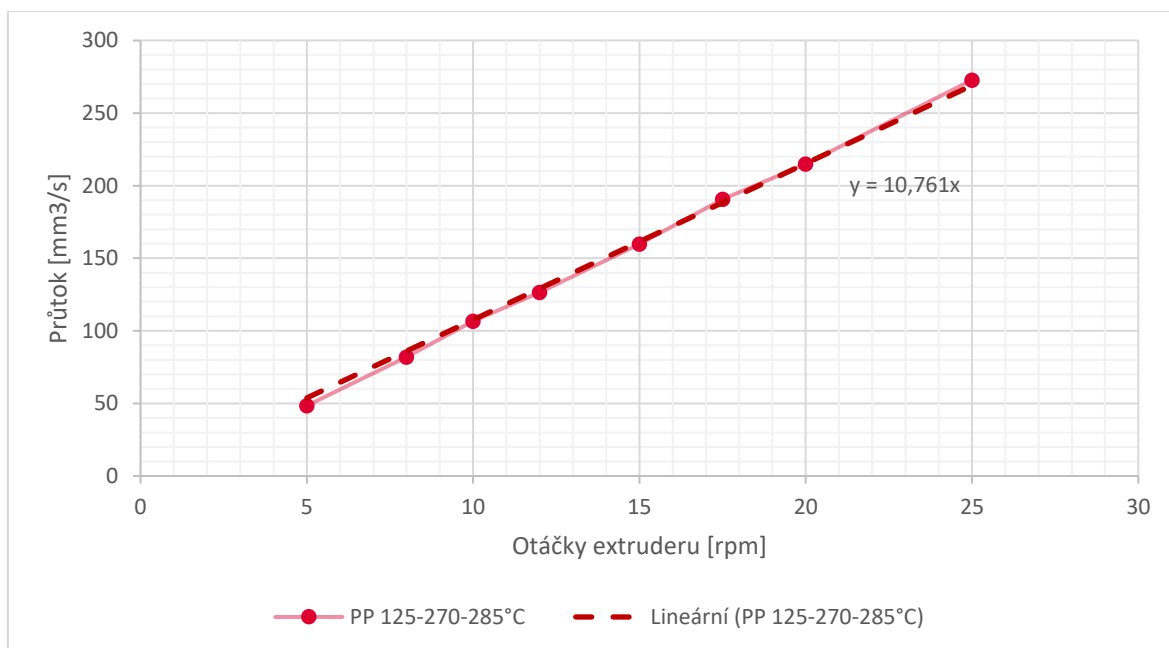
Parametr	Hodnota / rozsah	Jednotka
Průměr trysky	4	mm
Cílená šířka tiskové stopy	10	mm
Výška vrstvy	2	mm
Teplota první topné zóny T1	125	°C
Teplota druhé topné zóny T2	270	°C
Teplota tryskové zóny T3	285	°C
Otáčky šneku	0–23	ot/min
Rychlost pohybu nástroje	0–20	mm/s
Intenzita chlazení tisknuté stopy	0–80	l/min

Při překročení horní hranice procesního okna otáček šneku docházelo k nedostatečnému protavení materiálu. Tento jev se projevil nehomogenní strukturou extrudované stopy a s přítomností neprotaveného granulátu. Stejný problém byl pozorován také při použití trysky s větším průřezem při zachování shodných parametrů. Příklad neprotaveného materiálu při překročení procesního okna je uveden na Obr. 5-1.



Obr. 5-1 Neprotavený materiál při překročení procesního okna extruderu

Pro zvolené teplotní nastavení byla následně stanovena závislost objemového toku na otáčkách šneku extruderu. V rozsahu procesního okna rostlo množství extrudovaného materiálu s otáčkami šneku přibližně lineárně. Tato závislost byla dále využita pro přepočet požadovaného objemového toku na konkrétní otáčky šneku při tisku modelových těles. výsledky kalibrace jsou uvedeny na Obr. 5-2.



Obr. 5-2 Závislost hmotnostního a objemového toku na otáčkách šneku extruderu

Pro výrobu modelových těles se šířkou tiskové stopy 10 mm a výškou vrstvy 2 mm byla zvolená rychlost pohybu nástroje 12 mm/s a otáčky šneku 21,3 ot/min.

Při zvoleném nastavení 21,3 ot/min odpovídala produktivita přibližně 0,864 kg/h. Při horní hranici použitelného procesního okna, tedy při 23 ot/min, byla dosažitelná produktivita přibližně 0,935 kg/h. Vyšší produktivita by při zachování stejného teplotního nastavení nebyla vhodná, při navyšování průtoku docházelo k nedostatečné plastifikaci materiálu.

5.2 Výsledky referenčních experimentů

5.2.1 Pevnost kontinuálně tištěných vzorků

Referenční měření kontinuálně tištěných vzorků stanovilo výchozí pevnostní úroveň pro následné hodnocení hybridních segmentových spojů. Vzorky byly testovány ve dvou orientacích zatížení, a to ve směru tisknutých stop a kolmo na vrstvy. Při zatížení ve směru tisknutých stop dosáhly vzorky průměrného maximálního přeneseného obecného napětí 32,23 MPa. Při zatížení kolmo na vrstvy byla průměrná hodnota 12,33 MPa. Mezivrstevná pevnost tedy odpovídala přibližně 38 % pevnosti ve směru tisknutých stop. Souhrnné statistiky jsou uvedeny v Tab. 13. Rozložení naměřených hodnot je zobrazeno v rámci krabicového grafu na Obr. 5-3, kde kruhové značky označují samostatné naměřené hodnoty.

Tab. 13 Souhrnné statistiky naměřených hodnot pevnosti kontinuálně tištěných dílů

Referenční varianta	n	Průměr [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
Kontinuální tisk ve směru stop	8	32,23	1,86	29,21	34,22
Kontinuální tisk kolmo na vrstvy	11	12,33	0,59	11,67	13,72



Obr. 5-3 Krabicový graf naměřené pevnosti u kontinuálně tištěných výtisků

Pevnost studeného spoje

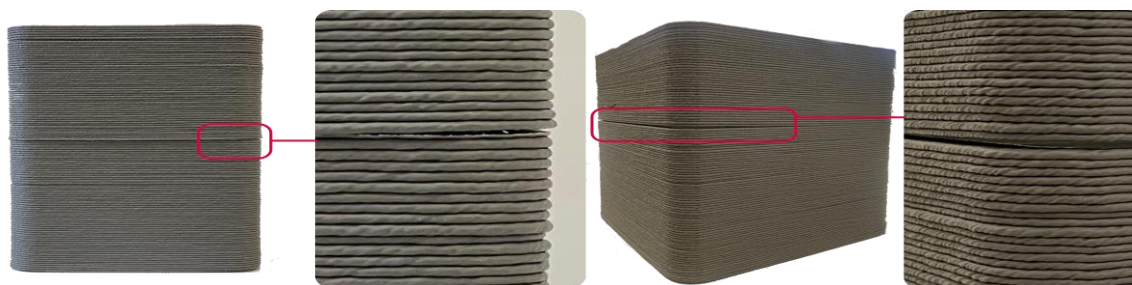
Referenční pevnost studeného spoje byla stanovena pro případ, kdy byl sekundární segment tištěn na již vychladlý substrát bez vytvoření tvarového zámku. Cílem tohoto měření bylo získat základní hodnotu pevnosti segmentového rozhraní, která odpovídala samotnému přerušení tiskového procesu a následnému obnovení depozice na studený povrch. Hodnoceny byly dvě varianty povrchu primárního segmentu. V první variantě byl sekundární segment tištěn přímo na neobrobený substrát, ve druhé variantě byl substrát před tiskem sekundárního segmentu obroben do roviny.

Při tisku na neobrobený substrát dosáhlo průměrné maximální přenesené obecné napětí hodnoty 2,77 MPa. Při tisku na substrát obrobený do roviny byla průměrná hodnota 2,14 MPa. Souhrnné statistiky referenčních měření studeného spoje jsou uvedeny v Tab. 14.

Tab. 14 Souhrnné statistiky naměřených hodnot pro zjištění pevnosti studených spojů

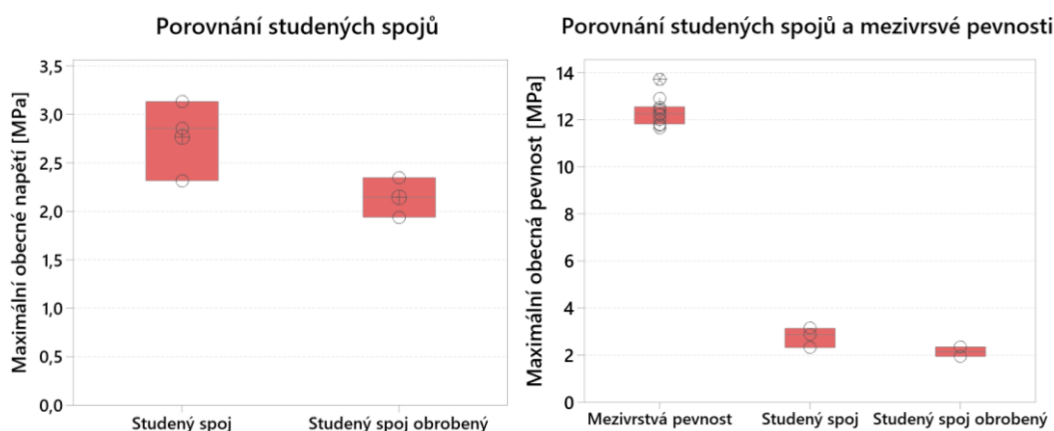
Varianta	n	Průměr [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
Studený spoj neobrobený	3	2,77	0,42	2,32	3,13
Studený spoj obrobený	2	2,14	0,29	1,94	2,35

Pro každou variantu bylo vyrobeno celé modelové těleso, ze kterého mělo být odebráno 16 zkušebních vzorků. U obou variant však po výrobě došlo k částečnému oddělení primárního a sekundárního segmentu, pravděpodobně v důsledku vnitřního pnutí a nízké soudržnosti studeného rozhraní. Z tohoto důvodu bylo možné pro tahovou zkoušku použít pouze omezený počet vzorků. Ukázka delaminovaných modelových těles je uvedena na Obr. 5-4.



Obr. 5-4 Oddělený horní segment u výtisků pro zjištění referenčních pevností studených spojů

Ve srovnání s mezivrstevnou pevností kontinuálního tisku, která dosáhla 12,33 MPa, odpovídala pevnost studeného spoje přibližně 22 % u neobrobeného substrátu a 17 % u substrátu obrobeného do roviny. Vzhledem k nízkému počtu použitelných vzorků byly tyto hodnoty použity pouze jako orientační pro následné hodnocení hybridních spojů. Porovnání pevnosti studených a kontinuálně tištěných spojů je znázorněno na Obr. 5-5 vpravo.



Obr. 5-5 Krabicový graf naměřené pevnosti studených spojů vlevo, porovnání s kontinuálním tiskem vpravo

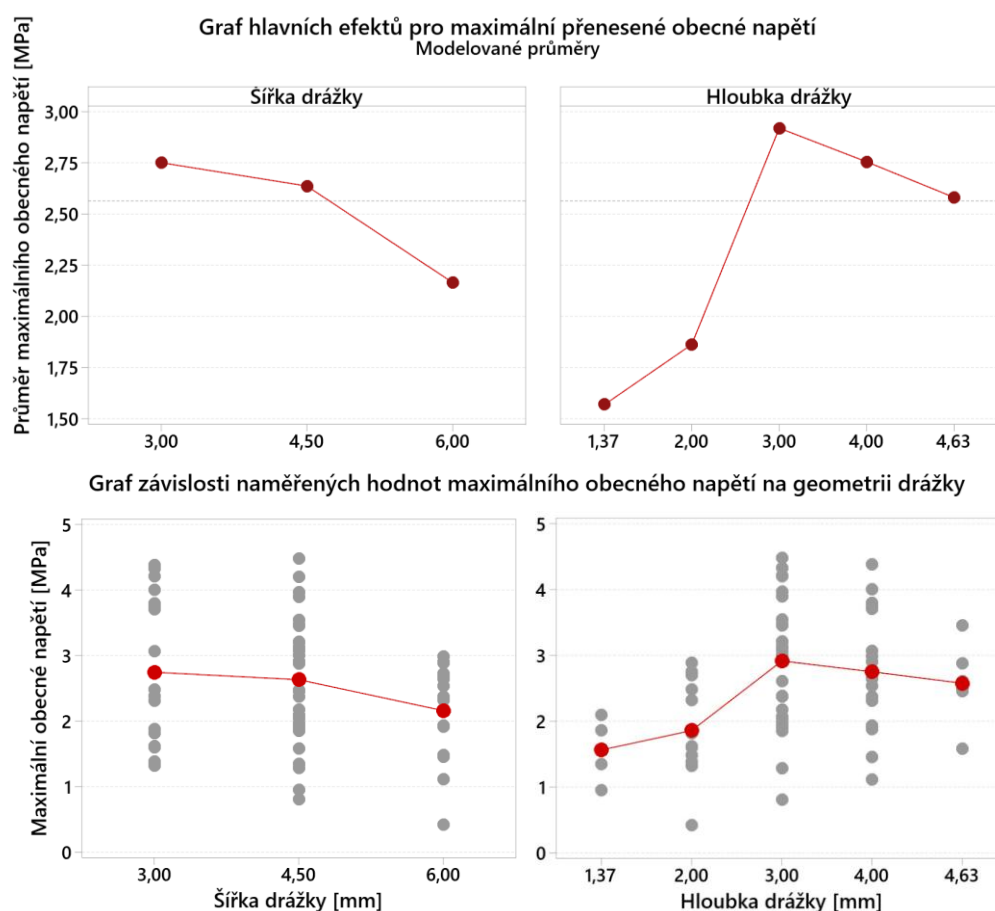
5.3 Výsledky screeningových experimentů

Screeningové experimenty sloužily k předběžnému posouzení vlivu zvolených parametrů, ověření vyrobitelnosti strategie a vymezení vhodnějšího rozsahu pro navazující experiment. Nejprve byly samostatně sledovány vlivy vybraných parametrů, následně byly ověřeny jejich kombinace v rozšířeném screeningovém experimentu.

5.3.1 Screening geometrie drážky

Vliv geometrie drážky byl posouzen na pěti modelových tělesech se šestihrannou geometrií, u nichž byla měněna šířka a hloubka drážky. Graf hlavních efektů znázorňuje průměrné modelované hodnoty maximálního přeneseného obecného napětí pro jednotlivé úrovně daného faktoru, přičemž vliv ostatních faktorů je zprůměrován. Slouží proto k rychlému posouzení hlavních trendů, nikoliv k úplnému vyhodnocení vzájemných interakcí.

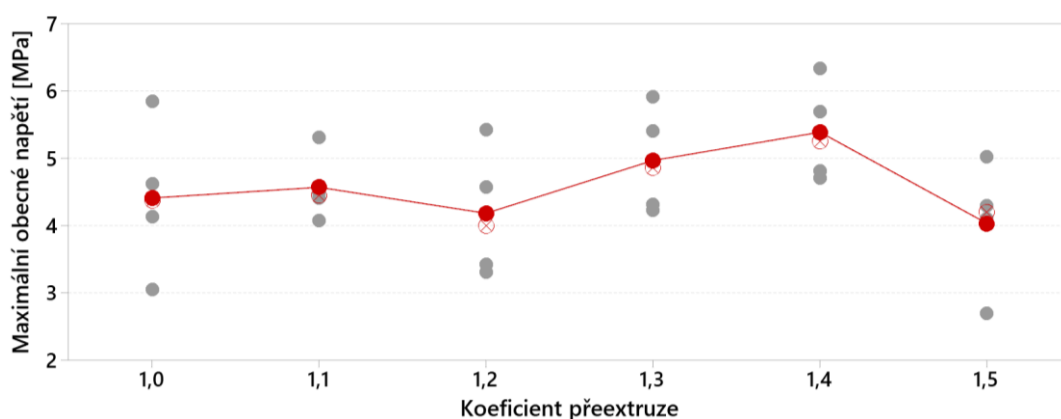
Z grafu hlavních efektů na Obr. 5-6 je patrný pokles průměrné pevnosti s rostoucí šířkou drážky. U hloubky drážky byl zaznamenán nelineární průběh s maximem při hloubce 3 mm. Graf závislosti naměřených hodnot tyto trendy potvrzuje, přičemž šedé body znázorňují jednotlivá experimentální měření a červené body průměrné hodnoty dané úrovně faktoru.



Obr. 5-6 Grafy screeningu: vliv šířky a hloubky drážky na maximální přenesené obecné napětí.

5.3.2 Screening koeficientu přeextruze

Vliv koeficientu přeextruze byl posouzen na šestihranném modelovém tělese s konstantní geometrií drážky. Šířka i hloubka drážky byly nastaveny na 3 mm a měněn byl pouze koeficient přeextruze v rozsahu 1,0 až 1,5. Na Obr. 5-7 jsou šedě znázorněny všechny naměřené hodnoty napětí, červeně jsou vyznačeny jejich průměry a křížem jsou značené mediánové hodnoty. Z grafu je patrné, že v rozsahu hodnot 1,0 až 1,4 měla pevnost spoje převážně rostoucí průběh. Výjimku představovala hodnota 1,2, u které byl zaznamenán lokální pokles. Nejvyšší průměrná pevnost byla dosažena při koeficientu přeextruze 1,4. Při dalším zvýšení na hodnotu 1,5 došlo k výraznému poklesu pevnosti, což naznačilo, že nadměrné množství dodané taveniny již nevedlo ke zlepšení mechanické odezvy spoje.



Obr. 5-7 Vliv koeficientu přeextruze na maximální přenesené obecné napětí při šířce a hloubce drážky 3 mm

5.3.3 Ověření geometrie

Součástí screeningové fáze bylo také ověření různých tvarů modelových těles viz Obr. 5-8. U podlouhlých obdélníkových těles bylo pozorováno oddělení segmentů v důsledku smrštění sekundárního segmentu, v krajních případech bylo zaznamenáno ohnutí tiskové základny. Dále bylo odhaleno že, po smrštění primárního segmentu na ně sekundární segmenty nenavazují. Tyto jevy zvyšovaly riziko, že výsledky tahových zkoušek budou ovlivněny defekty celého modelového tělesa, nikoliv pouze procesními parametry spoje. Na základě těchto pozorování byla do metodiky zavedena kompenzace smrštění a pro další experimenty byla zvolena kompaktnější čtvercová geometrie modelových těles.

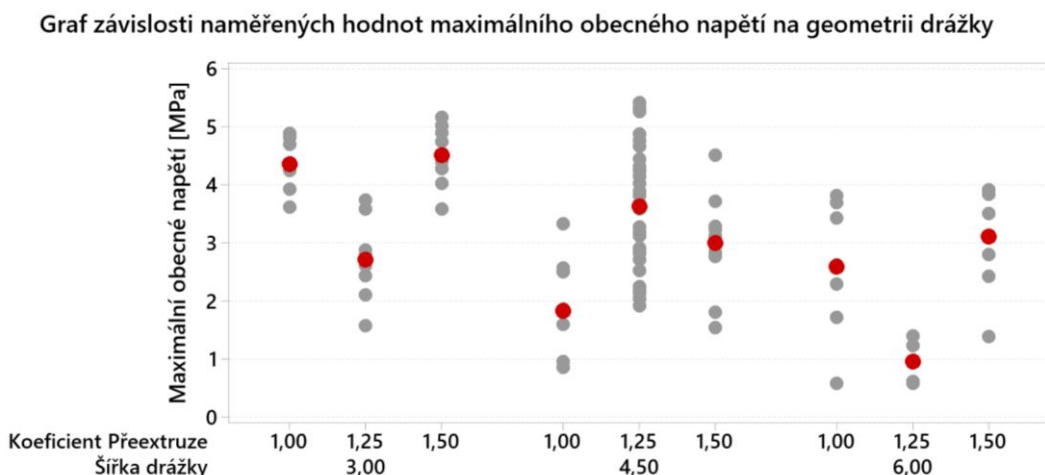


Obr. 5-8 Vybraná tělesa screeningových experimentů vlevo, deformace podlouhlého tělesa vpravo

Rozšířený screeningový experiment

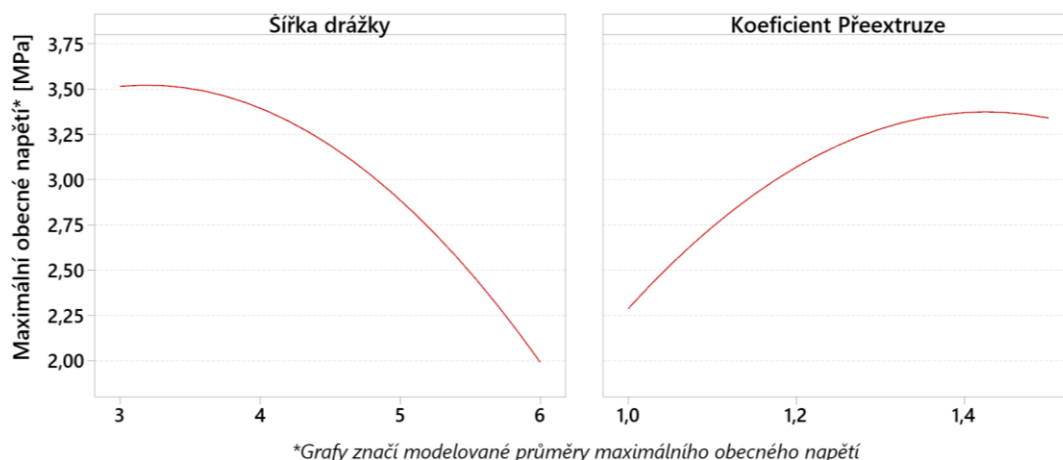
Na dílčí screeningové experimenty navázal rozšířený screeningový experiment, který shrnoval výsledky z pěti modelových těles čtvercové geometrie. V tomto experimentu byly současně měněny všechny tři zkoumané faktory, šířka drážky, hloubka drážky a přextruze.

Při zobrazení všech naměřených hodnot byl patrný výrazný rozptyl dat, viz Obr. 5-9. Graf znázorňuje jednotlivé hodnoty maximálního obecného napětí pro kombinace šířky drážky a koeficientu přextruze. Šedé body představují jednotlivá měření, červené body průměrné hodnoty pro danou kombinaci faktorů. Vzhledem k rozptylu hodnot a současné změně více faktorů nebyly hlavní trendy z experimentálních dat jednoznačně čitelné.



Obr. 5-9 Naměřené hodnoty maximálního obecného napětí pro kombinace zkoumaných parametrů

Z tohoto důvodu byl rozšířený screening vyhodnocen metodou regrese plochy odezvy v softwaru Minitab viz kapitola 4.3.7. Regresní model zahrnoval hlavní účinky zkoumaných faktorů, jejich kvadratické členy a vzájemné interakce. Graf hlavních efektů na Obr. 5-10 zobrazuje modelované průměrné hodnoty maximálního obecného napětí pro jednotlivé úrovně faktorů, přičemž vliv ostatních faktorů je zprůměrován. Z grafu je zřejmé, že s rostoucí šířkou drážky má pevnost spoje klesat, naopak s rostoucí přextruzí pevnost roste.



Obr. 5-10 Graf hlavních efektů modelovaných faktorů na maximální obecné napětí u rozšířeného screeningu

U šířky drážky byl zaznamenán nelineární průběh s maximem v oblasti menších hodnot, přibližně okolo 3 mm. U koeficientu přeextruze byl také pozorován zakřivený průběh s lokálním maximem v blízkosti hodnoty 1,4. Při regresním vyhodnocení byly zaznamenány také interakce mezi zkoumanými faktory. Ty se projeví zejména u kombinace šířky a hloubky drážky a u kombinace hloubky drážky s koeficientem přeextruze.

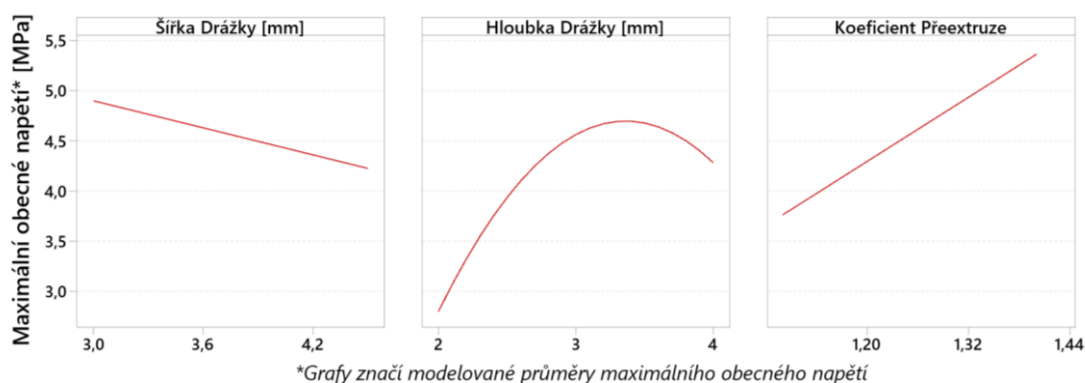
5.4 Finální experiment

Finální plánovaný experiment navazoval na výsledky rozšířeného screeningu, na jehož základě byl návrhový prostor zúžen na šířku drážky 3,0–4,5 mm, hloubku drážky 2,0–4,0 mm a koeficient přeextruze 1,1–1,4. Vyhodnocení bylo provedeno metodou regrese plochy odezvy se sledovanou odezvou maximálního obecného napětí zmiňovanou výše. Externí příloha 1 obsahuje souhrnný protokol finálního experimentu včetně mikroskopických snímků. Příloha A obsahuje seznam vzorků, jejich parametrů a naměřených napětí.

Do modelu byly zároveň zahrnuty výrobní bloky. Blok v tomto případě představoval skupinu vzorků pocházejících z jednoho modelového tělesa. Tento člen umožnil ověřit, zda se celé těleso neprojevovalo systematicky vyšší nebo nižší pevností napříč více sadami vzorků.

První vyhodnocení finálního experimentu bylo provedeno s původně plánovanými faktory, tedy se šířkou drážky, hloubkou drážky a koeficientem přeextruze. Výchozí model dosáhl hodnot $S = 0,75$ MPa, $R\text{-sq} = 89,51\%$, $R\text{-sq(adj)} = 88,17\%$ a $R\text{-sq(pred)} = 86,24\%$. V návaznosti na metodiku uvedenou v kapitole 4.3.7 byly tyto hodnoty použity pouze jako kontrola, že model dostatečně popisuje hlavní trendy v naměřených datech. Souhrn veškerých statistických hodnot regresního modelu je součástí přílohy B.

Hlavní trendy výchozího modelu jsou znázorněny na Obr. 5-11 a odpovídaly pozorováním z předchozích screeningových experimentů. Současně byl ve finálním experimentu zřetelněji popsán vliv hloubky drážky, u které byl patrný nelineární průběh. Pevnost s rostoucí hloubkou nejprve narůstala, zatímco při vyšších hodnotách již docházelo ke zpomalení růstu, případně k poklesu modelované odezvy.

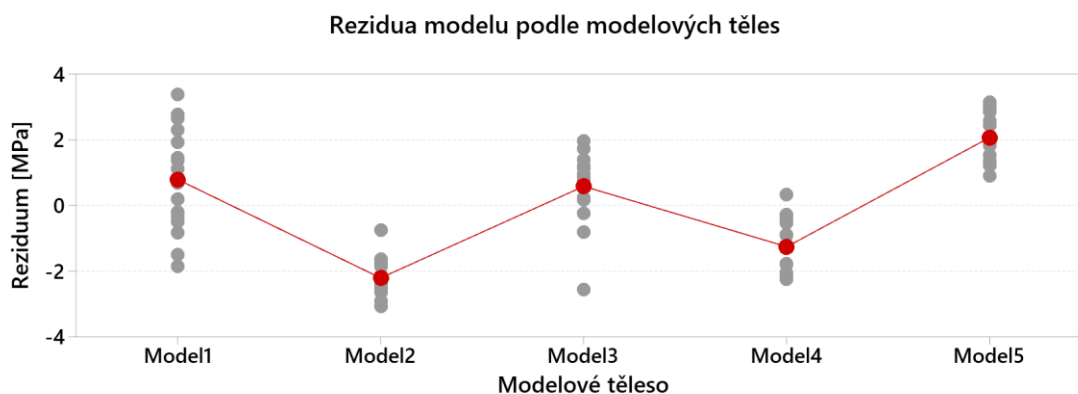


Obr. 5-11 Graf hlavních efektů zkoumaných faktorů na maximální obecné napětí u finálního experimentu

Přestože se model podle těchto ukazatelů jevil jako použitelný, analýza rozptylu ukázala výrazný vliv výrobních bloků. Některá modelová tělesa vykazovala systematicky nižší pevnost napříč více sadami vzorků, což znamenalo, že část variability nebyla vysvětlena pouze změnou zkoumaných parametrů, ale také rozdíly mezi jednotlivými tělesy.

Pro názorné zobrazení tohoto jevu byla rezidua modelu bez zahrnutí výrobních bloků vykreslena podle jednotlivých modelových těles. Reziduum představuje rozdíl mezi naměřenou hodnotou a hodnotou predikovanou modelem, a je vyjádřeno v jednotkách sledované odezvy, tedy v MPa. Záporné reziduum znamená, že naměřená pevnost byla nižší než hodnota predikovaná modelem, kladné reziduum znamená vyšší naměřenou pevnost.

Z grafu na Obr. 5-12 je patrné, že modelová tělesa 2 a 4 vykazovala výrazně záporná rezidua, tedy systematicky nižší pevnost oproti hodnotám predikovaným z plánovaných faktorů. Šedé body značí vypočtená rezidua pro individuální vzorky, červené body značí průměrné hodnoty jednotlivých modelů a jsou spojeny spojnici pro snazší interpretaci rozdílů.

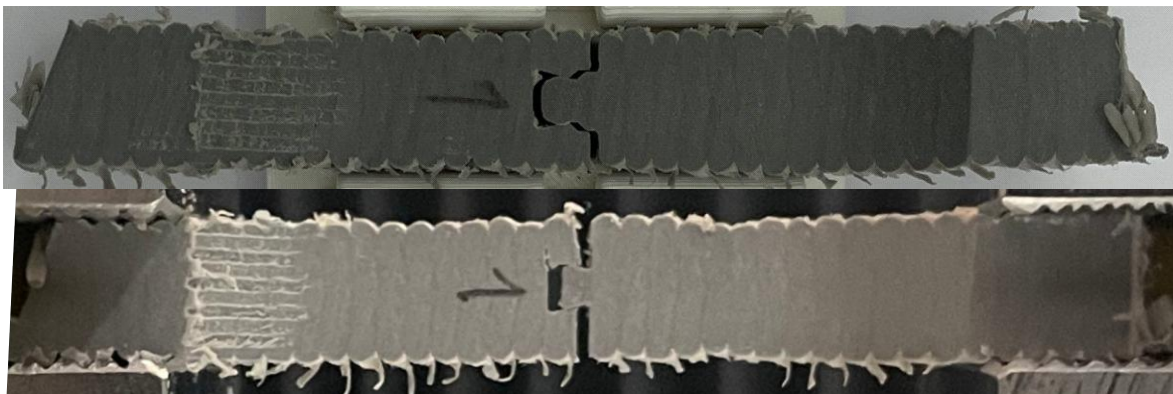


Obr. 5-12 Rezidua modelu bez zahrnutí výrobních bloků podle jednotlivých modelových těles

5.4.1 Mechanismy porušení vzorků

Při vyhodnocení tahových zkoušek byly pozorovány rozdílné způsoby porušení jednotlivých sad vzorků. Tahová zkouška byla u každého vzorku ukončena v okamžiku, kdy měřená síla po dosažení maxima poklesla pod 10 % maximální naměřené hodnoty. Hodnocení mechanismu porušení proto vycházelo ze stavu vzorku po ukončení zkoušky. U žádného z hodnocených vzorků nebylo pozorováno porušení samotného čepu, ale všechna porušení spočívala v selhání v oblasti drážky, tedy v primárním segmentu.

První skupinu tvořily vzorky, u nichž došlo k vysunutí čepu z drážky. U části těchto vzorků bylo vysunutí doprovázeno rozevřením drážky po iniciaci trhliny v jednom z rohů jejího dna. U některých vzorků, jejichž naměřená pevnost byla výrazně nižší než hodnota očekávaná podle modelu, došlo k vysunutí čepu prakticky bez viditelného poškození primárního segmentu. Tento typ porušení je uveden na Obr. 5-13.



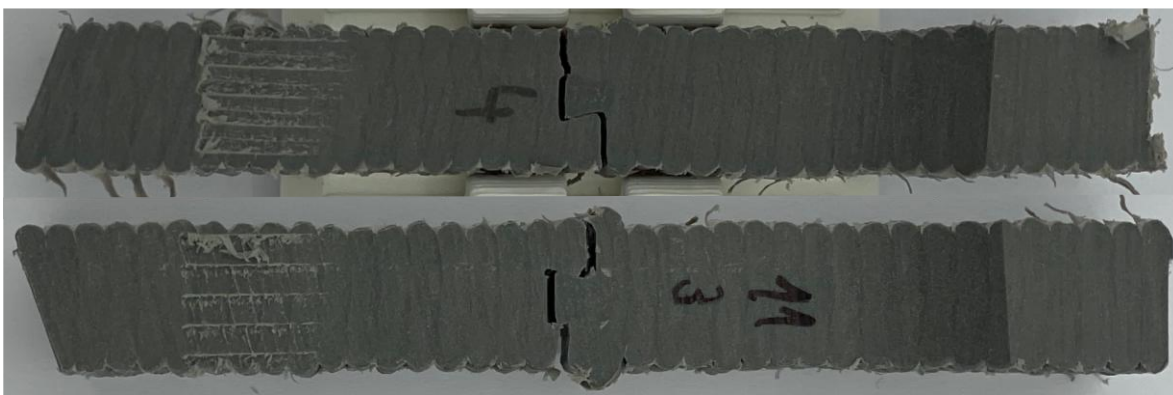
Obr. 5-13 Mechanismus porušení spoje typu vysunutí

Druhou skupinu tvořily vzorky, u nichž došlo ke křehkému lomu v oblasti primárního segmentu viz Obr. 5-14. V některých případech probíhal lom přibližně vodorovně v oblasti dna drážky. Pokud se dno drážky nacházelo v blízkosti mezivrstvého rozhraní, šířil se lom po rozhraní, případně postupoval z oblasti dna drážky do nejbližšího mezivrstvého rozhraní.



Obr. 5-14 Mechanismus porušení spoje charakteru křehkého lomu

Třetím pozorovaným typem bylo kombinované porušení, viz Obr. 5-15. V tomto případě došlo na jedné straně čepu k porušení na ploše rozhraní mezi segmenty, zatímco na druhé straně vzorku probíhal lom v oblasti dna drážky nebo v blízkém mezivrstvěném rozhraní.



Obr. 5-15 Mechanismus kombinovaného porušení spoje

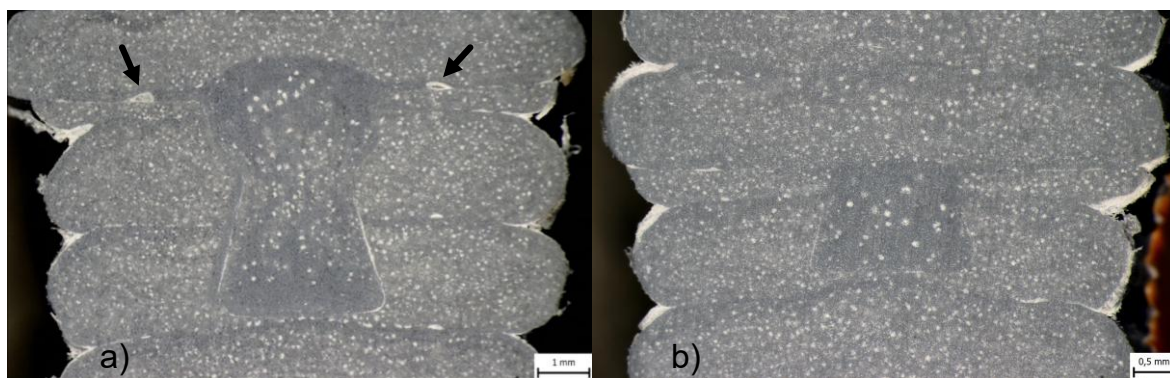
5.4.2 Mikroskopická analýza výrobní nepřesnosti

Mikroskopická analýza byla provedena na středových vzorcích odebraných ze stěn testovaných modelových těles podle metodiky uvedené v kapitole 4.3.6. Každý středový vzorek byl odebrán z oblasti mezi druhým a třetím dogbone vzorkem a reprezentoval stav zaplnění drážky pro jednu sadu výrobních parametrů. Po zvýšení kontrastu snímků byla rozlišitelná mezivrstvá rozhraní, průběh zaplnění drážky i následné přetištění sekundárním segmentem. Bílé oblasti zřetelné na snímcích v Obr. 5-16 pravděpodobně značí póry. Souhrnný protokol včetně snímků z mikroskopické analýzy je uveden v externí příloze 1.

U sad vzorků s nižší pevností oproti hodnotám predikovaným z modelu byla odhalena výrobní nepřesnost. Bylo pozorováno, že při zaplňování drážky část taveniny nevyplnila pouze obrobený profil, ale byla vytlačena na horní plochu primárního segmentu. Na okrajích této přetečené vrstvy byly často viditelné póry vzniklé v oblasti přechodu mezi obrobenou horní plochou, přetečenou taveninou a následující nanesenou vrstvou, v Obr. 5-16 a) jsou označeny černou šipkou.

Tento jev byl označen jako výšková odchylka polohy trysky vůči drážce. Odchylka byla stanovena jako vzdálenost mezi horní plochou primárního segmentu a horní plochou přetečené taveniny. Pro jeden středový vzorek bylo provedeno celkem osm měření odchylky. Z těchto hodnot byla určena průměrná výšková odchylka trysky pro danou sadu vzorků.

Typický případ výrobní nepřesnosti je uveden na Obr. 5-16 a). Kromě přetečení taveniny nad horní plochu primárního segmentu je zde patrné také lokální nahromadění materiálu nad měřenou plochou. Tento útvar vznikl zejména u sad s vyšším koeficientem přextruze a vznikl za tryskou extruderu. Na Obr. 5-16 b) je pro srovnání uveden vzorek bez zjištěné výškové odchylky trysky, u kterého byla tavenina zatlačena přímo do drážky a nebylo patrné výrazné přetečení materiálu na horní plochu primárního segmentu.



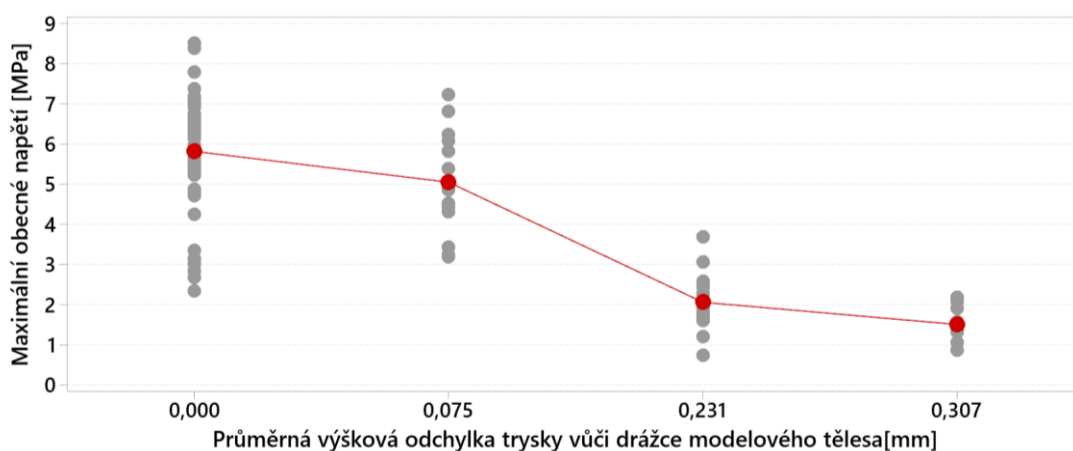
Obr. 5-16 Mikroskopická analýza: a) vzorek s výškovou odchylkou trysky b) vzorek bez výškové odchylky

U sad, u nichž byla tato nepřesnost zjištěna, byla vyrobena náhradní modelová tělesa se zvýšenou kontrolou polohy trysky. Nově vyrobené sady byly následně zahrnuty do vyhodnocení společně s původními daty a výšková odchylka trysky vůči drážce byla do regresního modelu doplněna jako dodatečně stanovená proměnná.

5.4.3 Vyhodnocení se zahrnutím výrobní nepřesnosti

Po zahrnutí výškové odchylky trysky vůči drážce byl vytvořen rozšířený regresní model. Model dosáhl hodnot $S = 0,639$ MPa, $R\text{-sq} = 92,30 \%$, $R\text{-sq}(\text{adj}) = 91,23 \%$ a $R\text{-sq}(\text{pred}) = 89,70 \%$. Oproti výchozímu modelu se mírně zvýšila popsána variabilita dat i predikční schopnost modelu. Výšková odchylka trysky vůči drážce se v modelu projevila jako statisticky významná proměnná. Kompletní výstup regresního modelu viz příloha B.

Rozložení naměřených hodnot podle výškové odchylky trysky tištěných modelových těles je uvedeno na Obr. 5-17. Body představují jednotlivé vzorky a červená spojnice znázorňuje průměrnou hodnotu pro danou úroveň odchylky. Se zvyšující se výškovou odchylkou docházelo k poklesu maximálního obecného napětí. Při nulové odchylce byly zaznamenány nejvyšší hodnoty, zatímco při odchylkách 0,2–0,3 mm se hodnoty pohybovaly výrazně níže.



Obr. 5-17 Vliv výškové odchylky trysky vůči drážce na maximální přenesené obecné napětí

Modelované hlavní efekty rozšířeného regresního modelu jsou uvedeny na Obr. 5-18. Klesající průběh u výškové odchylky ukazuje, že s rostoucí odchylkou trysky od drážky klesala pevnost spoje. Skutečná poloha trysky při plnění drážky představovala významnou proměnnou. Současně byly zachovány základní trendy původně sledovaných faktorů.

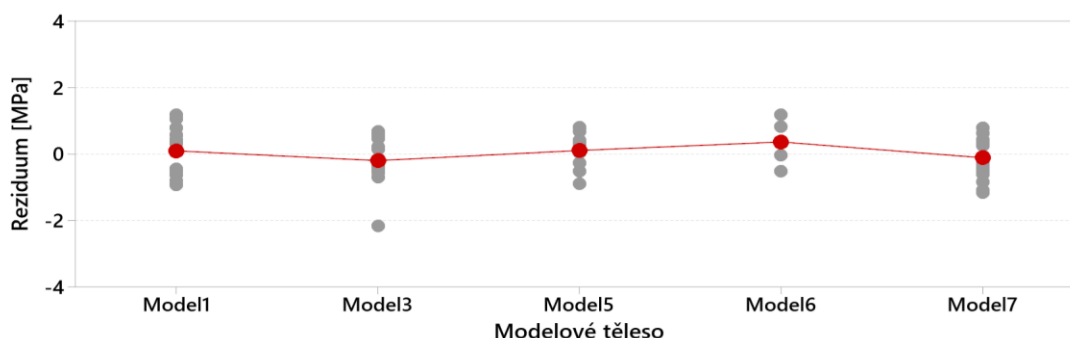


Obr. 5-18 Graf hlavních efektů rozšířeného modelu se zahrnutím výškové odchylky trysky vůči drážce

5.4.4 Vyhodnocení vzorků po odstranění výškové odchylky trysky

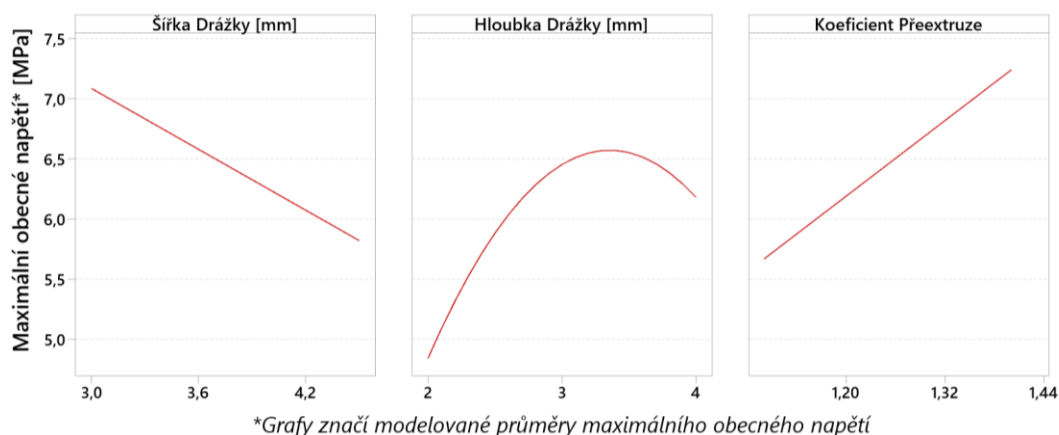
Pro oddělení vlivu samotné geometrie spoje od výrobní nepřesnosti byla samostatně vyhodnocena pouze tělesa, u nichž byla výšková odchylka trysky vůči drážce nulová. Tento soubor představoval případy, kdy byla tavenina při tisku sekundárního segmentu zatlačována přímo do drážky. Model pro tyto vzorky dosáhl hodnot $S = 0,658$ MPa, $R\text{-sq} = 82,67 \%$, $R\text{-sq}(\text{adj}) = 77,33 \%$ a $R\text{-sq}(\text{pred}) = 69,18 \%$. Model jako celek byl statisticky významný. Kompletní výstup regresního modelu je uveden v příloze B.

Pro kontrolu vlivu jednotlivých modelových těles byla rezidua modelu bez zahrnutí výrobních bloků vykreslena podle modelového tělesa. Ve srovnání s výchozím vyhodnocením již nebylo patrné tak výrazné systematické oddělení některých modelových těles směrem k záporným reziduům. To ukázalo, že po odstranění sad zatížených výrobní nepřesností byl vliv rozdílů mezi modelovými tělesy méně výrazný. Šedé body značí vypočtená rezidua pro individuální vzorky, červené body značí průměrné hodnoty jednotlivých modelů a jsou spojeny spojnici pro snazší interpretaci rozdílů.



Obr. 5-19 Rezidua bez zahrnutí výrobních bloků podle jednotlivých modelových těles bez odchylky trysky

Hlavní efekty modelu jsou uvedeny na Obr. 5-20. Průběhy jednotlivých faktorů odpovídaly předchozím vyhodnocením, po omezení souboru na vzorky bez výrobní nepřesnosti se však modelované průměrné hodnoty maximálního přeneseného obecného napětí posunuly do vyšší úrovně. Posun odpovídal odstranění sad zatížených výškovou odchylkou trysky.



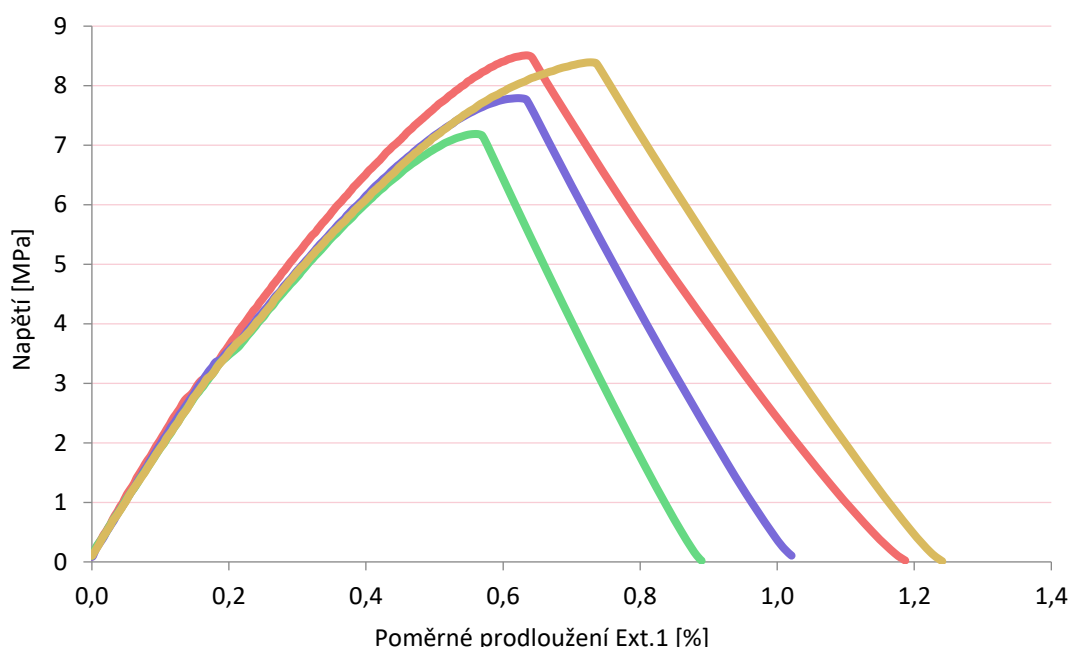
Obr. 5-20 Graf hlavních efektů rozšířeného modelu bez zahrnutí výškové odchylky trysky vůči drážce

5.4.5 Nejvyšší dosažená pevnost spoje

Nejvyšší průměrná naměřená pevnost byla dosažena u sady vzorků se šířkou drážky 3,0 mm, hloubkou drážky 4,0 mm a koeficientem přeextruze 1,4. Průměrné maximální přenesené obecné napětí této skupiny bylo 7,97 MPa při směrodatné odchylce 0,61 MPa. Nejvyšší jednotlivá hodnota v této sadě dosáhla 8,51 MPa. Souhrnné hodnoty sady s nejvyšším naměřeným maximálním napětím jsou uvedeny v Tab. 15. Průběhy tahových zkoušek testovaných vzorků této sady jsou vykresleny na grafu v Obr. 5-21.

Tab. 15 Nejlepší naměřená sada finálního plánovaného experimentu

Šířka drážky [mm]	Hloubka drážky [mm]	Koeficient přeextruze [-]	n	Průměr [MPa]	Směr. odch. [MPa]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
3,0	4,0	1,4	4	7,97	0,61	7,19	8,51



Obr. 5-21 Vykreslené průběhy tahových zkoušek jednotlivých těles ze sady s nejvyšší dosaženou pevností

Srovnání s referenčními hodnotami

Ve srovnání s referenčními studenými spoji představovala nejlepší naměřená skupina výrazné zvýšení pevnosti. Průměrná hodnota 7,97 MPa odpovídala přibližně 2,9násobku pevnosti studeného spoje na neobrobeném substrátu a přibližně 3,7násobku pevnosti studeného spoje na substrátu obrobeném do roviny. Ve vztahu k mezivrstevné pevnosti kontinuálně tištěných vzorků, která dosáhla 12,33 MPa, odpovídala nejlepší naměřená skupina přibližně 65 % této hodnoty.

6 DISKUZE

6.1 Interpretace výsledků

6.1.1 Procesní parametry a kvalita kontinuálního tisku

Tiskové procesní parametry materiálu PP GF30 byly v této práci definovány primárně s ohledem na zajištění geometrické stability a opakovatelnosti depozice, nikoliv pro přímou maximalizaci mechanických vlastností. Hlavním cílem experimentu bylo kvantifikovat vliv hybridní aditivně-subtraktivní strategie na pevnost segmentového spoje. Pro relevantní hodnocení tohoto vlivu bylo nezbytné nejprve stanovit referenční stav kontinuálního tisku, reprezentovaný stabilní tiskovou stopou o šířce 10 mm a výšce vrstvy 2 mm bez makroskopických defektů.

Zvolený postup proto sledoval praktická procesní kritéria. Výsledkem bylo procesní okno, které umožnilo vyrábět zkušební tělesa se šířkou stopy 10 mm a výškou vrstvy 2 mm.

Tahové zkoušky pro stanovené pevnosti kontinuálně tištěných vzorků potvrdily výraznou očekávanou anizotropii mechanických vlastností. Vzorky zatěžované ve směru tisknutých stop dosáhly průměrného maximálního přeneseného obecného napětí 32,24 MPa, zatímco vzorky zatěžované kolmo na vrstvy dosáhly 12,33 MPa. Pevnost ve směru Z tedy odpovídala přibližně 34 % pevnosti ve směru vrstev, což představuje pokles přibližně o 66 %.

Tento výsledek byl porovnán se studií Honarvar et al. [7], která se zabývala LFAM tiskem recyklovaného PP + 30 % GF. Autoři hodnotili vliv procesních parametrů na ohybovou pevnost a uvádějí maximální podélnou ohybovou pevnost přibližně 108 MPa. Příčná ohybová pevnost se v závislosti na nastavení procesu pohybovala v rozsahu 14 až 34 MPa. Poměr příčné a podélné pevnosti tedy dosahoval přibližně 0,31 při vhodně nastavených parametrech a přibližně 0,13 při méně vhodném procesním nastavení. Přímé porovnání absolutních hodnot není možné, protože citovaná studie hodnotila ohybovou pevnost, zatímco v této práci byla použita tahová zkouška. Pro interpretaci je však podstatná relativní míra anizotropie.

V této práci byl u kontinuálně tištěných referenčních vzorků zjištěn poměr pevnosti 0,34. Tato hodnota je velmi blízká poměru 0,31, který ve studii Honarvar et al. [41] odpovídal vhodně nastaveným procesním parametrům. Velmi zjednodušeně lze tedy konstatovat, že zvolené procesní nastavení vedlo k mezivrstvé soudržnosti srovnatelné s publikovanými výsledky pro obdobný materiálový systém. Parametry proto sice nelze označit za mechanicky optimální, ale je možné je považovat za vhodné pro vytvoření referenčního stavu kontinuálního tisku.

6.1.2 Význam referenčních studených spojů

Studené spoje ukázaly, že segmentová výroba je při použití semikrystalických polymerů, například u zkoumaného kompozitu polypropyleny, prakticky neproveditelná. Studený spoj na neobrobeném substrátu dosáhl průměrné pevnosti pouze 2,77 MPa a studený spoj na obrobeném substrátu 2,14 MPa. Ve srovnání s kontinuální mezivrstevní pevností 12,33 MPa to odpovídá přibližně 22 %, respektive 17 %. Takto nízké hodnoty potvrzují, že samotné obnovení tisku na vychladlý segment nevytváří dostatečně únosné rozhraní.

Ještě významnější je skutečnost, že u obou modelových těles se studeným spojením došlo k oddělení horního segmentu již během výroby. Z tohoto důvodu bylo možné provést tahovou zkoušku pouze na velmi omezeném počtu vzorků. Tento jev ukazuje, že problém studeného spoje není pouze otázkou snížené pevnosti při zatěžování, ale představuje zásadní omezení samotného výrobního procesu. U semikrystalických polymerů s výrazným smrštěním proto nelze segmentové strategie bez modifikace spoje mezi segmenty spolehlivě realizovat.

Nižší pevnost obrobeného studeného spoje oproti neobrobenému lze pravděpodobně vysvětlit odstraněním přirozené povrchové textury tiskové stopy. Neobrobený povrch obsahoval nerovnosti, do nichž mohla nově nanesená tavenina částečně zatéct a vytvořit slabé lokální mechanické zaklesnutí. Obrobením do roviny byla topografie odstraněna, takže rozhraní neposkytovalo srovnatelný mechanický odpor. Protože však nebyla měřena drsnost ani skutečná kontaktní plocha a výsledky vycházejí z malého počtu vzorků, jde pouze o pravděpodobnou interpretaci.

6.1.3 Funkce hybridního tvarového spoje

Hybridní tvarový spoj byl navržen tak, aby segmentové rozhraní nebylo závislé pouze na slabém materiálovém spojení v podobě studeného spoje, ale aby se část zatížení přenesla prostřednictvím mechanického zaklesnutí sekundárního segmentu v obrobené drážce.

Naměřené výsledky ukazují, že tento princip spoje má na pevnost segmentového rozhraní významný vliv. Nejlepší sada vzorků dosáhla průměrného maximálního obecného napětí 7,97 MPa. Ve srovnání se studeným spojením na neobrobeném substrátu, jehož pevnost byla 2,77 MPa, šlo přibližně o 2,9násobné zvýšení. Ve vztahu ke studenému spoji na obrobeném substrátu s pevností 2,14 MPa bylo zvýšení přibližně 3,7násobné. Současně však hybridní spoj dosáhl pouze přibližně 65 % pevnosti kontinuálního mezivrstevního spoje, která činila 12,33 MPa. Navržená strategie tedy výrazně zlepšila pevnost studeného segmentového rozhraní v tahu, ale nedosáhla úrovně kontinuálního tisku.

Pro srovnání lze uvést práci Weflen et al. [6], kteří zkoumali tvarové spojování segmentů z materiálu ABS 20CF. Pevnost studeného spoje na obrobeném substrátu byla přibližně 3,6 MPa. Rybinový spoj s úhlem 20° zvýšil pevnost o 37 %, tedy přibližně na 4,93 MPa, a varianta s úhlem 40° o 41 %, tedy přibližně na 5,08 MPa.

Ve srovnání s uvedenými hodnotami dosáhl hybridní spoj navržený v této práci vyšší absolutní pevnosti než obě rybinové varianty popsané Weflenem [6]. Oproti rybině 20° byla pevnost vyšší přibližně 1,6krát a oproti rybině 40° přibližně 1,57krát. Relativní zlepšení vůči obrobenému studenému spoji bylo v této práci rovněž výraznější než u Weflena.

Toto porovnání však nelze chápat jako přímé srovnání účinnosti obou geometrií spoje. Výsledky byly získány pro odlišný materiál, jinou geometrii zkušebního tělesa, jiné procesní podmínky a pravděpodobně i odlišný mechanismus porušení. Důležitý rozdíl spočívá také v charakteru substrátu. V této práci byla drážka vytvořena v rámci jedné tiskové stopy, zatímco Weflen et al. obráběli drážku do tělesa tvořeného více perimetry [6]. Výsledná pevnost jejich vzorků proto mohla být ovlivněna nejen samotnou geometrií tvarového zámku, ale také soudržností mezi jednotlivými perimetry a vrstvami v okolí drážky. Tato vnitřní rozhraní mohla působit jako dodatečná slabá místa a částečně snižovat dosaženou únosnost. Z tohoto důvodu je vhodné srovnání chápat především jako orientační zasazení dosažených hodnot do kontextu dříve publikovaných výsledků.

6.1.4 Vliv vystředění drážky vůči tištěné stopě

Zásadním zjištěním této práce bylo, že pevnost segmentového rozhraní nezávisela pouze na sledovaných návrhových parametrech, tedy na šířce drážky, hloubce drážky a koeficientu přeextruze. Významný vliv měla také skutečná výrobní přesnost. Ukázalo se, že i při shodných nominálních hodnotách geometrie může být výsledná únosnost spoje výrazně odlišná, pokud se reálné provedení spoje odchyluje od navrženého stavu.

Prvním kritickým požadavkem bylo vystředění drážky vůči tištěné stopě. Střed obrobené drážky musí být souosý se středem tiskové stěny. Pokud dojde k vyosení drážky, je na jedné straně profilu odstraněno větší množství materiálu než na druhé. Tím dochází k lokálnímu oslabení nosného průřezu substrátu. Toto oslabení má přímý negativní dopad na výslednou únosnost spoje, protože porušení může být iniciováno právě v místě ztenčené stěny drážky.

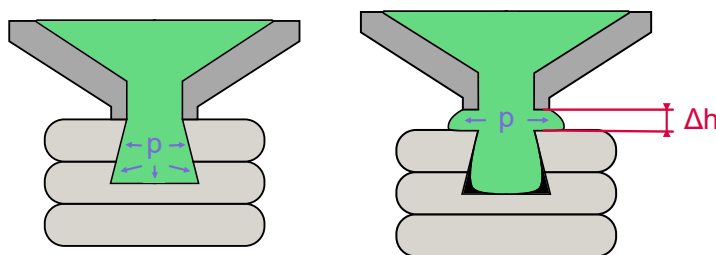
Vystředění drážky bylo ovlivněno především dvěma faktory. Prvním byla vzájemná kalibrace výrobních drah obou používaných nástrojů. Při nedostatečném sladění relativních trajektorií mohlo dojít k bočnímu posunu mezi aditivní a subtraktivní operací. Druhým faktorem bylo smrštění primárního segmentu během chladnutí. Po vytištění docházelo ke změně rozměrů dílu, a proto bylo nutné odpovídajícím způsobem korigovat obráběcí trajektorie. Bez korekce byla drážka obrobena s polohovým offsetem vůči reálné střednici stěny. Obráběcí trajektorie mohla být zdánlivě vystředěna vůči horní ploše primárního segmentu, ale bez správného škálování neodpovídala skutečné poloze středu tištěné stopy.

Vlivy spojené s vystředěním drážky byly identifikovány a eliminovány již ve screeningové části práce. Sady vzorků finálního experimentu proto nebyly tímto typem výrobní nepřesnosti významně zatíženy. Po odstranění tohoto vlivu se však ukázalo, že na výslednou pevnost působí další, ještě významnější výrobní faktor.

6.1.5 Výšková odchylka trysky vůči horní ploše segmentu

Nejvýznamnějším metodickým poznatkem finálního experimentu bylo odhalení výrobní nepřesnosti, která nebyla přímo popsána návrhovými faktory experimentu. Původní regresní model pracoval pouze s parametry geometrie drážky a koeficientem přeextruze. Přestože vykazoval dobré souhrnné statistické ukazatele, analýza reziduí odhalila systematické rozdíly mezi jednotlivými modelovými tělesy. Tento výsledek znamenal, že část variability pevnosti nebyla vysvětlena zvolenými návrhovými faktory. Tedy i přes stejné nastavení procesních parametrů vykazovala některá tištěná tělesa systematicky nižší pevnost.

Nejvýraznější rozdíl byl zjištěn při tisku dvou modelových těles na jedné tiskové platformě. V těchto případech mělo druhé těleso opakovaně násobně nižší pevnost než těleso první. Následná mikroskopická analýza ukázala, že příčinou tohoto rozdílu byla výšková odchylka trysky vůči obrobené drážce na Obr. 6-1 označena Δh . Ve fázi zatisknutí drážky se tryska extruderu nenacházela v optimální výškové poloze, která je znázorněna na Obr. 6-1 vlevo. Za optimální stav lze považovat situaci, kdy se při zaplňování drážky spodní plocha trysky dotýká horní plochy primárního segmentu, segmentu, do kterého je drážka obrobená, tento stav je znázorněn na Obr. 6-1 vpravo. V tom případě tavení proudí přímo do profilu drážky.



Obr. 6-1 Schématické znázornění výškové odchylky trysky vůči obrobené ploše

Výšková odchylka se opakovaně projevovala u druhých těles na tiskové platformě. Příčinou bylo to, že výšková kalibrace trysky vůči obrobené ploše byla prováděna vždy na prvním segmentu. Po přejetí na druhý segment vznikla odchylka způsobená nepřesností polohování robotického ramene. Tento problém nesouvisel pouze s opakovatelností polohy robotu. Opakovatelnost polohy robotického ramene byla $\pm 0,04$ mm. Kritický problém však vznikl při použití dvou různých nástrojů pro aditivní a subtraktivní operaci. Extruder a obráběcí vřeteno měly odlišné vysunutí vůči přírubě robota. To znamená, že i při shodné poloze TCP nebylo natočení jednotlivých kloubů robotického ramene stejné.

Problém vznikl pravděpodobně kumulací nepřesností při seřízení TCP obou používaných nástrojů. Aditivní trajektorie byla vztažena k TCP extruderu, zatímco subtraktivní operace k TCP obráběcího vřetene. I malé zbytkové odchylky v kalibraci jednotlivých nástrojů se proto při jejich vzájemném navázání začaly sčítat a projevy se jako rozdíl mezi skutečnou polohou obrobené drážky a následnou polohou trysky při jejím zaplňování. Naměřená výšková odchylka dosahovala hodnot v rozsahu 0,1 až 0,3 mm a měla zásadní dopad na pevnost spoje, protože ovlivnila způsob zatlačení taveniny do drážky viz Obr. 6-1.

Toto zjištění má zásadní dopad na metodiku tvorby hybridního tvarového segmentového spoje při použití na robotických pracovištích. Nestačí provést pouze obecnou kalibraci nástrojů na jednom referenčním místě platformy.

Před tvorbou každého spoje je nutné ověřit a případně korigovat vzájemnou polohu aditivní a subtraktivní trajektorie přímo v místě, kde má být spoj vytvořen.

6.1.6 Význam tlaku taveniny při zaplňování drážky

Výsledná únosnost hybridního spoje není dána pouze kombinací studeného rozhraní a mechanického zaklínění. Rozhodující je také způsob, jakým je obrobená drážka reálně zaplněna taveninou. Hertle et al. popisují vznik polymerního spoje jako proces, který začíná vytvořením těsného kontaktu mezi polymerními povrchy a následně může pokračovat samodifúzí polymerních řetězců přes rozhraní [36]. Míra těsného kontaktu přitom závisí zejména na tlaku a viskozitě taveniny, povrchové struktuře a době kontaktu. V této práci nebyl tlak taveniny v drážce přímo měřen, proto jej nelze kvantifikovat. Přesto lze ale předpokládat, že při optimálním zaplnění docházelo v oblasti drážky k tlakovému nárůstu.

Příznivý stav nastával tehdy, když se spodní plocha trysky při zaplňování drážky dotýkala horní plochy primárního segmentu. Tryska v takovém případě působila jako mechanické omezení toku taveniny mimo oblast drážky viz Obr. 6-1. Materiál byl nucen proudit do obrobeného profilu, čímž se zlepšovalo zaplnění drážky. Současně se zvyšovala pravděpodobnost těsného kontaktu mezi taveninou a povrchem substrátu. Spoj proto mohl pracovat jako kombinace mechanického tvarového zámku a omezeného difúzního spojení.

Při zvýšené poloze trysky vůči primárnímu segmentu vznikl mezi spodní plochou trysky a horním povrchem segmentu volný prostor viz Obr. 6-1. Tavenina potom mohla proudit mimo drážku, takže v profilu pravděpodobně nevznikal dostatečný lokální tlak. Důsledkem byl horší kontakt taveniny se stěnami drážky a omezené zaplnění celého profilu. Část materiálu navíc přetékala na horní plochu primárního segmentu. Při tvorbě následující vrstvy tak mohla mezi přetečenou taveninou, substrátem a nově nanesenou vrstvou vzniknout mezera, která snižovala skutečnou kontaktní plochu mezi horním a spodním segmentem.

Únik taveniny mimo drážku současně omezoval vytvoření plnohodnotného tvarového zámku. Pokud tavenina dostatečně nevyplnila celý profil, zejména rohy drážky, nevznikl čep přesně odpovídající obrobené geometrii. Mechanická únosnost spoje pak byla omezena nejen nedostatečným materiálovým kontaktem, ale také horší kvalitou samotného zaklesnutí. Tomu odpovídal i pozorovaný mechanismus porušení. U těles s vyšší výškovou odchylkou trysky docházelo při tahových zkouškách převážně k vysunutí čepu z drážky. Porušení probíhalo bez významného poškození substrátního segmentu. Čep se z profilu uvolnil, případně došlo pouze k rozevření drážky. Toto chování ukazuje, že zatížení nebylo účinně přeneseno do objemu primárního segmentu. Spoj pracoval převážně tvarově, avšak kvůli nedostatečnému zaplnění drážky nebyl dostatečně účinný ani tento mechanismus.

Odlišné chování vykazovaly vzorky s vyšší pevností. U nich docházelo častěji ke křehkému lomu v primárním segmentu v oblasti dna drážky nebo v blízkém mezivrstevném rozhraní. Zatížení se přeneslo do substrátu a porušení proběhlo v oblasti, kde se nepříznivě kombinovala koncentrace napětí, oslabení průřezu drážkou a mezivrstvá struktura výtisku. Dobře vytvořený hybridní spoj tedy změnil charakter selhání ze selhání kontaktu mezi segmenty na selhání okolního materiálu. Tuto interpretaci je nutné omezit pouze na makroskopickou úroveň. Práce neobsahuje měření difuze ani chemické mapování rozhraní. Nelze tedy tvrdit, že na rozhraní došlo ke kvalitní molekulární difuzi. Výsledky ovšem prokazují, že správné zaplnění drážky má pozitivní vliv na pevnost a mechanismus porušení.

6.1.7 Vliv šířky drážky na únosnost spoje

V provedených experimentech se ukázalo, že pevnost hybridního spoje byla v testovaném rozsahu významně ovlivněna především nosnou šířkou primárního, tedy substrátního segmentu. Se zvětšující se šířkou drážky se tato nosná šířka zmenšovala, a proto docházelo k poklesu únosnosti spoje. Tento trend byl patrný jak ve screeningových experimentech, tak ve finálním plánovaném experimentu. Výsledek lze proto interpretovat tak, že větší zbytková šířka substrátu vůči šířce drážky vedla k vyšší pevnosti spoje.

Tento závěr odpovídá pozorovanému mechanismu porušení. U všech testovaných sad docházelo k porušení v oblasti primárního segmentu, nikoliv v samotném čepu nebo v jeho nejužší části. To ukazuje, že v použitém rozsahu nebyla únosnost spoje limitována pevností tvarového prvku sekundárního segmentu, ale pevností oslabeného substrátu. Zvětšení čepu tedy nepřinášelo zvýšení únosnosti spoje, protože čep nebyl jeho nejslabším místem. Naopak docházelo ke zmenšení průřezu substrátního segmentu, což vedlo k poklesu pevnosti spoje.

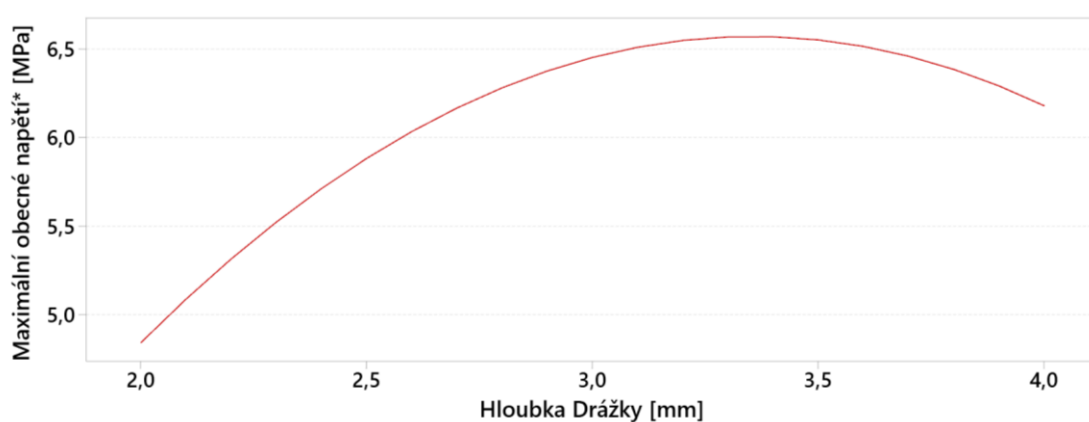
Z praktického hlediska to znamená, že pro hodnocený rozsah geometrií bylo výhodnější zachovat větší nosnou šířku substrátu než zvětšovat šířku samotného tvarového zámku. Větší drážka sice poskytuje větší objem pro zaplnění taveninou, ale současně více zasahuje do primárního segmentu a snižuje jeho schopnost přenášet zatížení. Proto se jako rozhodující neprojevila velikost čepu, ale míra oslabení substrátu v okolí drážky.

Tento závěr však platí pouze pro testovaný rozsah šířek drážky. V práci nebyla ověřena oblast výrazně užších drážek, kde by se kritické místo porušení mohlo přesunout ze substrátu do samotného čepu, protože pro výrobu užší drážky nebyl k dispozici vhodný obráběcí nástroj. Nelze proto určit, při jaké šířce by se pokles pevnosti začal řídit nedostatečnou únosností čepu, namísto oslabením primárního segmentu.

Současně lze předpokládat, že příliš úzká drážka by pravděpodobně ztížila zatlačení taveniny do drážky a mohla by vést k neúplnému zaplnění rohů nebo dna profilu. Pevnost by pak nebyla omezena pouze menším průřezem čepu, ale také horším kontaktem mezi taveninou a substrátem. V rámci provedených experimentů ale tento režim nenastal. Pro testovaný rozsah platí, že vyšší pevnosti bylo dosaženo především při větší zachované nosné šířce substrátu.

6.1.8 Vliv hloubky drážky na únosnost spoje

Hloubka drážky měla na únosnost spoje složitější vliv než její šířka. Screeningové experimenty ukázaly nejvyšší pevnosti přibližně v oblasti hloubky 3 mm. Finální regresní model po odstranění vlivu výškové odchylky trysky predikoval optimum přibližně při hloubce 3,35 mm, což je zřejmé z grafu modelovaných napětí v závislosti na hloubce drážky na Obr. 6-2. Nejvyšší skutečně naměřená pevnost však byla dosažena u skupiny s hloubkou drážky 4,0 mm. Tento rozdíl nelze chápat jako jednoznačný důkaz, že hloubka 4,0 mm byla optimální. Ve finálním experimentu totiž nebyla přímo ověřena samostatná kombinace hloubky 3,0 mm s nejvhodnější šířkou drážky a vhodným koeficientem přextruze, protože cílem plánovaného experimentu nebylo změřit všechny možné kombinace, ale popsat vliv parametrů pomocí regresního modelu.



**Graf značí modelované průměry maximálního obecného napětí*

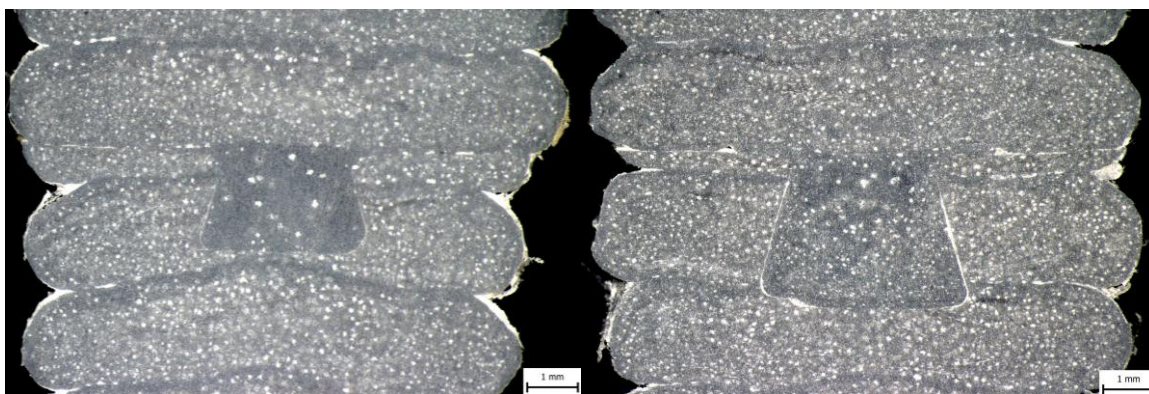
Obr. 6-2 Modelová závislost pevnosti segmentového spoje na hloubce drážky

Z tohoto důvodu je nutné odlišovat nejvyšší naměřenou hodnotu od modelově predikovaného optima. Naměřené maximum odpovídalo jedné konkrétní kombinaci parametrů, zatímco predikované optimum 3,35 mm vycházelo z trendu napříč celým experimentálním plánem. Z Obr. 6-2 je zřejmé, že v oblasti hloubky 3,35 až 4,0 mm byly predikované pevnosti blízké a rozdíl mezi nimi byl asi 0,5 MPa, což je menší hodnota, než běžný rozptyl tahových zkoušek testovaných vzorků. Pro interpretaci je proto podstatné především to, že výhodná oblast hloubky neležela v nejmenší testované hloubce ani jednoznačně v nominálním mezivrstvém rozhraní.

Původní hypotéza o vlivu hloubky vycházela z nominální výšky vrstvy 2 mm. Předpokládalo se, že při vhodné přípravě horní plochy primárního segmentu bude možné polohu dna drážky vztahovat k mezivrstvým rozhraním. Záměrem bylo připravit povrch tak, aby při zvolených hloubkách vycházelo dno drážky buď do oblasti mezivrstvého rozhraní, nebo do objemu jedné tiskové stopy. Proto nebyla horní plocha vždy obrobena až přesně na rozhraní mezi vrstvami, ale v některých případech byla ponechána část poslední tiskové stopy.

Mikroskopická analýza však ukázala, že reálný průřez tiskové stopy se mezi vzorky lišil. Některé stopy měly výrazně vyklenutý nebo prohnutý průřez, zatímco jiné měly horní část plošší. Tato variabilita znamenala, že skutečná poloha mezivrstvého rozhraní neodpovídala vždy přesně násobkům nominální výšky vrstvy. Přestože byla při přípravě vzorků snaha řídit polohu dna drážky vůči rozhraní, kvůli proměnlivé geometrii stopy se tento předpoklad nepodařilo dodržet ve všech případech.

Tento jev je patrný na Obr. 6-3 vlevo, kde je znázorněna drážka s hloubkou 2 mm, jejíž dno mělo podle nominální geometrie ležet v oblasti mezivrstvého rozhraní. Na řezu je však vidět konkávní tvar tiskové stopy, nad níž se nachází dno drážky. Na Obr. 6-3 vpravo je zobrazena drážka s hloubkou 3 mm, která měla naopak ležet přibližně uprostřed tiskové stopy. V tomto případě však dno drážky vychází do oblasti mezivrstvého rozhraní. Obrázek tedy ukazuje, že skutečná poloha dna drážky nebyla určena pouze nominální hloubkou, ale také reálným tvarem tiskové stopy po výrobě a obrobení.



Obr. 6-3 Vliv skutečné geometrie tiskové stopy na polohu dna drážky vůči mezivrstvému rozhraní

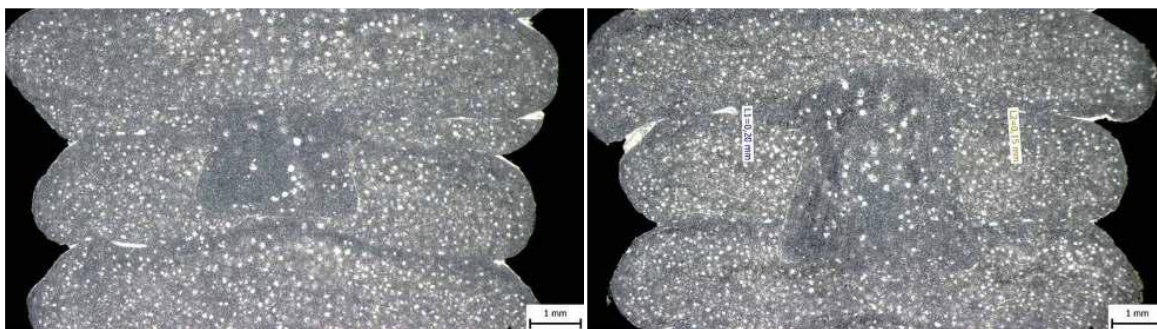
Skutečná poloha dna drážky proto nebyla dána pouze nominální hloubkou drážky, ale také reálnou geometrií tiskové stopy a zbytkovou výškou materiálu ponechaného po obrobení horní plochy. To omezuje přesnost interpretace vlivu hloubky pouze na základě nominálních hodnot. Výsledky zároveň ukazují, že návrh segmentového spoje u LFAM nelze založit jen na teoretické výšce vrstvy. Pro přesnější návrh je nutné znát skutečný průřez tiskové stopy, polohu mezivrstvých rozhraní a reálnou polohu dna drážky po obrábění.

6.1.9 Vliv cílené přeextruze na únosnost spoje

Cílená přeextruze měla ve finálním experimentu příznivý vliv na únosnost hybridního spoje. Zvýšení koeficientu znamenalo, že do obrobené drážky bylo dodáno větší množství taveniny, než odpovídalo jejímu nominálnímu geometrickému objemu. Při správné výškové poloze trysky mohl být tento přebytek materiálu využit k účinnějšímu zaplnění profilu a pravděpodobně také ke zvýšení lokálního tlaku taveniny v drážce. Nárůst pevnosti při vyšší přeextruzi lze proto interpretovat jako důsledek lepšího kontaktu taveniny se stěnami profilu a účinnějšího vytvoření mechanického zámku.

Nejvyšší naměřená pevnost byla dosažena při koeficientu přeextruze 1,4. Tento výsledek ukazuje, že v testovaném rozsahu byl dodatečný objem taveniny stále využitelný pro vytvoření únosnějšího spoje. Koeficient přeextruze proto nelze chápat pouze jako objemovou korekci zaplnění drážky, ale jako procesní parametr, který výrazně ovlivňuje samotný průběh vytvoření spoje. Z hlediska mechanické odezvy byla hodnota 1,4 nejvýhodnější, protože vedla k nejvyšší únosnosti ze všech testovaných variant.

Vizuální projev přeextruze však nebyl řízen pouze samotnou hodnotou koeficientu. Míra lokálního přetečení a viditelnosti segmentového spoje závisela také na konkrétním stavu substrátního povrchu, skutečné geometrii obrobené horní plochy a velikosti lokálního převýšení materiálu vzniklého při zaplnění drážky. Z tohoto důvodu nebylo možné jednoznačně přiřadit určitou míru povrchového přetečení pouze konkrétnímu koeficientu přeextruze. V některých případech nebyl spoj při koeficientu 1,4 na povrchu prakticky rozpoznatelný, jako například na Obr. 6-4 vlevo, zatímco v jiných případech bylo lokální nahromadění materiálu patrné již při koeficientu 1,25 zobrazeno na Obr. 6-4 vpravo.



Obr. 6-4 Vliv koeficientu přeextruze a lokální geometrie substrátu na viditelnost segmentového spoje

Z tohoto pohledu nelze koeficient 1,4 hodnotit jako problematický z hlediska vyrobitelnosti. Výsledky naopak ukazují, že i při této hodnotě je možné vytvořit spoj s dobrou povrchovou návazností, důkazem je Obr. 6-5 vlevo, kde je modelové těleso se spojem o koeficientu přeextruze 1,4. Lokální viditelnost spoje proto nepředstavuje přímý důkaz nevhodného nastavení přeextruze, ale spíše ukazuje na citlivost procesu na skutečný stav obrobeného povrchu a na geometrii materiálu vytlačeného nad drážku. Důkazem citlivosti je již patrný spoj na Obr. 6-5 vpravo, vyrobený se stejnými procesními parametry jako Obr. 6-5 vlevo.



Obr. 6-5 Rozdílná povrchová návaznost segmentového spoje při shodném koeficientu přeextruze

Tento závěr však neznamena, že je vhodné koeficient přeextruze dále libovolně zvyšovat. Screeningové experimenty ukázaly, že při koeficientu přibližně 1,5 se účinek přeextruze začal obracet. Přebytečná tavenina se již ve větší míře hromadila nad drážkou a výrazně ovlivňovala geometrii navazující vrstvy. V takovém případě další navýšení objemu nepřispívalo k účinnějšímu vytvoření spoje, ale naopak zhoršovalo estetické kvality a projevílo se celkovým poklesem pevnosti spoje.

Výsledky tedy ukazují, že hodnota 1,4 představovala v podmínkách této práce mechanicky výhodné nastavení, avšak její povrchový projev nebyl zcela stabilní. Jedním z možných směrů dalšího výzkumu je proto úprava trajektorie první vrstvy sekundárního segmentu. Vhodným řešením by mohlo být malé odsazení této trajektorie směrem dovnitř uzavřeného profilu, tedy cílené zmenšení výrobní trajektorie tak, aby případný přebytečný materiál zůstal uvnitř obrysu segmentu a neprojevil se na vnější hraně spoje. Tento postup by mohl zachovat mechanický přínos vyšší přeextruze a současně stabilizovat povrchovou kvalitu navazující vrstvy. Jeho účinnost však nebyla v této práci experimentálně ověřena a vyžaduje samostatné posouzení.

6.1.10 Metodické limity

Prvním limitem práce je způsob vymezení procesního okna tisku. Procesní parametry byly určeny empiricky podle stability a vizuální kvality, nikoliv pomocí plánovaného experimentu zaměřeného přímo na mechanickou odezvu. To je vzhledem k cíli práce přijatelné, ale omezuje možnost tvrdit, že dosažená mezivrstevná pevnost kontinuálního tisku byla maximální možná. V budoucnu by bylo vhodné provést samostatný plánovaný experiment pro nalezení optimálních procesních parametrů tisku, se sledovanou odezvou pevnosti mezivrstevného rozhraní.

Druhým limitem je nepřímé určování polohy mezivrstevných rozhraní. Hypotézy o vlivu hloubky vycházely z nominální výšky vrstvy, ale mikroskopická analýza ukázala, že skutečný profil stopy je vyklenutý. Proto by další výzkum měl systematicky měřit průřezy tiskových stop, polohu rozhraní a skutečnou polohu dna drážky vůči těmto rozhraním.

Třetím limitem je absence přímého měření dějů v drážce. Nebyl měřen lokální tlak taveniny, skutečná teplota rozhraní v okamžiku zaplnění, rychlost chladnutí ani průběh zatékání taveniny. Proto je nutné interpretovat vliv tlaku a těsného kontaktu jako pravděpodobný mechanismus, nikoliv přímo změřený fakt.

6.1.11 Doporučení pro další výzkum

Tato práce hodnotila segmentový spoj vytvořený v horní ploše primárního segmentu, tedy v konfiguraci, která představovala mechanicky nepříznivý případ. Drážka byla obráběna do jedné tiskové stopy a při zatěžování mohlo docházet k jejímu rozevírání. Další výzkum by měl proto ověřit, jak se bude segmentový spoj chovat při jiných prostorových orientacích rozhraní, zejména při napojování sekundárního segmentu na boční stěnu výtisku.

Boční napojení může vykazovat odlišný mechanismus přenosu zatížení. Povrch stěny není hladkou rovinou, ale obsahuje vrstevnatou topografii odpovídající jednotlivým tiskovým stopám. Nově nanesená tavenina se může do této struktury částečně mechanicky zaklesnout, což by mohlo zvýšit pevnost i u neobrobeného studeného spoje. Z tohoto důvodu by bylo vhodné porovnat pevnost studeného spoje na neobrobeném bočním povrchu a také na obrobeném bočním povrchu a pevnost tvarového spoje vytvořeného bočním obrobením drážky. U bočně obráběné drážky lze zároveň očekávat jiný mechanismus porušení, protože drážka nebude zatěžována stejným způsobem jako drážka vytvořená v rámci této práce.

Dalším směrem je výzkum spojování na šikmých plochách. Reálné velkoformátové díly nejsou tvořeny pouze svislými a vodorovnými stěnami, ale často obsahují šikmé povrchy se schodovitým efektem vrstev. Vhodným navazujícím experimentem by proto bylo vytvoření tělesa se stěnou pod úhlem 45° a následné porovnání pevnosti neobrobeného studeného spoje, obrobeného studeného spoje a hybridního tvarového spoje v této orientaci. Tento experiment by umožnil posoudit, zda přirozená geometrie vrstev může působit jako výhoda pro mechanické zaklesnutí, nebo naopak jako zdroj koncentrace napětí.

Další výzkum by se měl zaměřit také na orientaci a tvar obráběné drážky. V této práci byla drážka vedena ve směru tiskové stopy, tedy ve stejné trajektorii jako následná depozice. Vhodné by bylo ověřit, jak se změní pevnost při obrábění drážek kolmo na směr vrstvy, případně při vytvoření více příčných drážek za sebou. Takové uspořádání by mohlo omezit rozevírání spoje a zvýšit odpor proti vysunutí sekundárního segmentu. Dále by bylo vhodné porovnat i jiné orientace a tvary drážek, například drážky natočené pod úhlem 45° , křížové nebo mřížkové uspořádání, zig-zag trajektorii nebo konturové vedení drážky.

Dále je nutné ověřit, zda je zjednodušený zkušební model použitý v této práci přenositelný na větší struktury. Testovaná tělesa umožnila izolovat vliv samotného segmentového rozhraní, avšak neposkytují úplnou informaci o chování celého velkoformátového dílu. Další výzkum by proto měl zahrnovat výrobu většího zkušebního tělesa se segmentovým spojem a zatížení segmentu jako celku. Tím by bylo možné porovnat pevnost lokálního segmentového spoje s pevností celé struktury a ověřit, zda je použitá metodika škálovatelná.

Vhodné je také rozšířit výzkum na jiné materiálové systémy. PP GF30 představuje z hlediska studeného spoje velmi náročný materiál, protože jde o semikrystalický polymerní kompozit s výrazným smrštěním a vysokou citlivostí na teplotní historii. U materiálů s nižším smrštěním nebo lepší schopností mezivrstevového spojení může být relativní přínos tvarového zámku odlišný. Porovnání více materiálů by umožnilo určit, zda je navržená strategie obecně použitelná, nebo zda je nejvýznamnější právě u problematických polymerů.

Z praktického hlediska by měl další výzkum směřovat také k ověření strategie při skutečném přerušení tisku velkého dílu. V takovém případě by bylo možné posoudit nejen pevnost spoje, ale také proveditelnost lokální kalibrace, opakovatelnost obrábění, stabilitu navázání depozice a vliv časové prodlevy mezi přerušením a obnovením výroby.

6.2 Verifikace hypotéz

Verifikace první hypotézy

Na základě uvedených zjištění byla hypotéza H1 pro první výzkumnou otázku

„Větší nosná šířka substrátu vede k vyšší pevnosti spoje.“

ČÁSTEČNĚ POTVRZENA.

V celé práci byla mezi šířkou drážky a pevností spoje zjištěna lineárně klesající závislost. Tento trend se projevil ve screeningových experimentech i ve finálním plánovaném experimentu. V testovaném rozsahu tedy užší drážka, respektive větší nosná šířka substrátu, vedla k vyšší pevnosti spoje. Tento výsledek souvisel s pozorovaným mechanismem porušení. U všech testovaných sad docházelo k porušení v oblasti drážky, tedy v substrátu, nikoliv v krčku čepu. Zvětšování drážky proto v testovaném rozsahu nezvyšovalo únosnost čepu, ale oslabovalo substrátní část spoje.

Hypotézu nelze považovat za plně prokázanou v celém předpokládaném rozsahu. Nebyla testována oblast velmi úzkého krčku čepu, protože pro výrobu užší drážky nebyl k dispozici vhodný obráběcí nástroj. Nebyl ověřen stav, kdy se kritické místo porušení přesunulo ze substrátu do samotného čepu. Hypotéza je potvrzena pro testovaný rozsah geometrie drážky.

Verifikace druhé hypotézy

Na základě uvedených zjištění byla hypotéza H2 pro první výzkumnou otázku

„Dno drážky ležící uvnitř tiskové stopy vede k vyšší pevnosti spoje.“

ČÁSTEČNĚ POTVRZENA.

Výsledky ukázaly, že nejvýhodnější oblast hloubky drážky neležela v nejmenší testované hloubce ani jednoznačně v nominálním mezivrstevném rozhraní. Screeningové experimenty ukázaly nejvyšší pevnosti přibližně při hloubce 3 mm a finální regresní model po odstranění vlivu výškové odchylky trysky predikoval optimum přibližně při 3,35 mm. Tento výsledek hypotézu podporuje, protože naznačuje, že výhodnější je vedení dna drážky uvnitř tiskové stopy než přímo v oblasti mezivrstevného rozhraní.

Prímé ověření hypotézy však omezovala proměnlivá geometrie tiskové stopy. Mikroskopická analýza ukázala, že průřez stopy se mezi vzorky měnil. V některých případech byla stopa výrazně prohnutá nebo vyklenutá, v jiných byla její horní část plošší. Hypotéza byla proto částečně potvrzena. Úplné potvrzení by vyžadovalo přesné měření skutečné polohy dna drážky vůči mezivrstevným rozhraním u jednotlivých vzorků.

Verifikace třetí hypotézy

Na základě uvedených zjištění byla hypotéza H3 pro druhou výzkumnou otázku

„Přeextruze drážky vede k vyšší pevnosti spoje.“

POTVRZENA.

Ve finálním experimentu byl potvrzen pozitivní vliv koeficientu přeextruze na únosnost tvarového spoje. Zvýšení přeextruze vedlo ke zvýšení pevnosti, přičemž nejvyšší naměřená pevnost byla dosažena při koeficientu přeextruze 1,4. Tento výsledek odpovídá formulaci hypotézy, podle níž větší objem taveniny při správném omezení toku v profilu drážky zvyšuje lokální tlak. Jak bylo popsáno v kapitole 6.1.6, vyšší lokální tlak vytváří příznivější podmínky pro vznik funkčního spoje, což se projevilo vyšší únosností.

Současně byl v práci nalezen limit tohoto mechanismu. Screeningové experimenty ukázaly, že při koeficientu přeextruze 1,5 docházelo k excesivní přeextruzi. Přebytná tavenina se hromadila nad drážkou na horní ploše segmentu a zhoršovala geometrii navazující vrstvy. Tento výsledek však nevyvrací hypotézu, ale pouze vymezuje použitelný rozsah přeextruze. Hypotéza byla tedy potvrzena pro oblast, ve které zvýšený objem taveniny vede ke zvýšení lokálního tlaku v drážce, nikoliv k nekontrolovanému úniku materiálu mimo profil drážky.

7 ZÁVĚR

Představená práce se zabývala vlivem aditivně-subtraktivní strategie na pevnost segmentového spoje při velkoformátové hybridní výrobě polymerů. Řešeným problémem byl studený spoj vznikající při navázání nového segmentu na již vychladlý substrát. Tento typ rozhraní má zejména u polymerních kompozitů velmi nízkou soudržnost a může při chladnutí selhat vlivem vnitřního pnutí, v krajních případech dochází k oddělení segmentů.

Cílem práce bylo popsat, jak tvarová úprava rozhraní pomocí obrobené drážky a jejího následného zaplnění taveninou ovlivňuje pevnost segmentového spoje. Hodnocen byl zejména vliv geometrie drážky, míry přeextruze a výrobní přesnosti robotického pracoviště.

Experimentální část byla provedena na hybridní robotické buňce kombinující velkoformátový tisk z granulátu s obráběním. Součástí práce bylo také vymezení procesních parametrů pro stabilní tisk materiálu PP 30GF a konstrukční úpravy pracoviště, zejména návrh a realizace nové tiskové základny a úpravy extruderu pro zvýšení opakovatelnosti výrobního procesu. Trajektorie robota pro aditivní i subtraktivní operace byly generovány pomocí parametrického skriptu v prostředí Grasshopper, který byl navržen v rámci práce.

Hlavní zjištění této práce byla následující:

- Referenční studené spoje vykazaly velmi nízkou pevnost a u modelových těles docházelo k oddělení segmentů již během výroby. To potvrzuje, že u materiálu PP 30GF nelze segmentovou ani iterativní hybridní výrobu spolehlivě realizovat bez cílené modifikace rozhraní mezi segmenty.
- Navržený hybridní tvarový spoj výrazně zvýšil únosnost segmentového rozhraní. Nejlepší skupina vzorků dosáhla pevnosti přibližně 8 MPa, což odpovídalo zhruba čtyřnásobnému zvýšení oproti běžnému studenému spoji a obnovení přibližně 65 % pevnosti kontinuálního tisku.
- V testovaném rozsahu byla pro vyšší únosnost rozhodující větší zbytková nosná šířka substrátu vůči šířce drážky. Při zvětšování drážky docházelo k oslabení primárního segmentu, což vedlo k nižší finální únosnosti spoje.
- Hloubka drážky ovlivňovala polohu kritického porušení. Výsledky ukázaly, že nominální hloubka obrábění sama o sobě nestačí k přesnému určení polohy dna drážky, protože reálný průřez tiskové stopy se mezi vzorky lišil.
- Výsledky ukázaly, že pro pevnost spoje bylo zásadní dodat do drážky více materiálu, než odpovídalo jejímu teoretickému objemu. Tento přebytek podpořil zaplnění profilu drážky a jako nejvhodnější se ukázal koeficient přeextruze 1,4.
- Zásadním limitem zkoumané strategie v kontextu robotické výroby je vysoká citlivost na přesné sladění aditivních a subtraktivních operací. Výšková odchylka trysky od optimální hodnoty v řádu nižších jednotek desetin milimetru měnila způsob zaplnění drážky a vedla k výraznému snížení únosnosti spoje.

Z dosažených výsledků vyplývá, že stanovené cíle práce byly splněny. Byl popsán vliv geometrie drážky, cílené přeextruze a výrobní přesnosti na pevnost segmentového spoje a současně byly identifikovány hlavní procesní limity této strategie při použití v robotické hybridní buňce. Práce tak poskytuje nejen experimentální ověření tvarového segmentového spoje, ale také soubor praktických podmínek, které je nutné dodržet při jeho výrobě.

Z těchto poznatků byla formulována metodika tvorby pevného a opakovatelného segmentového spoje. Klíčové je zejména zajištění přesné návaznosti aditivní a subtraktivní operace, správné geometrie drážky a účinného zatlačení taveniny do jejího profilu. Pro praktické použití strategie je proto nutné zajistit zejména:

- přesnou TCP kalibraci extruderu i obráběcího vřetene
- korekci výrobních drah přímo v místě budoucího spoje
- kompenzaci smrštění vychladlého segmentu při přípravě výrobních trajektorií
- dostatečnou adhezi výtisku k pracovní základně
- přesné vystředění drážky vůči tiskové stopě
- volbu geometrie drážky bez nadměrného oslabení nosného průřezu segmentu
- návrh hloubky drážky podle skutečného, nikoliv nominálního tvaru tiskové stopy
- řízenou přeextruzi umožňující úplné zaplnění drážky
- kontakt spodní plochy trysky s horní plochou segmentu při zaplňování drážky

Další výzkum by měl ověřit, zda lze zjednodušený zkušební model použitý v této práci přenést na větší struktury. Zároveň je vhodné prověřit navrženou metodiku u praktických segmentových strategií, u obecnějších tvarů spojů a při odlišných směrech napojování segmentů, které lépe odpovídají reálným geometriím velkoformátových dílů.

Celkově výsledky ukazují, že tvarová úprava rozhraní může významně omezit negativní vliv studeného spoje a představuje perspektivní směr pro rozvoj robotické velkoformátové hybridní výroby polymerních kompozitů.

8 VÝSLEDEK VÝZKUMŮ PODLE RIV

Výsledky dosažené v této práci rozšiřují oblast poznání o popis vlivu segmentového tvarového spoje na mechanické vlastnosti dílů vyráběných robotickou velkoformátovou hybridní aditivně-subtraktivní technologií.

Za účelem publikace výsledků vznikl manuskript odborného článku.

Název článku: Influence of Hybrid Additive–Subtractive Strategy on Interlayer Strength in Large-Format Additive Manufacturing

Autoři: D. Chalupa, D. Škaroupka, V. Florián, P. Krejčířík, P. Křivohlavý

Abstrakt (anglická verze): In large-format hybrid additive-subtractive manufacturing (HASM) of polymers, the iterative alternation of printing and machining is essential to achieve dimensional accuracy and geometric complexity. However, this strategy is critically limited by the poor mechanical strength of cold joints formed when a new segment is deposited onto a cooled, machined substrate, leading to premature segment separation in materials sensitive to thermal history. To address this challenge, this study introduces a mechanical interlocking strategy designed to mitigate the effects of cold joints in 30 wt% glass fiber-reinforced polypropylene (PP30GF). Experimental validation was conducted using a robotic HASM cell, where a dovetail-based mechanical interlock was machined into a thin-walled printed segment and subsequently filled with molten polymer. Through tensile testing and response surface methodology, the influence of groove width, depth, controlled over-extrusion, and robotic positioning accuracy on interface strength was evaluated. The optimized hybrid mechanical interlock achieved an ultimate tensile strength of approximately 8 MPa, representing a nearly fourfold increase over conventional cold joints and recovering approximately 65% of the continuous printing strength. The analysis revealed that maintaining a larger residual substrate width relative to the groove width is critical for maximizing load-bearing capacity, as critical failures occurred mainly in the machined segment. Furthermore, controlled over-extrusion significantly enhanced joint integrity. By identifying key limitations of robotic hybrid manufacturing, these findings provide a fundamental methodological basis for implementing segmented and iterative hybrid strategies in the production of large-scale composite polymer parts.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] FRANCESCO PIGNATELLI a Gianluca PERCOCO. An application- and market-oriented review on large format additive manufacturing, focusing on polymer pellet-based 3D printing. *Progress in Additive Manufacturing* [online]. 2022, **7**(6), 1363–1377. ISSN 2363-9512, 2363-9520. Dostupné z: doi:10.1007/s40964-022-00309-3
- [2] GOH, Guo Dong, Kin Keong WONG, Nigel TAN, Hang Li SEET a Mui Ling Sharon NAI. Large-format additive manufacturing of polymers: a review of fabrication processes, materials, and design. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2024, **19**(1), e2336160. ISSN 1745-2759, 1745-2767. Dostupné z: doi:10.1080/17452759.2024.2336160
- [3] ŠTEFČÁK, Pavol, Ivan GAJDOŠ, Ján SLOTA a Jozef VARGA. Alternative CAM Solution for Adaptive Robotic Additive Manufacturing. *Acta Mechanica Slovaca* [online]. 2024, **28**(4), 70–76. ISSN 13352393, 13393073. Dostupné z: doi:10.21496/ams.2025.003
- [4] MITROPOULOU, Ioanna, Mathias BERNHARD a Benjamin DILLENBURGER. Nonplanar 3D Printing of Bifurcating Forms. *3D Printing and Additive Manufacturing* [online]. 2022, **9**(3), 189–202. ISSN 2329-7662, 2329-7670. Dostupné z: doi:10.1089/3dp.2021.0023
- [5] LI, Benquan, Bharath Bhushan RAVICHANDER, Golden KUMAR a Wei LI. Hybrid segmented manufacturing of metal part by integrating wire arc additive manufacturing and machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2024, **134**(1–2), 907–919. ISSN 0268-3768, 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-024-14190-7
- [6] WEFLER, E D, M C GINTHER, M A ELDAKROURY a M C FRANK. MECHANICAL INTERFACE FOR ITERATIVE HYBRID ADDITIVE AND SUBTRACTIVE MANUFACTURING. nedatováno.
- [7] HONARVAR, Hossein, Sasan AMIRABDOLLAHIAN, Matteo PERINI, Mauro BUCCELLA, Nicole SOLIGO, Michele BACCIOCCHI a Fernando FRATERNALI. Processing, thermal history and mechanical performance of recycled PP + 30 wt% glass fiber in large-format additive manufacturing (LFAM). *Composite Structures* [online]. 2026, **375**, 119797. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2025.119797
- [8] KISHORE, Vidya, Christine AJINJERU, Andrzej NYCZ, Brian POST, John LINDAHL, Vlastimil KUNC a Chad DUTY. Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components. *Additive Manufacturing* [online]. 2017, **14**, 7–12. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2016.11.008
- [9] BARON, John D., Muhammad Omer NAVEED a Lei CHEN. An experimental investigation of hybrid fused filament fabrication with in-process machining. *Manufacturing Letters* [online]. 2025, **44**, 442–452. ISSN 22138463. Dostupné z: doi:10.1016/j.mfglet.2025.06.053
- [10] CURMI, Albert a Arif ROCHMAN. Screw extrusion fused granulate Fabrication: Trends, materials, extruder classification and future development. *Polymer* [online]. 2025, **330**, 128459. ISSN 0032-3861. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymer.2025.128459

- [11] *LAMÁQUINA: Posts | LinkedIn* [online]. [vid. 2026-03-16]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/company/la-m%C3%A1quina-by-noumena/posts/?feedView=all>
- [12] LOVE, Lonnie, Mark NOAKES, Brian POST, Breanna RHYNE a Katherine GAUL. *Feasibility of Using Additive Manufacturing to Produce Automotive Tooling* [online]. ORNL/TM-2018/848, CRADA/NFE-17-06828, 1463997. 2018 [vid. 2026-02-23]. Dostupné z: [doi:10.2172/1463997](https://doi.org/10.2172/1463997)
- [13] MOLITCH-HOU, Michael. Ingersoll 3D Prints Massive Helicopter Blade Tool for Bell Helicopter. *3DPrint.com | Additive Manufacturing Business* [online]. 29. březen 2021 [vid. 2026-02-23]. Dostupné z: <https://3dprint.com/280199/ingersoll-3d-prints-massive-helicopter-blade-tool-for-bell-helicopter/>
- [14] POST, Brian, Bradley RICHARDSON, Randall LIND, Lonnie J LOVE, Peter LLOYD, Vlastimil KUNC, Breanna J RHYNE, Alex ROSCHLI, Jim HANNAN, Steve NOLET, Kevin VELOSO, Parthiv KURUP, Timothy REMO a Dale JENNE. BIG AREA ADDITIVE MANUFACTURING APPLICATION IN WIND TURBINE MOLDS. nedatováno.
- [15] LOVE, Lonnie. *Utility of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) For The Rapid Manufacture of Customized Electric Vehicles* [online]. ORNL/TM--2014/607, CRADA/NFE-14-04988, 1209199. 2015 [vid. 2026-02-22]. Dostupné z: [doi:10.2172/1209199](https://doi.org/10.2172/1209199)
- [16] SHER, Davide. Local Motors shut down but the 3D printed car dream lives on. *VoxelMatters - The heart of additive manufacturing* [online]. 27. leden 2022 [vid. 2026-02-22]. Dostupné z: <https://www.voxelmatters.com/local-motors-shut-down-but-the-3d-printed-car-dream-lives-on/>
- [17] VIALVA, Tia. Local Motors introduce Olli 2.0, an improved, autonomous 3D printed shuttle. *3D Printing Industry* [online]. 4. září 2019 [vid. 2026-02-22]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/local-motors-introduce-olli-2-0-an-improved-autonomous-3d-printed-shuttle-161145/>
- [18] WEAVER, Jason a Jason JONES. *Characterization of High-deposition Polymer Extrusion in Hybrid Manufacturing*. 2018.
- [19] VINCENT. Fully 3D printed monocoque for CO2 neutral car ZEM. *CEAD | Large Scale Additive Manufacturing* [online]. [vid. 2026-02-23]. Dostupné z: <https://ceadgroup.com/resources/case-studies/fully-3d-printed-monocoque-for-co2-neutral-car-zem/>
- [20] The Rise and Fall of Arevo's SuperStrata Bike: What Went Wrong? «Fabbaloo. *Fabbaloo* [online]. [vid. 2026-02-23]. Dostupné z: <https://www.fabbaloo.com/news/the-rise-and-fall-of-arevos-superstrata-bike-what-went-wrong>
- [21] Superstrata Classic review: It's not a good bike. *Escape Collective* [online]. 18. duben 2023 [vid. 2026-02-23]. Dostupné z: <https://escapecollective.com/the-superstrata-is-not-a-good-bike/>

- [22] AREVO. *Time-lapse: 3D Printing Carbon Fiber Superstrata Bike* [online]. 2021 [vid. 2026-02-23]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=JBUD7g0t3Ug>
- [23] *University of Maine: 3Dirigo | Maine Boats Homes & Harbors* [online]. [vid. 2026-02-23]. Dostupné z: <https://maineboats.com/print/issue-162/university-maine-3dirigo>
- [24] The first functional monolithic catamaran additively produced with V2 Group. *Caracol* [online]. [vid. 2026-02-23]. Dostupné z: <https://www.caracol-am.com/resources/case-studies/the-first-monolithic-catamaran-entirely-additively-produced>
- [25] P, Alexandra. U.S. Navy uses 3D printing to create submarine hull. *3Dnatives* [online]. 26. červenec 2017 [vid. 2026-02-23]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-submarine260720174/>
- [26] KREMENETSKY, Matt. Al Seer Marine Debuts First 3D Printed Drone Boat. *3DPrint.com | Additive Manufacturing Business* [online]. 24. únor 2023 [vid. 2026-03-22]. Dostupné z: <https://3dprint.com/298170/lal-seer-marine-debuts-first-3d-printed-drone-boat/>
- [27] *Large Format 3D Printing for Design & Architecture* [online]. nedatováno. Dostupné z: [caracol-am.com](https://www.caracol-am.com)
- [28] ŠKODA AUTO | DT Expert [online]. [vid. 2026-02-23]. Dostupné z: <https://dtexpert.cz/portfolio-reference/skoda-auto-2024-2025>
- [29] SAUNDERS, Sarah. Interior Furnishings 3D Printed from Old Drink Cartons Displayed at Milan Design Week. *3DPrint.com | Additive Manufacturing Business* [online]. 10. červen 2022 [vid. 2026-03-22]. Dostupné z: <https://3dprint.com/291786/actual-customizable-circular-3d-printed-interior-furnishings-on-display-at-milan-design-week/>
- [30] Robotic 3D printing of custom design furniture. *Caracol* [online]. [vid. 2026-03-22]. Dostupné z: <https://www.caracol-am.com/resources/case-studies/3d-printed-design-furniture>
- [31] GILES, Harold F., John R. WAGNER a Eldridge M. MOUNT. *Extrusion: the definitive processing guide and handbook*. Norwich, NY: William Andrew Pub, 2005. PDL handbook series. ISBN 978-0-8155-1473-2.
- [32] DUTY, Chad E., Vlastimil KUNC, Brett COMPTON, Brian POST, Donald ERDMAN, Rachel SMITH, Randall LIND, Peter LLOYD a Lonnie LOVE. Structure and mechanical behavior of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) materials. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2017, 23(1), 181–189. ISSN 1355-2546. Dostupné z: [doi:10.1108/RPJ-12-2015-0183](https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2015-0183)
- [33] MATRIX TECHNOLOGY. Pellets vs. Filament: 3D Printing Cost Comparison. *Matrix Technology* [online]. 2. únor 2026 [vid. 2026-02-17]. Dostupné z: <https://mtxlaser.com/pellets-vs-filament-3d-printing-cost-comparison>
- [34] *Přechodové teploty polymerů* [online]. [vid. 2025-03-11]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/06.html>

- [35] OMER, Mohamed A. E., Ibrahim Abdelfadeel SHABAN, Abdel-Hamid MOURAD a Hussien HEGAB. Advances in interlayer bonding in fused deposition modelling: a comprehensive review. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2025, **20**(1), e2522951. ISSN 1745-2759, 1745-2767. Dostupné z: doi:10.1080/17452759.2025.2522951
- [36] HERTLE, Sebastian, Maximilian DREXLER a Dietmar DRUMMER. Additive Manufacturing of Poly(propylene) by Means of Melt Extrusion. *Macromolecular Materials and Engineering* [online]. 2016, **301**(12), 1482–1493. ISSN 1438-7492, 1439-2054. Dostupné z: doi:10.1002/mame.201600259
- [37] COMPOUNDDYNAMICS. Common Materials in Large Format FGF 3D Printing: A Standardized Analysis. *Compound Dynamics* [online]. 6. leden 2025 [vid. 2026-02-17]. Dostupné z: <https://www.compounddynamics.com/resources/common-materials-in-large-format-fgf-3d-printing-a-standardized-analysis>
- [38] COMPTON, Brett G., Brian K. POST, Chad E. DUTY, Lonnie LOVE a Vlastimil KUNC. Thermal analysis of additive manufacturing of large-scale thermoplastic polymer composites. *Additive Manufacturing* [online]. 2017, **17**, 77–86. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2017.07.006
- [39] GAO, Xia, Shunxin QI, Xiao KUANG, Yunlan SU, Jing LI a Dujin WANG. Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond. *Additive Manufacturing* [online]. 2021, **37**, 101658. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2020.101658
- [40] BELLEHUMEUR, Céline, Longmei LI, Qian SUN a Peihua GU. Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2004, **6**(2), 170–178. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/S1526-6125(04)70071-7
- [41] TAGSCHERER, Nevine, André Marcel BÄR, Swen ZAREMBA a Klaus DRECHSLER. Mechanical Analysis of Parameter Variations in Large-Scale Extrusion Additive Manufacturing of Thermoplastic Composites. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* [online]. 2022, **6**(2), 36. ISSN 2504-4494. Dostupné z: doi:10.3390/jmmp6020036
- [42] TAGSCHERER, Nevine, Tim A. OSSWALD a Klaus DRECHSLER. Targeted Temperature Manipulation and Analysis of the Influence on Mechanical Properties in Large-Scale Extrusion Additive Manufacturing. *Applied Sciences* [online]. 2022, **12**(6), 2998. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app12062998
- [43] WILLE, Toni, Friedrich NEITMANN, Andreas HOPF a Jens BLIEDTNER. Influence of active strand cooling on the interlayer bonding strength in Large Scale Additive Manufacturing. *Production Engineering* [online]. 2025 [vid. 2025-10-11]. ISSN 0944-6524, 1863-7353. Dostupné z: doi:10.1007/s11740-025-01366-7
- [44] LISTEK, Vanesa. LEAM's Clever Add-On Solution Is Making Large-Scale 3D Printing Work Smarter, Not Harder. *3DPrint.com | Additive Manufacturing Business* [online]. 10. prosinec 2024 [vid. 2025-12-28]. Dostupné z: <https://3dprint.com/314848/leams-clever-add-on-solution-is-making-large-scale-3d-printing-work-smarter-not-harder/>

- [45] WEFLÉN, Eric a Matthew Charles FRANK. Hybrid additive and subtractive manufacturing of multi-material objects. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2021, **27**(10), 1860–1871. ISSN 1355-2546, 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-06-2020-0142
- [46] DAVAASAMBUU, Khishigdorj, Yu DONG, Alokesh PRAMANIK a Animesh Kumar BASAK. Mechanisms and Performance of Composite Joints Through Adhesive and Interlocking Means—A Review. *Journal of Composites Science* [online]. 2025, **9**(7), 359. ISSN 2504-477X. Dostupné z: doi:10.3390/jcs9070359
- [47] DAVAASAMBUU, Khishigdorj, Animesh Kumar BASAK, Yu DONG a Alokesh PRAMANIK. Bio-Inspired Novel Joints with Superior Mechanical Performance. *Journal of Composites Science* [online]. 2025, **9**(9), 501. ISSN 2504-477X. Dostupné z: doi:10.3390/jcs9090501
- [48] QIN, Yuhang, Chao XIONG, Xiujie ZHU, Junhui YIN, Yu ZHANG, Zhaoyang FAN, Zhao LIU a Wei ZHANG. Strength analysis of carbon-fiber dovetail tenon connections under quasi-static tension. *Structures* [online]. 2024, **67**, 106925. ISSN 23520124. Dostupné z: doi:10.1016/j.istruc.2024.106925
- [49] ERMOLAI, Vasile, Alexandru SOVER, Marius Andrei BOCA, Andrei Marius MIHALACHE, Alexandru Ionuț IRIMIA, Adelina HRITUC, Laurențiu SLĂTINEANU, Gheorghe NAGÎȚ a Răzvan Cosmin STAVARACHE. Mechanical behavior of macroscopic interfaces for 3D printed multi-material samples made of dissimilar materials. *Mechanics & Industry* [online]. 2024, **25**, 24. ISSN 2257-7777, 2257-7750. Dostupné z: doi:10.1051/meca/2024017
- [50] KUKA KR 8 R1620 [online]. [vid. 2025-12-29]. Dostupné z: <https://my.kuka.com/s/product/kr-8-r1620/01t58000003eVaJAAU?language=cs&tab=Downloads>
- [51] JORGE HENRIQUE. *Design for large-scale additive manufacturing*. 2023

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

10.1 Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglický / zdrojový termín	Český význam nebo vysvětlení
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene	akrylonitril-butadien-styren
AM	Additive Manufacturing	aditivní výroba
ASTM	American Society for Testing and Materials	normalizační organizace
CAD	Computer-Aided Design	počítačem podporované navrhování
CF	Carbon Fiber	uhlíková vlákna
DOE	Design of Experiments	návrh experimentu
DIN	Deutsches Institut für Normung	německý institut pro normalizaci
FDM	Fused Deposition Modeling	technologie vytlačování polymerního materiálu
FFF	Fused Filament Fabrication	aditivní výroba z polymerního filamentu
FGF	Fused Granulate Fabrication	aditivní výroba přímou extruzí granulátu
GF	Glass Fiber	skelná vlákna
HASM	Hybrid Additive-Subtractive Manufacturing	hybridní aditivně-subtraktivní výroba
ID	Identifier	identifikátor
IR	Infrared	infračervené záření
ISO	International Organization for Standardization	mezinárodní organizace pro normalizaci

Zkratka	Anglický / zdrojový termín	Český význam nebo vysvětlení
LED	Light Emitting Diode	světelná dioda
LFAM	Large Format Additive Manufacturing	velkoformátová aditivní výroba
MEX	Material Extrusion	vytlačování materiálu podle ISO/ASTM 52900
PA6	Polyamide 6	polyamid 6
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol	glykol-modifikovaný polyethylentereftalát
PLA	Polylactic Acid	polylaktid
PP	Polypropylene	polypropylen
PP GF30	Polypropylene reinforced with 30 wt.% glass fiber	polypropylen vyztužený 30 hm. % skelných vláken
RIV	Rejstřík informací o výsledcích	evidence výsledků výzkumu, vývoje a inovací
Pří	Response Surface Methodology	metoda plochy odezvy
TCP	Tool Center Point	středový bod nástroje
VIF	Variance Inflation Factor	faktor inflace rozptylu v regresním modelu

10.2 Seznam použitých veličin

Symbol / veličina	Jednotka	Význam
w_g	mm	šířka drážky
h_g	mm	hloubka drážky
k_e	-	koeficient přeextruze
Δ_h	mm	výšková odchylka trysky vůči horní ploše primárního segmentu
F	N	síla při mechanické zkoušce
$F_{\max}$	N	maximální síla dosažená při zkoušce
σ_{gen}	MPa	obecné napětí
$\sigma_{\max}$	MPa	maximální obecné napětí
E	-	poměrná deformace
T_e	°C	extruzní teplota, případně teplota polymerní taveniny v ústí trysky
T_s	°C	teplota substrátu, tedy povrchu, na který je nanášena nová vrstva polymeru
T_g	°C	teplota skelného přechodu
T_m	°C	teplota tání
T_c	°C	teplota krystalizace
t_{layer}	s	čas tisku jedné vrstvy nebo stopy
V	mm/s	rychlost pohybu extruderu / posuvová rychlost

Symbol / veličina	Jednotka	Význam
N	-	počet vzorků ve statistickém souboru
n	min^{-1}	otáčky šneku extruderu
$\dot{m}$	kg/h nebo g/min	hmotnostní tok materiálu
Q	mm^3/s	objemový tok materiálu
S	MPa	směrodatná chyba regresního modelu
R^2	-	koeficient determinace
R^2_{adj}	-	upravený koeficient determinace
R^2_{pred}	-	predikovaný koeficient determinace
P	-	p-hodnota statistického testu

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Schéma produkce velkoformátového výtisku	15
Obr. 2-2 Schémata použitelných strategií v robotické výrobě	16
Obr. 2-3 Konfigurace výrobních platforem HASM	17
Obr. 2-4 Defekty způsobené omezenou retrakcí [11]	18
Obr. 2-5 Laminovací forma pro listy rotoru helikoptéry [13]	19
Obr. 2-6 Forma pro výrobu lopatek větrných turbín [14]	19
Obr. 2-7 Olli 2.0 plně autonomní 3D tištěný automobil [17], Strati první 3D tištěný automobil [18]	20
Obr. 2-8 Koncept neutrálního automobilu vlevo, tištěný monopost konceptu vpravo [19]	20
Obr. 2-9 Superstrata 3D tištěné elektrokolo [21] Proces tisku rámu jízdního kola [22] ...	20
Obr. 2-10 3Dirigo [23]	21
Obr. 2-11 První aditivně vyrobený katamarán [24]	21
Obr. 2-12 Aditivně vyráběný trup ponorky vlevo [25] Bezpilotní člun HYDRA vpravo [26]	21
Obr. 2-13 Vybavení administrativních prostor Škoda Auto [28]	22
Obr. 2-14 Interiérové prvky vyráběné z recyklátu s příměsí nápojových kartonů [29]	22
Obr. 2-15 Židle z kolekce ZERO z recyklovaného polypropylenu vyztuženého skelnými vlákny [30]	22
Obr. 2-16 Schéma šnekového extruderu upraveno dle [31]	23
Obr. 2-17 Schéma tvorby spoje mezi dvěma polymerními vrstvami, upraveno dle [19]	26
Obr. 2-18 Časový vývoj tvorby krčku a difuze u materiálu ABS P400 při konstantní teplotě (200 °C). [40]	26
Obr. 2-19 Závislost maximálního přeneseného zatížení mezi dvěma vrstvami na teplotě substrátu [36]	27
Obr. 2-20 Závislost maximálního přeneseného zatížení mezi dvěma vrstvami na teplotě taveniny [36]	28
Obr. 2-21 Vliv výšky vrstvy na šířku stopy, výška vrstvy a) 0,8 mm b) 1 mm, upraveno dle [41]	29

Obr. 2-22 3D graf znázorňující závislost mezivrstvé pevnosti v tahu na výšce vrstvy a substrátní teplotě u materiálu PA6-40CF. Šedé plochy značí 95% intervaly spolehlivosti a oranžová plocha odpovídá vypočtenému lineárnímu regresnímu modelu [41].	29
Obr. 2-23 Kvalita rohů tištěných vzorků. a) Nedostatečné natavení materiálu, b) Strhnutí materiálu vlivem vysoké rychlosti pohybu, c) Vyvážená kombinace parametrů [7]	30
Obr. 2-24 Závislost maximálního přeneseného zatížení mezi dvěma vrstvami na teplotě chlazení [16].	30
Obr. 2-25 Průřez výtisku se značnou mezistopovou porozitou, vpravo třikrát zvětšeno [32]	31
Obr. 2-26 Porovnání vnitřní porozity stopy mezi čistým ABS (vlevo) a ABS vyztuženým 13 % uhlíkových vláken, které mají průměr asi 5 μm (vpravo). Upraveno dle [32]	32
Obr. 2-27 Výtisk karoserie automobilu s rozsáhlými deformacemi vlevo, mezivrstvá delaminace vpravo	32
Obr. 2-28 Schéma rozdělení tisknutého tělesa na zkušební vzorky pro tahovou zkoušku [41]	33
Obr. 2-29 Testování mechanických vlastností vzorků LFAM, zkouška v ohybu vlevo, zkouška v tahu vpravo	34
Obr. 2-30 Ohybová pevnost vzorků s výškou vrstvy 2 mm vlevo a 3 mm vpravo	35
Obr. 2-31 Tepelná obnova mezivrstvého spoje: (a-c) pomocí IR zářičů [8] (d) pomocí zařízení DEMEX [44]	36
Obr. 2-32 Znázornění postupu tvorby tvarového spoje pomocí přetisknuté drážky [6]	37
Obr. 2-33 Porovnání otevřené a uzavřené kontury drážky vlevo, případná aplikace vpravo [45]	37
Obr. 2-34 Popis konstrukce a geometrie rybinového spoje	38
Obr. 2-35 Geometrie obráběných drážek studie a jejich výsledná pevnost v tahu [6]	39
Obr. 2-36 Vlevo mechanický spoj rybinovou drážkou, vpravo mechanický spoj bioinspirovaným zámkem	39
Obr. 2-37 Vzorky mechanických zámků multi-materiálového FFF tisku [49]	40
Obr. 2-38 Rozložení napětí a deformace v rybinovém spoji z uhlíkového kompozitu [48]	40
Obr. 2-39 Rozložení napětí a deformace v rybinovém spoji se zaoblenými rohy z uhlíkového kompozitu [48]	40
Obr. 3-1 Schématické znázornění první hypotézy	44

Obr. 3-2 Schématické znázornění druhé hypotézy	44
Obr. 3-3 Schématické znázornění třetí hypotézy	44
Obr. 4-1 Schéma postupu práce	45
Obr. 4-2 Robotický manipulátor se znázorněným maximálním dosahem připevněný k základně	46
Obr. 4-3 Původní tisková platforma	47
Obr. 4-4 Koncepty rozložení tiskového pracoviště	48
Obr. 4-5 Koncepty orientace tiskové platformy	48
Obr. 4-6 Model nově navržené tiskové platformy	49
Obr. 4-7 Nově realizovaná modulární tisková platforma v nekrytované i krytované konfiguraci	49
Obr. 4-8 Model extruderu D Pro-S v původní konfiguraci vlevo a finální konfiguraci vpravo	50
Obr. 4-9 Extruder v původní konfiguraci	51
Obr. 4-10 Model první iterace nového systému chlazení	53
Obr. 4-11 Model finální iterace nově navrženého systému chlazení stopy	53
Obr. 4-12 Model první iterace násypky připevněný k extruderu	54
Obr. 4-13 Model finální iterace násypky připevněný k extruderu	55
Obr. 4-14 Navržená redukce pro spojení vrapované trubice s konektorem Han B	56
Obr. 4-15 Model navrženého nosiče konektoru Han B	56
Obr. 4-16 Model finální iterace držáku konektoru umožňující automatickou výměnu nástrojů	57
Obr. 4-17 Model difuzoru nově navrženého systému chlazení heatbreaku stlačeným vzduchem	57
Obr. 4-18 Obráběcí vřeteno AMB 1400 FME-W DI	58
Obr. 4-19 Defekt výtisku způsobený akumulací tepla při krátkém čase vrstvy	59
Obr. 4-20 Původní geometrie vlevo, aktualizovaná geometrie pro tisk širších stop vpravo	62
Obr. 4-21 Defekt vzniklý v důsledku akumulace materiálu v ostrém rohu výtisku	62
Obr. 4-22 Termografické měření teploty extrudovaného materiálu T_e a teploty substrátu T_s	63
Obr. 4-23 Schéma znázorňující hodnocení rozměrové stability tisku	64

Obr. 4-24 Schéma výzkumného postupu pro ověření vlivu výrobní strategie	67
Obr. 4-25 Znázornění sad zkušebních vzorků v rámci tisknutého modelu	68
Obr. 4-26 Schéma výroby segmentového spoje a schéma výroby modelového tělesa.....	68
Obr. 4-27 Schéma změny šířky obráběné drážky při použití jednoho nástroje	69
Obr. 4-28 Kalibrace obráběcího vřetene vlevo, kalibrační tryska extruderu vpravo	70
Obr. 4-29 Schéma měření stopy pro kalibraci tiskových a obráběcích trajektorií a výpočet smrštění	71
Obr. 4-30 Schematicky zobrazený problém špatné adheze výtisku k podložce	73
Obr. 4-31 Kroky použití technologického raftu pro upevnění výtisku na podložce.....	73
Obr. 4-32 Parametrický model pro přípravu výrobních dat.....	74
Obr. 4-33 Geometrie a rozměry zkušebního tělesa finální metodiky.....	75
Obr. 4-34 Rozměry vzorků použité pro výpočet obecného napětí u tahové zkoušky.....	75
Obr. 4-35 Konfigurace tahové zkoušky s upnutým vzorkem	76
Obr. 4-36 Použití magnetických středících přípravků společně s vyrobenými čelistmi ...	76
Obr. 4-37 Homogenizační housenka	79
Obr. 4-38 Detail na řízené oddělení taveniny od výtisku vpravo	80
Obr. 4-39 a) detail plnění drážky taveninou, b) detail zaplněné drážky s koeficientem extruze 1, c) zaplněná drážka, d) detail tisku první stopy sekundárního segmentu nad zaplněnou drážkou	81
Obr. 4-40 Obrábění kontur jednotlivých vzorků, a) kontrolní průjezd pro kalibraci polohy, b) náklon vřetene při přiblížení k tiskové základně, c) obrobené vzorky držené pomoci blan v modelovém tělese	81
Obr. 5-1 Neprotavený materiál při překročení procesního okna extruderu	83
Obr. 5-2 Závislost hmotnostního a objemového toku na otáčkách šneku extruderu	83
Obr. 5-3 Krabicový graf naměřené pevnosti u kontinuálně tištěných výtisků	84
Obr. 5-4 Oddělený horní segment u výtisků pro zjištění referenčních pevností studených spojů.....	85
Obr. 5-5 Krabicový graf naměřené pevnosti studených spojů vlevo, porovnání s kontinuálním tiskem vpravo	85
Obr. 5-6 Grafy screeningu: vliv šířky a hloubky drážky na maximální přenesené obecné napětí.....	86

Obr. 5-7 Vliv koeficientu přeextruze na maximální přenesené obecné napětí při šířce a hloubce drážky 3 mm	87
Obr. 5-8 Vybraná tělesa screeningových experimentů vlevo, deformace podlouhlého tělesa vpravo	87
Obr. 5-9 Naměřené hodnoty maximálního obecného napětí pro kombinace zkoumaných parametrů.....	88
Obr. 5-10 Graf hlavních efektů modelovaných faktorů na maximální obecné napětí u rozšířeného screeningu	88
Obr. 5-11 Graf hlavních efektů zkoumaných faktorů na maximální obecné napětí u finálního experimentu	89
Obr. 5-12 Rezidua modelu bez zahrnutí výrobních bloků podle jednotlivých modelových těles.....	90
Obr. 5-13 Mechanismus porušení spoje typu vysunutí.....	91
Obr. 5-14 Mechanismus porušení spoje charakteru křehkého lomu.....	91
Obr. 5-15 Mechanismus kombinovaného porušení spoje	91
Obr. 5-16 Mikroskopická analýza: a) vzorek s výškovou odchylkou trysky b) vzorek bez výškové odchylky	92
Obr. 5-17 Vliv výškové odchylky trysky vůči drážce na maximální přenesené obecné napětí	93
Obr. 5-18 Graf hlavních efektů rozšířeného modelu se zahrnutím výškové odchylky trysky vůči drážce.....	93
Obr. 5-19 Rezidua bez zahrnutí výrobních bloků podle jednotlivých modelových těles bez odchylky trysky	94
Obr. 5-20 Graf hlavních efektů rozšířeného modelu bez zahrnutí výškové odchylky trysky vůči drážce.....	94
Obr. 5-21 Vykreslené průběhy tahových zkoušek jednotlivých těles ze sady s nejvyšší dosaženou pevností	95
Obr. 6-1 Schématické znázornění výškové odchylky trysky vůči obrobené ploše	99
Obr. 6-2 Modelová závislost pevnosti segmentového spoje na hloubce drážky	102
Obr. 6-3 Vliv skutečné geometrie tiskové stopy na polohu dna drážky vůči mezivrstvému rozhraní	103
Obr. 6-4 Vliv koeficientu přeextruze a lokální geometrie substrátu na viditelnost segmentového spoje	104

Obr. 6-5 Rozdílná povrchová návaznost segmentového spoje při shodném koeficientu přeextruze	104
---	-----

12 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Porovnání cen filamentu a tiskových granulátů [33].....	24
Tab. 2 Vybrané vlastnosti materiálů používaných v LFAM [37].....	25
Tab. 3 Parametry extruderu D - Pro S.....	51
Tab. 4 Základní parametry obráběcího vřetene AMB 1400 FME-W DI.....	58
Tab. 5 Orientační procesní parametry převzaté z literatury	60
Tab. 6 Rozsah procesních parametrů použitých při vymezování procesního okna	61
Tab. 7 Hodnoty vážených parametrů vícekritériální analýzy	66
Tab. 8 Rozsah faktorů použitých v rozšířeném screeningu a finálním experimentu.....	77
Tab. 9 Tiskové procesní parametry použité při výrobě finálních modelových těles	78
Tab. 10 Přehled použitých obráběcích nástrojů.....	79
Tab. 11 Obráběcí parametry použité při výrobě finálních zkušebních těles	79
Tab. 12 Stanovené procesní okno pro tisk materiálu PP GF30.....	82
Tab. 13 Souhrnné statistiky naměřených hodnot pevnosti kontinuálně tištěných dílů	84
Tab. 14 Souhrnné statistiky naměřených hodnot pro zjištění pevnosti studených spojů ..	85
Tab. 15 Nejlepší naměřená sada finálního plánovaného experimentu	95

13 SEZNAM PŘÍLOH

Vložené přílohy:

Příloha A – Přehled vzorků finálního experimentu

Příloha B – Výstupy regresních modelů plochy odezvy z programu Minitab

Externí příloha:

Příloha 1 – Souhrnný laboratorní protokol tahových zkoušek a mikroskopické analýzy

Příloha A – Přehled vzorků finálního experimentu

Tabulka uvádí jednotlivé vzorky v řádcích. Identifikátory jsou uvedeny bez označení experimentu. Prodloužení extenzometru je převzato ze zdrojového exportu bez převodu na poměrnou deformaci.

ID modelu	Série	ID sady	Číslo sady	ID vzorku	Číslo vzorku	Šířka drážky [mm]	Hloubka drážky [mm]	Koeficient přextruze [-]	Maximální obecné napětí [MPa]	Maximální prodloužení extenzometru	Výšková odchylka trysky [mm]	Pozice vzorku
26042301	1	26042301_01_300_200_110	01_300_200_110	26042301_01_300_200_110_1	1	3	2	1,1	5,315	0,11072	0,189	111
26042301	1	26042301_01_300_200_110	01_300_200_110	26042301_01_300_200_110_2	2	3	2	1,1	3,355	0,07345	0,189	112
26042301	1	26042301_01_300_200_110	01_300_200_110	26042301_01_300_200_110_3	3	3	2	1,1	2,688	0,06304	0,189	113
26042301	1	26042301_01_300_200_110	01_300_200_110	26042301_01_300_200_110_4	4	3	2	1,1	2,344	0,06517	0,189	114
26042301	1	26042301_02_450_200_110	02_450_200_110	26042301_02_450_200_110_1	1	4,5	2	1,1	2,846	0,06686	0	121
26042301	1	26042301_02_450_200_110	02_450_200_110	26042301_02_450_200_110_2	2	4,5	2	1,1	3,01	0,07669	0	122
26042301	1	26042301_02_450_200_110	02_450_200_110	26042301_02_450_200_110_3	3	4,5	2	1,1	4,712	0,13155	0	123
26042301	1	26042301_02_450_200_110	02_450_200_110	26042301_02_450_200_110_4	4	4,5	2	1,1	3,144	0,07802	0	124
26042301	1	26042301_03_300_400_110	03_300_400_110	26042301_03_300_400_110_1	1	3	4	1,1	5,789	0,13197	0	131
26042301	1	26042301_03_300_400_110	03_300_400_110	26042301_03_300_400_110_2	2	3	4	1,1	7,025	0,15317	0	132
26042301	1	26042301_03_300_400_110	03_300_400_110	26042301_03_300_400_110_3	3	3	4	1,1	6,553	0,14014	0	133
26042301	1	26042301_03_300_400_110	03_300_400_110	26042301_03_300_400_110_4	4	3	4	1,1	5,297	0,08516	0	134
26042301	1	26042301_04_375_300_125	04_375_300_125	26042301_04_375_300_125_1	1	3,75	3	1,25	5,969	0,14963	0	141
26042301	1	26042301_04_375_300_125	04_375_300_125	26042301_04_375_300_125_2	2	3,75	3	1,25	7,053	0,18768	0	142
26042301	1	26042301_04_375_300_125	04_375_300_125	26042301_04_375_300_125_3	3	3,75	3	1,25	6,441	0,17722	0	143
26042301	1	26042301_04_375_300_125	04_375_300_125	26042301_04_375_300_125_4	4	3,75	3	1,25	6,311	0,20862	0	144
26042302	1	26042302_05_450_400_110	05_450_400_110	26042302_05_450_400_110_1	1	4,5	4	1,1	0,747	0,04113	0,201	311
26042302	1	26042302_05_450_400_110	05_450_400_110	26042302_05_450_400_110_2	2	4,5	4	1,1	1,211	0,07823	0,201	312
26042302	1	26042302_05_450_400_110	05_450_400_110	26042302_05_450_400_110_3	3	4,5	4	1,1	2,585	0,04365	0,201	313
26042302	1	26042302_05_450_400_110	05_450_400_110	26042302_05_450_400_110_4	4	4,5	4	1,1	1,716	0,0737	0,201	314
26042302	1	26042302_06_300_200_140	06_300_200_140	26042302_06_300_200_140_1	1	3	2	1,4	1,603	0,60962	0,246	321
26042302	1	26042302_06_300_200_140	06_300_200_140	26042302_06_300_200_140_2	2	3	2	1,4	1,697	0,68898	0,246	322

ID modelu	Série	ID sady	Číslo sady	ID vzorku	Číslo vzorku	Šířka drážky [mm]	Hloubka drážky [mm]	Koeficient přextruze [-]	Maximální obecné napětí [MPa]	Maximální prodloužení extenzometru	Výšková odchylka trysky [mm]	Pozice vzorku
26042302	1	26042302_06_300_200_140	06_300_200_140	26042302_06_300_200_140_3	3	3	2	1,4	1,654	0,62412	0,246	323
26042302	1	26042302_06_300_200_140	06_300_200_140	26042302_06_300_200_140_4	4	3	2	1,4	1,781	0,66478	0,246	324
26042302	1	26042302_07_450_200_140	07_450_200_140	26042302_07_450_200_140_1	1	4,5	2	1,4	2,561	0,06824	0,259	331
26042302	1	26042302_07_450_200_140	07_450_200_140	26042302_07_450_200_140_2	2	4,5	2	1,4	1,916	0,07941	0,259	332
26042302	1	26042302_07_450_200_140	07_450_200_140	26042302_07_450_200_140_3	3	4,5	2	1,4	2,449	0,06947	0,259	333
26042302	1	26042302_07_450_200_140	07_450_200_140	26042302_07_450_200_140_4	4	4,5	2	1,4	1,665	0,0631	0,259	334
26042302	1	26042302_08_300_400_140	08_300_400_140	26042302_08_300_400_140_1	1	3	4	1,4	2,443	0,04557	0,217	341
26042302	1	26042302_08_300_400_140	08_300_400_140	26042302_08_300_400_140_2	2	3	4	1,4	2,283	0,04168	0,217	342
26042302	1	26042302_08_300_400_140	08_300_400_140	26042302_08_300_400_140_3	3	3	4	1,4	3,058	0,04505	0,217	343
26042302	1	26042302_08_300_400_140	08_300_400_140	26042302_08_300_400_140_4	4	3	4	1,4	3,685	0,06321	0,217	344
26042401	2	26042401_09_450_400_140	09_450_400_140	26042401_09_450_400_140_1	1	4,5	4	1,4	6,074	0,11197	0	111
26042401	2	26042401_09_450_400_140	09_450_400_140	26042401_09_450_400_140_2	2	4,5	4	1,4	5,817	0,16102	0	112
26042401	2	26042401_09_450_400_140	09_450_400_140	26042401_09_450_400_140_3	3	4,5	4	1,4	5,816	0,16243	0	113
26042401	2	26042401_09_450_400_140	09_450_400_140	26042401_09_450_400_140_4	4	4,5	4	1,4	4,912	0,14073	0	114
26042401	2	26042401_10_300_300_125	10_300_300_125	26042401_10_300_300_125_1	1	3	3	1,25	4,503	0,11335	0	121
26042401	2	26042401_10_300_300_125	10_300_300_125	26042401_10_300_300_125_2	2	3	3	1,25	7,234	0,17194	0	122
26042401	2	26042401_10_300_300_125	10_300_300_125	26042401_10_300_300_125_3	3	3	3	1,25	6,813	0,16164	0	123
26042401	2	26042401_10_300_300_125	10_300_300_125	26042401_10_300_300_125_4	4	3	3	1,25	6,243	0,14116	0	124
26042401	2	26042401_11_375_200_125	11_375_200_125	26042401_11_375_200_125_1	1	3,75	2	1,25	4,442	0,16404	0	131
26042401	2	26042401_11_375_200_125	11_375_200_125	26042401_11_375_200_125_2	2	3,75	2	1,25	3,243	0,20785	0	132
26042401	2	26042401_11_375_200_125	11_375_200_125	26042401_11_375_200_125_3	3	3,75	2	1,25	3,199	0,18438	0	133
26042401	2	26042401_11_375_200_125	11_375_200_125	26042401_11_375_200_125_4	4	3,75	2	1,25	3,435	0,08881	0	134
26042401	2	26042401_12_375_300_125	12_375_300_125	26042401_12_375_300_125_1	1	3,75	3	1,25	4,855	0,12851	0,299	141
26042401	2	26042401_12_375_300_125	12_375_300_125	26042401_12_375_300_125_2	2	3,75	3	1,25	5,382	0,13364	0,299	142
26042401	2	26042401_12_375_300_125	12_375_300_125	26042401_12_375_300_125_3	3	3,75	3	1,25	4,517	0,11462	0,299	143

ID modelu	Série	ID sady	Číslo sady	ID vzorku	Číslo vzorku	Šířka drážky [mm]	Hloubka drážky [mm]	Koeficient přextruze [-]	Maximální obecné napětí [MPa]	Maximální prodloužení extenzometru	Výšková odchylka trysky [mm]	Pozice vzorku
26042401	2	26042401_12_375_300_125	12_375_300_125	26042401_12_375_300_125_4	4	3,75	3	1,25	4,323	0,09575	0,299	144
26042402	2	26042402_13_375_400_125	13_375_400_125	26042402_13_375_400_125_1	1	3,75	4	1,25	1,314	0,62721	0,197	311
26042402	2	26042402_13_375_400_125	13_375_400_125	26042402_13_375_400_125_2	2	3,75	4	1,25	1,068	0,7001	0,197	312
26042402	2	26042402_13_375_400_125	13_375_400_125	26042402_13_375_400_125_3	3	3,75	4	1,25	1,328	0,67744	0,197	313
26042402	2	26042402_13_375_400_125	13_375_400_125	26042402_13_375_400_125_4	4	3,75	4	1,25	0,868	0,90005	0,197	314
26042402	2	26042402_14_375_300_110	14_375_300_110	26042402_14_375_300_110_1	1	3,75	3	1,1	1,436	0,6124	0,15	321
26042402	2	26042402_14_375_300_110	14_375_300_110	26042402_14_375_300_110_2	2	3,75	3	1,1	1,571	0,51813	0,15	322
26042402	2	26042402_14_375_300_110	14_375_300_110	26042402_14_375_300_110_3	3	3,75	3	1,1	2,185	0,0429	0,15	323
26042402	2	26042402_14_375_300_110	14_375_300_110	26042402_14_375_300_110_4	4	3,75	3	1,1	1,441	0,56044	0,15	324
26042402	2	26042402_15_375_300_140	15_375_300_140	26042402_15_375_300_140_1	1	3,75	3	1,4	2,081	0,06458	0,255	331
26042402	2	26042402_15_375_300_140	15_375_300_140	26042402_15_375_300_140_2	2	3,75	3	1,4	1,564	0,52732	0,255	332
26042402	2	26042402_15_375_300_140	15_375_300_140	26042402_15_375_300_140_3	3	3,75	3	1,4	1,909	0,07252	0,255	333
26042402	2	26042402_15_375_300_140	15_375_300_140	26042402_15_375_300_140_4	4	3,75	3	1,4	1,545	0,55808	0,255	334
26042402	2	26042402_16_375_300_125	16_375_300_125	26042402_16_375_300_125_1	1	3,75	3	1,25	1,413	0,50206	0,353	341
26042402	2	26042402_16_375_300_125	16_375_300_125	26042402_16_375_300_125_2	2	3,75	3	1,25	1,479	0,54804	0,353	342
26042402	2	26042402_16_375_300_125	16_375_300_125	26042402_16_375_300_125_3	3	3,75	3	1,25	1,522	0,6174	0,353	343
26042402	2	26042402_16_375_300_125	16_375_300_125	26042402_16_375_300_125_4	4	3,75	3	1,25	1,492	0,06299	0,353	344
26042901	3	26042901_01_450_400_110	01_450_400_110	26042901_01_450_400_110_1	1	4,5	4	1,1	5,278	0,10786	0	211
26042901	3	26042901_01_450_400_110	01_450_400_110	26042901_01_450_400_110_2	2	4,5	4	1,1	4,244	0,10695	0	212
26042901	3	26042901_01_450_400_110	01_450_400_110	26042901_01_450_400_110_3	3	4,5	4	1,1	4,878	0,09589	0	213
26042901	3	26042901_01_450_400_110	01_450_400_110	26042901_01_450_400_110_4	4	4,5	4	1,1	5,234	0,10219	0	214
26042901	3	26042901_02_300_200_140	02_300_200_140	26042901_02_300_200_140_1	1	3	2	1,4	6,968	0,18903	0	221
26042901	3	26042901_02_300_200_140	02_300_200_140	26042901_02_300_200_140_2	2	3	2	1,4	7,031	0,17962	0	222
26042901	3	26042901_02_300_200_140	02_300_200_140	26042901_02_300_200_140_3	3	3	2	1,4	6,661	0,16774	0	223
26042901	3	26042901_02_300_200_140	02_300_200_140	26042901_02_300_200_140_4	4	3	2	1,4	6,929	0,19802	0	224

ID modelu	Série	ID sady	Číslo sady	ID vzorku	Číslo vzorku	Šířka drážky [mm]	Hloubka drážky [mm]	Koeficient přextruze [-]	Maximální obecné napětí [MPa]	Maximální prodloužení extenzometru	Výšková odchylka trysky [mm]	Pozice vzorku
26042901	3	26042901_03_450_200_140	03_450_200_140	26042901_03_450_200_140_1	1	4,5	2	1,4	5,652	0,16217	0	231
26042901	3	26042901_03_450_200_140	03_450_200_140	26042901_03_450_200_140_2	2	4,5	2	1,4	5,649	0,16623	0	232
26042901	3	26042901_03_450_200_140	03_450_200_140	26042901_03_450_200_140_3	3	4,5	2	1,4	5,514	0,18275	0	233
26042901	3	26042901_03_450_200_140	03_450_200_140	26042901_03_450_200_140_4	4	4,5	2	1,4	5,555	0,18411	0	234
26042901	3	26042901_04_300_400_140	04_300_400_140	26042901_04_300_400_140_1	1	3	4	1,4	8,509	0,15861	0	241
26042901	3	26042901_04_300_400_140	04_300_400_140	26042901_04_300_400_140_2	2	3	4	1,4	7,791	0,15553	0	242
26042901	3	26042901_04_300_400_140	04_300_400_140	26042901_04_300_400_140_3	3	3	4	1,4	7,189	0,14005	0	243
26042901	3	26042901_04_300_400_140	04_300_400_140	26042901_04_300_400_140_4	4	3	4	1,4	8,392	0,18191	0	244
26042902	4	26042902_06_375_300_110	06_375_300_110	26042902_06_375_300_110_1	1	3,75	3	1,1	6,757	0,13793	0	211
26042902	4	26042902_06_375_300_110	06_375_300_110	26042902_06_375_300_110_2	2	3,75	3	1,1	5,421	0,09712	0	212
26042902	4	26042902_06_375_300_110	06_375_300_110	26042902_06_375_300_110_3	3	3,75	3	1,1	7,12	0,14794	0	213
26042902	4	26042902_06_375_300_110	06_375_300_110	26042902_06_375_300_110_4	4	3,75	3	1,1	5,897	0,10659	0	214
26043001	5	26043001_09_450_300_125	09_450_300_125	26043001_09_450_300_125_1	1	4,5	3	1,25	6,329	0,15112	0	211
26043001	5	26043001_09_450_300_125	09_450_300_125	26043001_09_450_300_125_2	2	4,5	3	1,25	5,234	0,15753	0	212
26043001	5	26043001_09_450_300_125	09_450_300_125	26043001_09_450_300_125_3	3	4,5	3	1,25	5,973	0,12665	0	213
26043001	5	26043001_09_450_300_125	09_450_300_125	26043001_09_450_300_125_4	4	4,5	3	1,25	5,82	0,10662	0	214
26043001	5	26043001_10_375_300_110	10_375_300_110	26043001_10_375_300_110_1	1	3,75	3	1,1	6,189	0,18265	0	221
26043001	5	26043001_10_375_300_110	10_375_300_110	26043001_10_375_300_110_2	2	3,75	3	1,1	6,57	0,20797	0	222
26043001	5	26043001_10_375_300_110	10_375_300_110	26043001_10_375_300_110_3	3	3,75	3	1,1	5,417	0,16822	0	223
26043001	5	26043001_10_375_300_110	10_375_300_110	26043001_10_375_300_110_4	4	3,75	3	1,1	6,227	0,18863	0	224
26043001	5	26043001_11_375_300_140	11_375_300_140	26043001_11_375_300_140_1	1	3,75	3	1,4	6,75	0,15496	0	231
26043001	5	26043001_11_375_300_140	11_375_300_140	26043001_11_375_300_140_2	2	3,75	3	1,4	7,382	0,1728	0	232
26043001	5	26043001_11_375_300_140	11_375_300_140	26043001_11_375_300_140_3	3	3,75	3	1,4	6,431	0,12849	0	233
26043001	5	26043001_11_375_300_140	11_375_300_140	26043001_11_375_300_140_4	4	3,75	3	1,4	6,988	0,15837	0	234
26043001	5	26043001_12_375_300_125	12_375_300_125	26043001_12_375_300_125_1	1	3,75	3	1,25	4,78	0,09204	0	241

ID modelu	Série	ID sady	Číslo sady	ID vzorku	Číslo vzorku	Šířka drážky [mm]	Hloubka drážky [mm]	Koeficient přeextruze [-]	Maximální obecné napětí [MPa]	Maximální prodloužení extenzometru	Výšková odchylka trysky [mm]	Pozice vzorku
26043001	5	26043001_12_375_300_125	12_375_300_125	26043001_12_375_300_125_2	2	3,75	3	1,25	5,464	0,10231	0	242
26043001	5	26043001_12_375_300_125	12_375_300_125	26043001_12_375_300_125_3	3	3,75	3	1,25	6,138	0,15412	0	243
26043001	5	26043001_12_375_300_125	12_375_300_125	26043001_12_375_300_125_4	4	3,75	3	1,25	6,264	0,17001	0	244

Příloha B – Výstupy regresních modelů plochy odezvy

Varianta B.1 - výchozí model bez dodatečné proměnné výškové odchylky trysky

Výchozí model bez výškové odchylky trysky

Regrese plochy odezvy: Maximální obecné napětí [MPa] ve vztahu k výrobnímu bloku; Šířka drážky [mm]; Hloubka drážky [mm]; Koeficient přeextruze [-]

Zpětná eliminace členů modelu

α pro vyřazení = 0,1

Kódované koeficienty

Člen modelu	Koeficient	SE koeficientu	t-hodnota	p-hodnota	VIF
Konstanta	4,563	0,195	23,43	0,000	
Výrobní bloky					
26042301	1,830	0,228	8,03	0,000	2,95
26042302	-1,992	0,207	-9,63	0,000	2,44
26042401	0,857	0,183	4,69	0,000	1,90
26042402	-2,980	0,205	-14,53	0,000	2,39
Šířka drážky [mm]	-0,337	0,110	-3,05	0,003	1,12
Hloubka drážky [mm]	0,743	0,110	6,76	0,000	1,20
Koeficient přeextruze [-]	0,801	0,136	5,87	0,000	1,83
Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]	-1,023	0,244	-4,19	0,000	1,78
Hloubka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]	-0,233	0,134	-1,74	0,086	1,50

Souhrn modelu

S	R ²	R ² (upr.)	R ² (pred.)
0,749947	89,51%	88,17%	86,24%

Analýza rozptylu

Zdroj variability	SV	Upr. SS	Upr. MS	F-hodnota	p-hodnota
Model	9	336,112	37,3457	66,40	0,000
Výrobní bloky	4	303,174	75,7934	134,76	0,000
Lineární členy	3	45,379	15,1262	26,89	0,000
Šířka drážky [mm]	1	5,246	5,2457	9,33	0,003
Hloubka drážky [mm]	1	25,696	25,6956	45,69	0,000
Koeficient přeextruze [-]	1	19,396	19,3960	34,49	0,000
Kvadratické členy	1	9,889	9,8888	17,58	0,000
Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]	1	9,889	9,8888	17,58	0,000
Dvoutakrové interakce	1	1,704	1,7042	3,03	0,086
Hloubka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]	1	1,704	1,7042	3,03	0,086
Chyba	70	39,369	0,5624		
Nedostatek shody	10	16,380	1,6380	4,27	0,000
Pure Chyba	60	22,990	0,3832		
Celkem	79	375,481			

Regresní rovnice v nekódovaných jednotkách

Maximální obecné napětí [MPa]	=	-17,68 - 0,449 Šířka drážky [mm] + 8,82 Hloubka drážky [mm] + 10,00 Koeficient přeextruze [-] - 1,023 Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm] - 1,553 Hloubka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]
-------------------------------	---	--

Rovnice je průměrována přes výrobní bloky.

Predikce a diagnostika neobvyklých pozorování

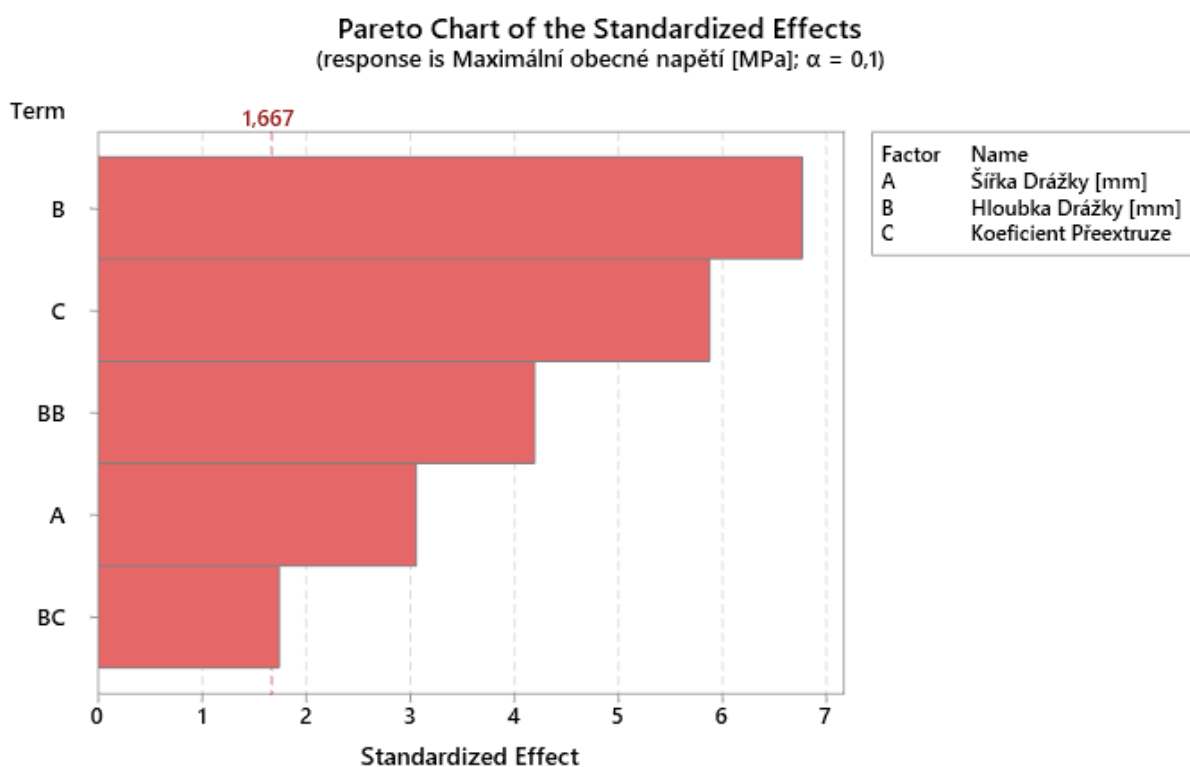
Pozorování	Maximální obecné napětí [MPa]	Predikce	Reziduum	Std Reziduum	
4	2,344	3,931	-1,587	-2,27	R
7	4,712	3,257	1,455	2,09	R
38	7,234	5,757	1,477	2,09	R
66	4,244	5,663	-1,419	-2,04	R

R - velké reziduum

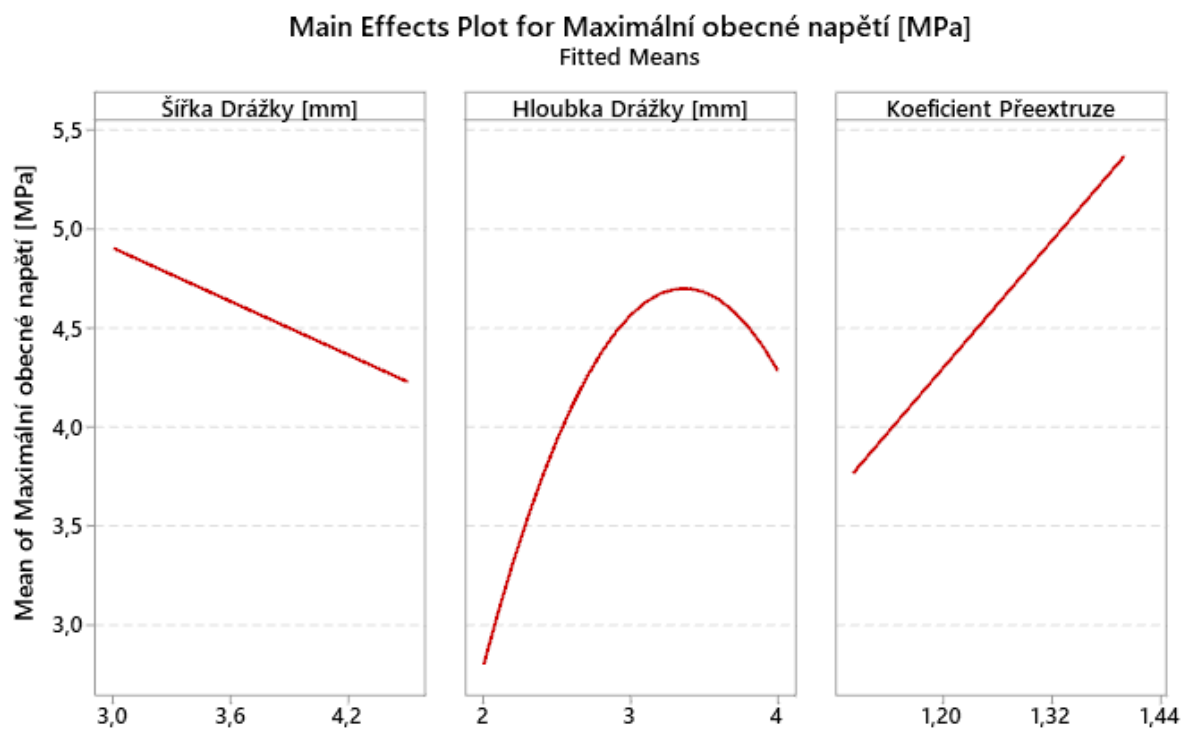
Výchozí model bez výškové odchylky trysky

Faktorové grafy pro Maximální obecné napětí [MPa]

Grafické výstupy modelu

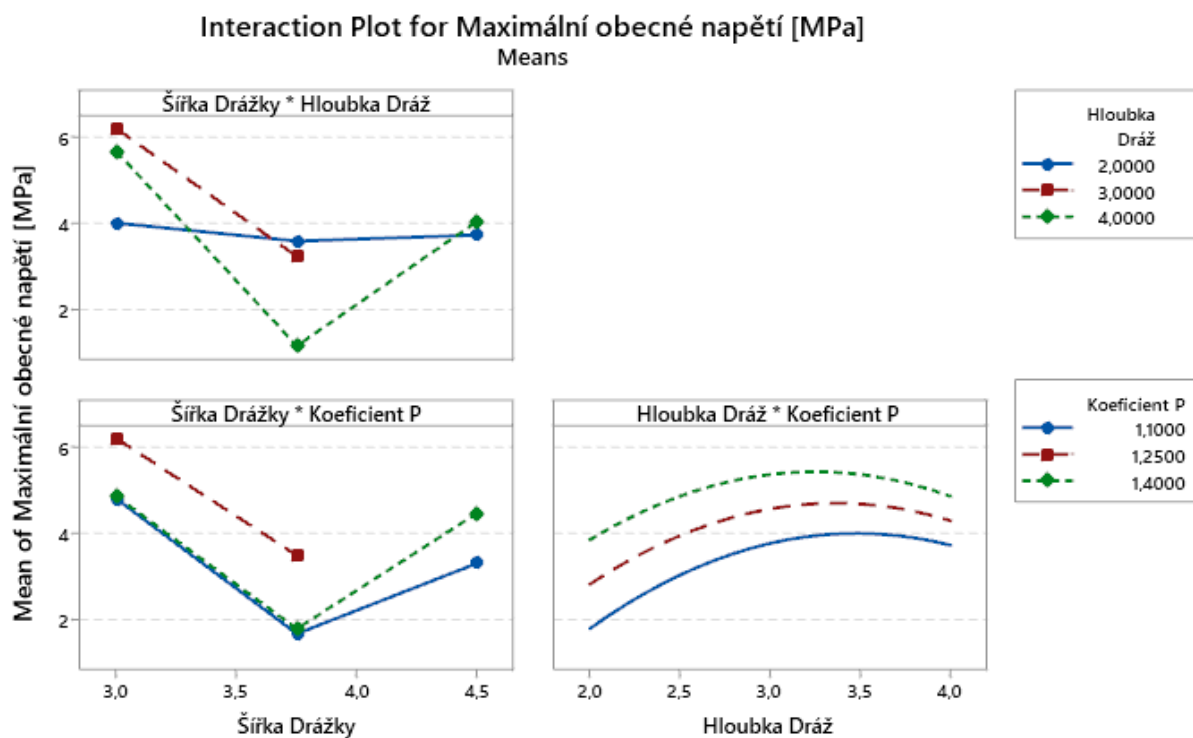


Grafický výstup 1.1 převzatý ze zdrojového výstupu Minitab.



All displayed terms are in the model.

Grafický výstup 1.2 převzatý ze zdrojového výstupu Minitab.



A gray background represents a term not in the model.

Grafický výstup 1.3 převzatý ze zdrojového výstupu Minitab.

Varianta B.2 - model se zahrnutím výškové odchylky trysky

Model se zahrnutím výškové odchylky trysky

Regrese plochy odezvy: Maximální obecné napětí [MPa] ve vztahu k výrobnímu bloku; Šířka drážky [mm]; Hloubka drážky [mm]; Koeficient přeextruze [-]; Výšková odchylka trysky [mm]

Zpětná eliminace členů modelu

Kandidátní členy modelu: Výrobní bloky; Šířka drážky [mm]; Hloubka drážky [mm]; Koeficient přeextruze [-];

Výšková odchylka trysky [mm]; Šířka drážky [mm]*Šířka drážky [mm]; Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm];

Koeficient přeextruze [-]*Koeficient přeextruze [-]; Výšková odchylka trysky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]; Šířka drážky

[mm]*Hloubka drážky [mm]; Šířka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]; Šířka drážky

[mm]*Výšková odchylka trysky [mm]; Hloubka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]; Hloubka drážky

[mm]*Výšková odchylka trysky [mm]; Koeficient přeextruze [-]*Výšková odchylka trysky [mm]

α pro vyřazení = 0,1

Pokud má člen více koeficientů, je uveden koeficient s největší absolutní hodnotou.

Průběh zpětné eliminace členů modelu

	----Step 1----	----Step 1----	----Step 1----	----Step 2----	----Step 2----	----Step 2----
	Koeficient	p-hodnota	p-hodnota	Koeficient	p-hodnota	p-hodnota
Konstanta	4,513			4,513		
Výrobní bloky	-2,857	0,000	0,000	-2,857	0,000	0,000
Šířka drážky [mm]	-0,153	0,306	0,306	-0,147	0,308	0,308
Hloubka drážky [mm]	0,516	0,001	0,001	0,516	0,001	0,001
Koeficient přeextruze [-]	0,486	0,003	0,003	0,487	0,002	0,002
Výšková odchylka trysky [mm]	-0,507	0,015	0,015	-0,512	0,012	0,012
Šířka drážky [mm]*Šířka drážky [mm]	0,140	0,550	0,550	0,134	0,559	0,559
Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]	-1,200	0,000	0,000	-1,207	0,000	0,000
Koeficient přeextruze [-]*Koeficient přeextruze [-]	0,263	0,193	0,193	0,256	0,192	0,192
Výšková odchylka trysky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]	0,371	0,268	0,268	0,384	0,233	0,233
Šířka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]	-0,099	0,519	0,519	-0,084	0,500	0,500
Šířka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]	0,084	0,632	0,632	0,101	0,482	0,482
Šířka drážky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]	0,484	0,011	0,011	0,497	0,004	0,004
Hloubka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]	-0,028	0,868	0,868			
Hloubka drážky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]	-0,107	0,604	0,604	-0,098	0,620	0,620
Koeficient přeextruze [-]*Výšková odchylka trysky [mm]	-0,233	0,275	0,275	-0,216	0,247	0,247
S		0,643229	0,643229		0,639309	0,639309
R ²		92,91%	92,91%		92,91%	92,91%
R ² (upr.)		91,11%	91,11%		91,22%	91,22%
R ² (pred.)		88,62%	88,62%		88,92%	88,92%
Mallows' Cp		21,00	21,00		19,03	19,03
AICc		229,11	229,11		225,85	225,85
BIC		273,28	273,28		268,71	268,71
	----Step 3----	----Step 3----	----Step 3----	----Step 4----	----Step 4----	----Step 4----
	Koeficient	Koeficient	p-hodnota	Koeficient	Koeficient	p-hodnota
Konstanta	4,493	4,493		4,486	4,486	
Výrobní bloky	-2,881	-2,881	0,000	-2,876	-2,876	0,000
Šířka drážky [mm]	-0,149	-0,149	0,299	-0,138	-0,138	0,330
Hloubka drážky [mm]	0,5732	0,5732	0,000	0,5781	0,5781	0,000
Koeficient přeextruze [-]	0,512	0,512	0,001	0,540	0,540	0,000
Výšková odchylka trysky [mm]	-0,489	-0,489	0,013	-0,498	-0,498	0,011
Šířka drážky [mm]*Šířka drážky [mm]	0,156	0,156	0,486	0,153	0,153	0,494

	-----Step 1-----	-----Step 1-----	-----Step 1-----	-----Step 2-----	-----Step 2-----	-----Step 2-----
Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]	-1,225	-1,225	0,000	-1,224	-1,224	0,000
Koeficient přeextruze [-]*Koeficient přeextruze [-]	0,277	0,277	0,148	0,268	0,268	0,158
Výšková odchylka trysky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]	0,405	0,405	0,203	0,417	0,417	0,187
Šířka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]	-0,057	-0,057	0,610			
Šířka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]	0,134	0,134	0,290	0,145	0,145	0,244
Šířka drážky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]	0,510	0,510	0,003	0,529	0,529	0,001
Hloubka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]						
Hloubka drážky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]						
Koeficient přeextruze [-]*Výšková odchylka trysky [mm]	-0,174	-0,174	0,292	-0,146	-0,146	0,346
S			0,636331			0,633462
R ²			92,88%			92,86%
R ² (upr.)			91,30%			91,38%
R ² (pred.)			89,05%			89,22%
Mallows' Cp			17,27			15,53
AICc			222,94			220,13
BIC			264,41			260,13
	-----Step 5-----	-----Step 5-----	-----Step 5-----	-----Step 6-----	-----Step 6-----	-----Step 6-----
	Koeficient	Koeficient	p-hodnota	Koeficient	Koeficient	p-hodnota
Konstanta	4,511	4,511		4,564	4,564	
Výrobní bloky	-2,922	-2,922	0,000	-2,958	-2,958	0,000
Šířka drážky [mm]	-0,151	-0,151	0,280	-0,130	-0,130	0,345
Hloubka drážky [mm]	0,5848	0,5848	0,000	0,5923	0,5923	0,000
Koeficient přeextruze [-]	0,529	0,529	0,000	0,609	0,609	0,000
Výšková odchylka trysky [mm]	-0,510	-0,510	0,009	-0,524	-0,524	0,007
Šířka drážky [mm]*Šířka drážky [mm]						
Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]	-1,198	-1,198	0,000	-1,187	-1,187	0,000
Koeficient přeextruze [-]*Koeficient přeextruze [-]	0,289	0,289	0,120	0,270	0,270	0,144
Výšková odchylka trysky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]	0,440	0,440	0,160	0,345	0,345	0,246
Šířka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]						
Šířka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]	0,161	0,161	0,189	0,164	0,164	0,180
Šířka drážky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]	0,509	0,509	0,002	0,536	0,536	0,001
Hloubka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]						
Hloubka drážky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]						
Koeficient přeextruze [-]*Výšková odchylka trysky [mm]	-0,152	-0,152	0,325			
S			0,631444			0,631365
R ²			92,82%			92,73%
R ² (upr.)			91,44%			91,44%
R ² (pred.)			89,51%			89,65%
Mallows' Cp			13,99			12,93
AICc			217,65			215,84
BIC			256,10			252,67
	-----Step 7-----	-----Step 7-----	-----Step 7-----	-----Step 8-----	-----Step 8-----	-----Step 8-----
	Koeficient	Koeficient	p-hodnota	Koeficient	Koeficient	p-hodnota

	-----Step 1-----	-----Step 1-----	-----Step 1-----	-----Step 2-----	-----Step 2-----	-----Step 2-----
Konstanta	4,830	4,830		4,794	4,794	
Výrobní bloky	-3,059	-3,059	0,000	-3,073	-3,073	0,000
Šířka drážky [mm]	-0,084	-0,084	0,525	-0,023	-0,023	0,851
Hloubka drážky [mm]	0,5940	0,5940	0,000	0,5841	0,5841	0,000
Koeficient přeextruze [-]	0,646	0,646	0,000	0,6857	0,6857	0,000
Výšková odchylka trysky [mm]	-0,597	-0,597	0,001	-0,545	-0,545	0,003
Šířka drážky [mm]*Šířka drážky [mm]						
Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]	-1,228	-1,228	0,000	-1,171	-1,171	0,000
Koeficient přeextruze [-]*Koeficient přeextruze [-]	0,224	0,224	0,215	0,265	0,265	0,136
Výšková odchylka trysky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]						
Šířka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]						
Šířka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]	0,143	0,143	0,237			
Šířka drážky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]	0,566	0,566	0,000	0,621	0,621	0,000
Hloubka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]						
Hloubka drážky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]						
Koeficient přeextruze [-]*Výšková odchylka trysky [mm]						
S			0,632716			0,634243
R ²			92,62%			92,49%
R ² (upr.)			91,40%			91,36%
R ² (pred.)			89,69%			89,79%
Mallows' Cp			12,24			11,61
AICc			214,54			213,36
BIC			249,67			246,72
	-----Step 9-----	-----Step 9-----	-----Step 9-----			
	Koeficient	Koeficient	p-hodnota			
Konstanta	4,935	4,935				
Výrobní bloky	-3,090	-3,090	0,000			
Šířka drážky [mm]	-0,031	-0,031	0,800			
Hloubka drážky [mm]	0,5845	0,5845	0,000			
Koeficient přeextruze [-]	0,6867	0,6867	0,000			
Výšková odchylka trysky [mm]	-0,572	-0,572	0,002			
Šířka drážky [mm]*Šířka drážky [mm]						
Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]	-1,103	-1,103	0,000			
Koeficient přeextruze [-]*Koeficient přeextruze [-]						
Výšková odchylka trysky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]						
Šířka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]						
Šířka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]						
Šířka drážky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]	0,606	0,606	0,000			
Hloubka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]						
Hloubka drážky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]						
Koeficient přeextruze [-]*Výšková odchylka trysky [mm]						
S			0,638820			

	-----Step 1-----	-----Step 1-----	-----Step 1-----	-----Step 2-----	-----Step 2-----	-----Step 2-----
R ²			92,30%			
R ² (upr.)			91,23%			
R ² (pred.)			89,70%			
Mallows' Cp			11,81			
AICc			213,18			
BIC			244,71			

Kódované koeficienty

Člen modelu	Koeficient	SE koeficientu	t-hodnota	p-hodnota	VIF
Konstanta	4,935	0,141	34,89	0,000	
Výrobní bloky					
26042301	1,005	0,187	5,37	0,000	2,74
26042302	-1,930	0,264	-7,31	0,000	5,46
26042401	0,166	0,157	1,06	0,293	1,93
26042402	-3,090	0,219	-14,11	0,000	3,76
26042901	1,595	0,202	7,91	0,000	3,19
26042902	1,479	0,333	4,44	0,000	5,05
Šířka drážky [mm]	-0,031	0,122	-0,25	0,800	2,05
Hloubka drážky [mm]	0,5845	0,0918	6,37	0,000	1,16
Koeficient přeextruze [-]	0,6867	0,0998	6,88	0,000	1,66
Výšková odchylka trysky [mm]	-0,572	0,176	-3,26	0,002	3,57
Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]	-1,103	0,216	-5,12	0,000	2,81
Šířka drážky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]	0,606	0,147	4,13	0,000	1,99

Souhrn modelu

S	R ²	R ² (upr.)	R ² (pred.)
0,638820	92,30%	91,23%	89,70%

Analýza rozptylu

Zdroj variability	SV	Upr. SS	Upr. MS	F-hodnota	p-hodnota
Model	12	425,371	35,4475	86,86	0,000
Výrobní bloky	6	92,556	15,4260	37,80	0,000
Lineární členy	4	38,569	9,6422	23,63	0,000
Šířka drážky [mm]	1	0,026	0,0263	0,06	0,800
Hloubka drážky [mm]	1	16,552	16,5523	40,56	0,000
Koeficient přeextruze [-]	1	19,325	19,3252	47,36	0,000
Výšková odchylka trysky [mm]	1	4,328	4,3278	10,61	0,002
Kvadratické členy	1	10,691	10,6905	26,20	0,000
Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]	1	10,691	10,6905	26,20	0,000
Dvoufaktorové interakce	1	6,968	6,9680	17,07	0,000
Šířka drážky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]	1	6,968	6,9680	17,07	0,000
Chyba	87	35,504	0,4081		
Nedostatek shody	12	7,473	0,6228	1,67	0,092
Pure Chyba	75	28,030	0,3737		
Celkem	99	460,875			

Regresní rovnice v nekódovaných jednotkách

Maximální obecné napětí [MPa]	=	-8,71 - 0,850 Šířka drážky [mm] + 7,20 Hloubka drážky [mm] + 4,578 Koeficient přeextruze [-] - 20,44 Výšková odchylka trysky [mm] - 1,103 Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm] + 4,59 Šířka drážky [mm]*Výšková odchylka trysky [mm]
-------------------------------	---	--

Rovnice je průměrována přes výrobní bloky.

Predikce a diagnostika neobvyklých pozorování

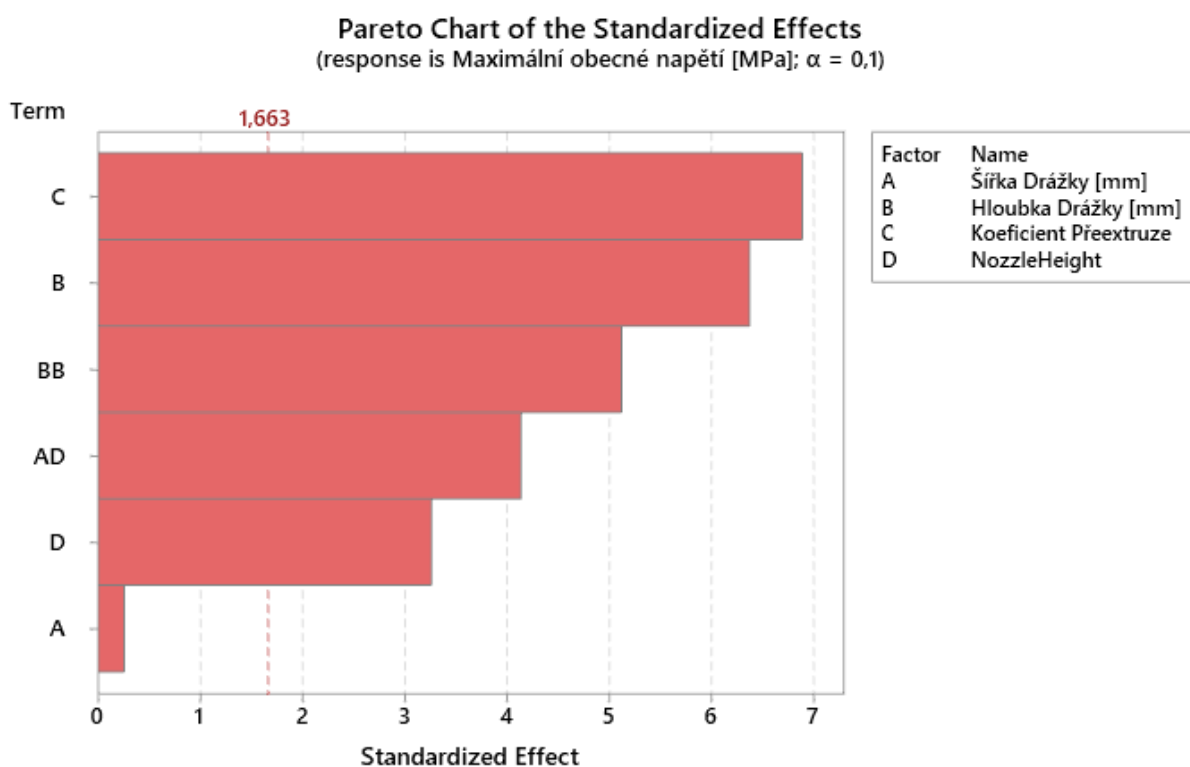
Pozorování	Maximální obecné napětí [MPa]	Predikce	Reziduum	Std Reziduum	
1	5,315	3,508	1,807	3,06	R
7	4,712	3,500	1,212	2,01	R
37	4,503	6,310	-1,807	-3,05	R
97	4,780	6,282	-1,502	-2,43	R

R - velké reziduum

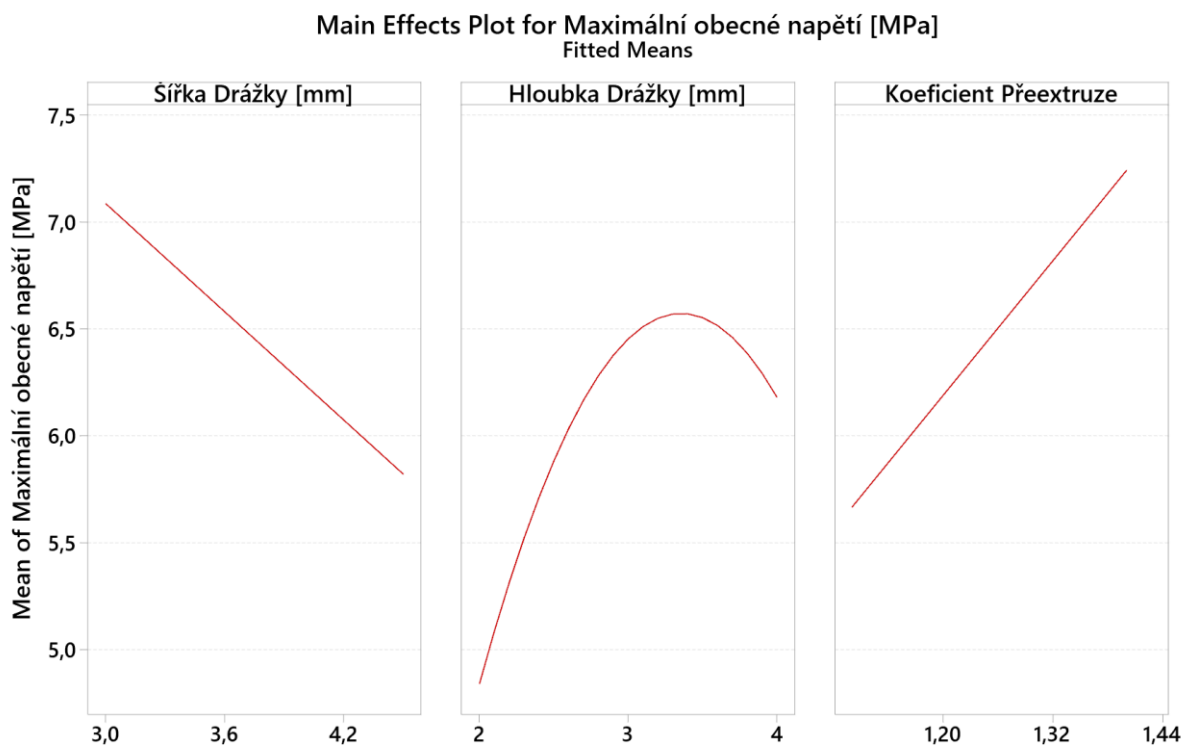
Model se zahrnutím výškové odchylky trysky

Faktorové grafy pro Maximální obecné napětí [MPa]

Grafické výstupy modelu

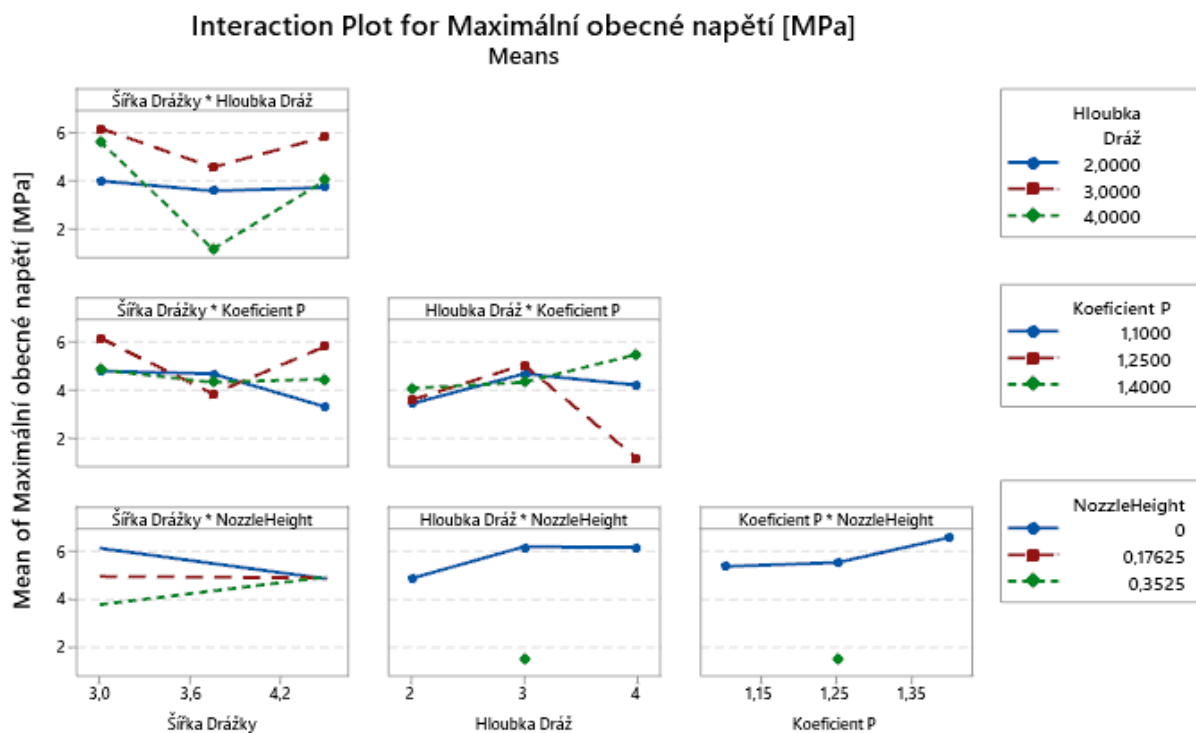


Grafický výstup 2.1 převzatý ze zdrojového výstupu Minitab.



All displayed terms are in the model.

Grafický výstup 2.2 převzatý ze zdrojového výstupu Minitab.



A gray background represents a term not in the model.

Grafický výstup 2.3 převzatý ze zdrojového výstupu Minitab.

Varianta B.3 - model pouze pro vzorky bez zjištěné výškové odchylky trysky

Model pouze pro vzorky bez výškové odchylky trysky

Regrese plochy odezvy: Maximální obecné napětí [MPa] ve vztahu k výrobnímu bloku; Šířka drážky [mm]; Hloubka drážky [mm]; Koeficient přeextruze [-]

Zpětná eliminace členů modelu

Kandidátní členy modelu: Výrobní bloky; Šířka drážky [mm]; Hloubka drážky [mm]; Koeficient přeextruze [-]; Šířka drážky [mm]*Šířka drážky [mm]; Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]; Koeficient přeextruze*Koeficient přeextruze [-]; Šířka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]; Šířka drážky

[mm]*Koeficient přeextruze [-]; Hloubka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]

α pro vyřazení = 0,1

Pokud má člen více koeficientů, je uveden koeficient s největší absolutní hodnotou.

Průběh zpětné eliminace členů modelu

	-----Step 1-----	-----Step 1-----	-----Step 2-----	-----Step 2-----
	Koeficient	p-hodnota	Koeficient	p-hodnota
Konstanta	6,255		6,369	
Výrobní bloky	-1,104	0,027	-1,379	0,000
Šířka drážky [mm]	-0,839	0,000	-0,896	0,000
Hloubka drážky [mm]	0,373	0,043	0,354	0,054
Koeficient přeextruze [-]	0,490	0,033	0,435	0,052
Šířka drážky [mm]*Šířka drážky [mm]	0,324	0,193	0,362	0,144
Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]	-1,352	0,001	-1,124	0,001
Koeficient přeextruze [-]*Koeficient přeextruze [-]	0,333	0,258		
Šířka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]	0,288	0,222	0,374	0,097
Šířka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]	0,508	0,112	0,633	0,037
Hloubka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]	0,418	0,189	0,543	0,073
S		0,645301		0,647428
R ²		80,03%		79,46%
R ² (upr.)		74,38%		74,21%
R ² (pred.)		66,29%		66,81%
Mallows' Cp		14,00		13,31
AICc		142,67		140,78
BIC		163,18		160,77
	-----Step 3-----	-----Step 3-----	-----Step 4-----	-----Step 4-----
	Koeficient	p-hodnota	Koeficient	p-hodnota
Konstanta	6,522		6,498	
Výrobní bloky	-1,294	0,000	-1,025	0,000
Šířka drážky [mm]	-0,848	0,000	-0,705	0,000
Hloubka drážky [mm]	0,423	0,020	0,578	0,000
Koeficient přeextruze [-]	0,451	0,046	0,625	0,002
Šířka drážky [mm]*Šířka drážky [mm]				
Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]	-1,062	0,001	-1,052	0,002
Koeficient přeextruze [-]*Koeficient přeextruze [-]				
Šířka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]	0,318	0,156		
Šířka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]	0,597	0,051	0,292	0,176
Hloubka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]	0,507	0,096	0,202	0,347
S		0,655526		0,662707

	-----Step 1-----	-----Step 1-----	-----Step 2-----	-----Step 2-----
R ²		78,49%		77,56%
R ² (upr.)		73,57%		72,98%
R ² (pred.)		66,97%		66,33%
Mallows' Cp		13,53		13,68
AICc		140,12		139,39
BIC		159,43		157,88
	-----Step 5-----	-----Step 5-----	-----Step 6-----	-----Step 6-----
	Koeficient	p-hodnota	Koeficient	p-hodnota
Konstanta	6,467		6,453	
Výrobní bloky	-0,968	0,000	-0,943	0,000
Šířka drážky [mm]	-0,654	0,000	-0,632	0,000
Hloubka drážky [mm]	0,642	0,000	0,670	0,000
Koeficient přeextruze [-]	0,738	0,000	0,787	0,000
Šířka drážky [mm]*Šířka drážky [mm]				
Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]	-0,976	0,002	-0,943	0,003
Koeficient přeextruze [-]*Koeficient přeextruze [-]				
Šířka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]				
Šířka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]	0,151	0,325		
Hloubka drážky [mm]*Koeficient přeextruze [-]				
S		0,662063		0,661983
R ²		77,15%		76,70%
R ² (upr.)		73,04%		73,04%
R ² (pred.)		66,78%		67,14%
Mallows' Cp		12,63		11,67
AICc		137,35		135,51
BIC		154,88		151,96

Kódované koeficienty

Člen modelu	Koeficient	SE koeficientu	t-hodnota	p-hodnota	VIF
Konstanta	6,453	0,170	38,05	0,000	
Výrobní bloky					
26042301	0,045	0,198	0,23	0,820	2,49
26042401	-0,943	0,201	-4,70	0,000	2,55
26042901	0,438	0,250	1,75	0,085	4,55
26042902	0,633	0,331	1,91	0,062	4,40
Šířka drážky [mm]	-0,632	0,119	-5,32	0,000	1,15
Hloubka drážky [mm]	0,670	0,119	5,61	0,000	1,04
Koeficient přeextruze [-]	0,787	0,135	5,84	0,000	1,66
Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]	-0,943	0,301	-3,13	0,003	3,08

Souhrn modelu

S	R ²	R ² (upr.)	R ² (pred.)
0,661983	76,70%	73,04%	67,14%

Analýza rozptylu

Zdroj variability	SV	Upr. SS	Upr. MS	F-hodnota	p-hodnota
Model	8	73,560	9,1950	20,98	0,000
Výrobní bloky	4	14,929	3,7323	8,52	0,000
Lineární členy	3	44,779	14,9265	34,06	0,000

Zdroj variability	SV	Upr. SS	Upr. MS	F-hodnota	p-hodnota
Šířka drážky [mm]	1	12,388	12,3882	28,27	0,000
Hloubka drážky [mm]	1	13,775	13,7752	31,43	0,000
Koeficient přeextruze [-]	1	14,939	14,9390	34,09	0,000
Kvadratické členy	1	4,304	4,3037	9,82	0,003
Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]	1	4,304	4,3037	9,82	0,003
Chyba	51	22,349	0,4382		
Nedostatek shody	6	4,647	0,7746	1,97	0,090
Pure Chyba	45	17,702	0,3934		
Celkem	59	95,910			

Regresní rovnice v nekódovaných jednotkách

Maximální obecné napětí [MPa]	=	-7,44 - 0,843 Šířka drážky [mm] + 6,33 Hloubka drážky [mm] + 5,248 Koeficient přeextruze [-] - 0,943 Hloubka drážky [mm]*Hloubka drážky [mm]
-------------------------------	---	--

Rovnice je průměrována přes výrobní bloky.

Predikce a diagnostika neobvyklých pozorování

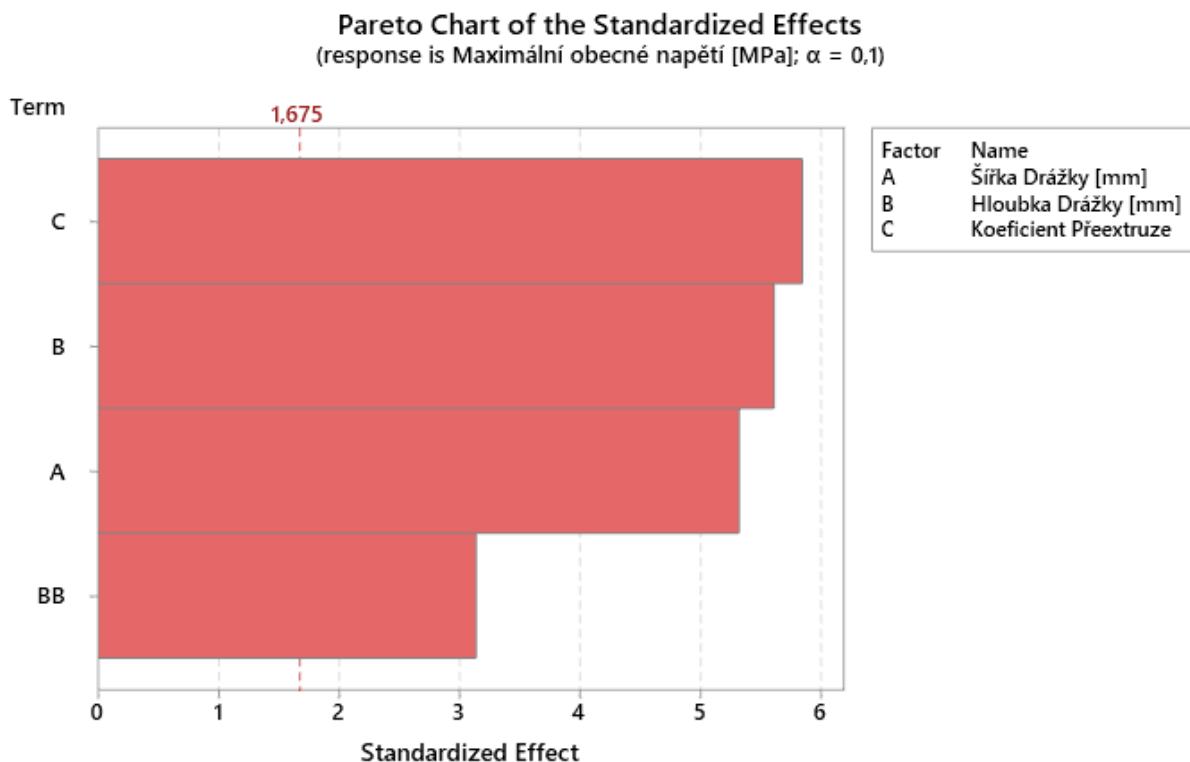
Pozorování	Maximální obecné napětí [MPa]	Predikce	Reziduum	Std Reziduum	
3	4,712	3,467	1,244	2,04	R
17	4,503	6,143	-1,640	-2,75	R
57	4,780	6,280	-1,500	-2,34	R

R - velké reziduum

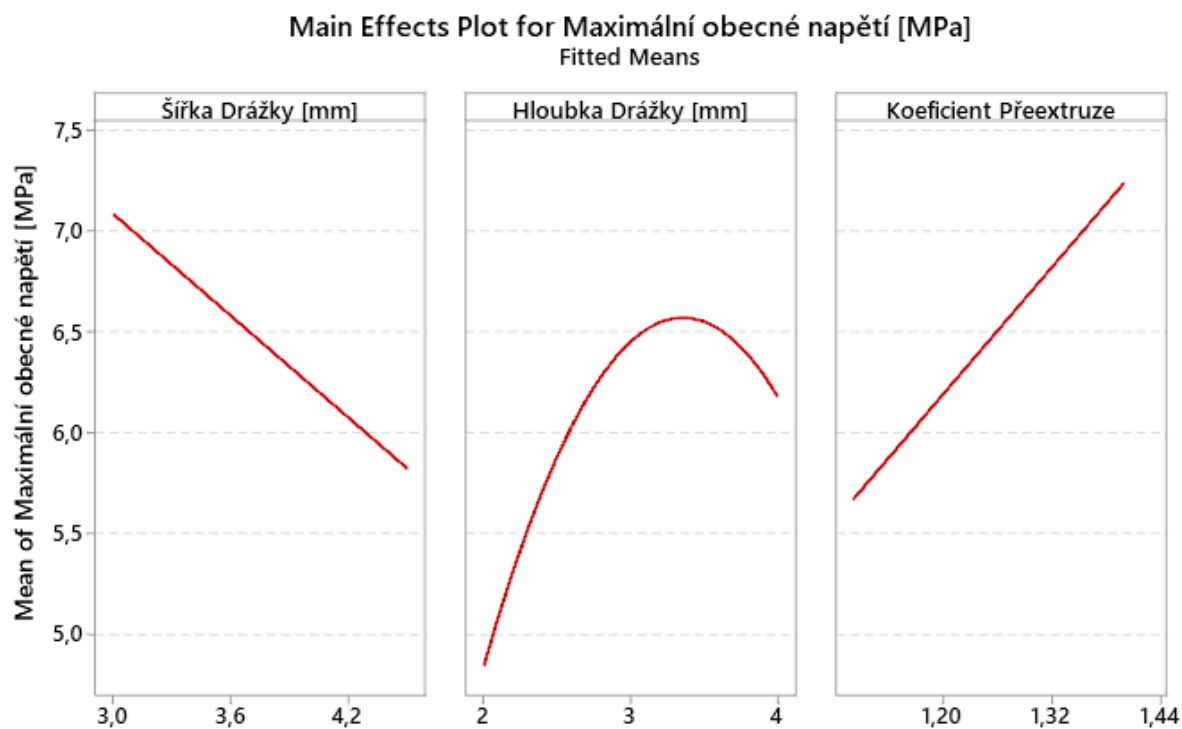
Model pouze pro vzorky bez výškové odchylky trysky

Faktorové grafy pro Maximální obecné napětí [MPa]

Grafické výstupy modelu

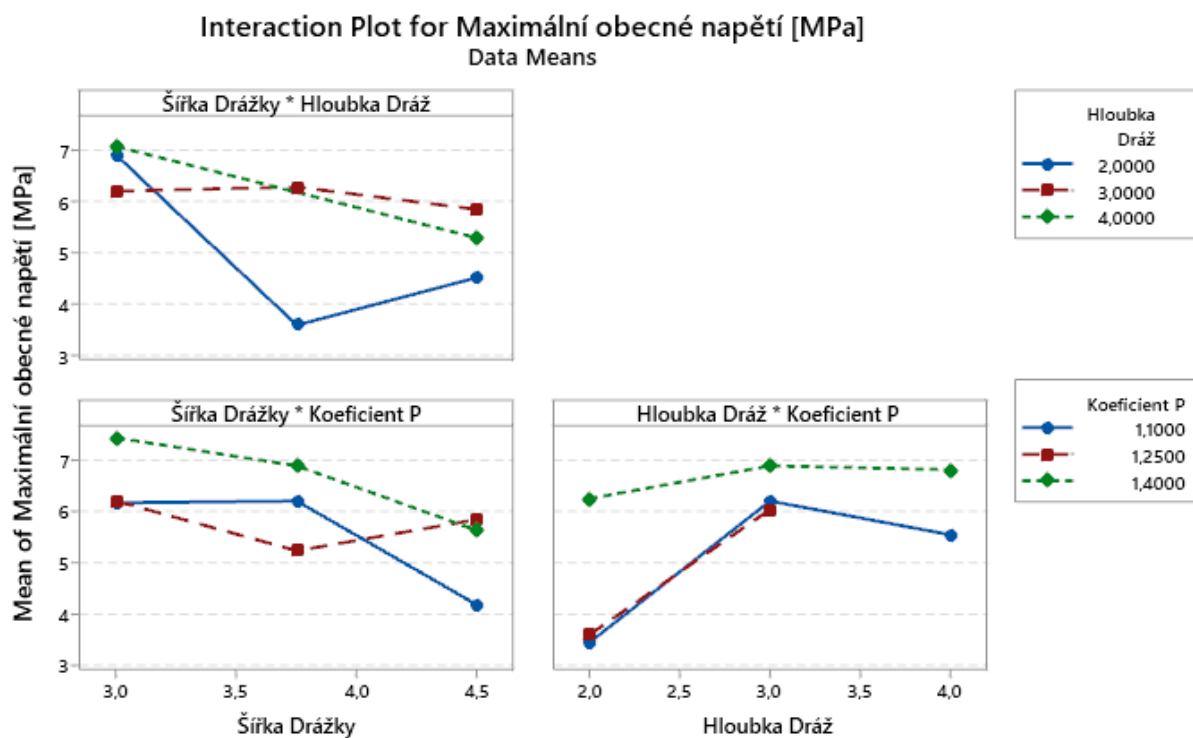


Grafický výstup 3.1 převzatý ze zdrojového výstupu Minitab.



All displayed terms are in the model.

Grafický výstup 3.2 převzatý ze zdrojového výstupu Minitab.



Displayed terms are not in the model.

Grafický výstup 3.3 převzatý ze zdrojového výstupu Minitab.