



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYUŽITÍ KOVOVÉ ADITIVNÍ TECHNOLOGIE PŘI VÝROBĚ OBĚŽNÉHO AXIÁLNÍHO KOLA TURBÍNOVÉHO MOTORU POMOCNÉ ENERGETICKÉ JEDNOTKY

APPLICATION OF METAL ADDITIVE TECHNOLOGY IN PRODUCTION OF A BLISK FOR TURBINE ENGINE
OF A AUXILIARY POWER UNIT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Robl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Jan Robl
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

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:

Využití kovové aditivní technologie při výrobě oběžného axiálního kola turbínového motoru pomocné energetické jednotky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se bude zabývat návrhem využití moderní kovové aditivní technologie pro žárupevné součásti turbín proudových motorů a pomocných energetických jednotek. Cílem práce bude výroba oběžného kola turbíny pomocné energetické jednotky společnosti PBS Velká Bíteš a. s. Současně s axiálním kolem budou vyrobeny vzorky určené k testování mechanických vlastností použitého materiálu. Práce bude ukončena zpracováním naměřených dat (ze zkušebních vzorků) a celkovým zhodnocením dosažených výsledků.

Cíle diplomové práce:

- Teoretická část – rozbor technologie, aplikace a využívaných materiálů.
- Experimentální část – výroba oběžného kola turbíny pomocné energetické jednotky.
- Analýza, zpracování a vyhodnocení naměřených dat získaných z mechanických zkoušek.
- Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

FROES, F. H., BOYER, R. Additive manufacturing for the aerospace industry. Amsterdam: Elsevier, 2019, xvi, 465 s. ISBN 978-0-12-814062-8.

MILEWSKI, J. O. Additive Manufacturing of Metals. Cham: Springer International Publishing, 2017, 258. DOI: 10.1007/978-3-319-58205-4. ISBN 978-3-319-58204-7.

YANG, L., HSU, K., BAUGHMAN, B., GODFREY, D., MEDINA, F., MENON, M., WIENER, S. Additive manufacturing of metals: the technology, materials, design and production. Cham: Springer International Publishing, 2017, vii, 168 s. ISBN 978-3-319-55127-2.

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1. vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80--4-4025-8.

CHUA, C. K., LEONG, K. F., LIM, C. S. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, c2010. 512 pp. ISBN 978-981-277-897-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá využitím aditivní technologie pro výrobu silně tepelně exponovaných součástí turbínového motoru. První část práce je věnována problematice zpracování žárupevných materiálů metodou SLM, představení konvenční výroby zvoleného dílce a nastínění aktuálně používaných progresivních metod využívaných v technologii přesného lití. Tyto teoretické poznatky jsou dále uplatněny v praktické části, která se zabývá analýzou mechanických vlastností litého a tisknutého materiálu IN 939. Součástí experimentální části je i výroba oběžného axiálního kola prvního stupně turbíny pomocné energetické jednotky S5L aditivní technologií. V rámci práce je prováděn také rozbor lomových ploch a metalografická analýza vzorků pomocí světelné a skenovací elektronové mikroskopie. Práce je zakončena zhodnocením dosažených výsledků.

Klíčová slova

aditivní technologie, 3D tisk, metoda SLM, IN 939

ABSTRACT

The thesis deals with the possible use of additive technology in the production of strong thermally exposed components of turbine engines. The first part of the thesis is dedicated to the issue of processing heat-resistant materials by SLM method, introduction of conventional production of selected part and outline of currently used progressive methods in precision casting technology. These theoretical findings are further applied in the practical part of the thesis, which deals with the analysis of mechanical properties of cast and printed material IN 939. Experimental part also includes production of the blisk of the first stage turbine of the auxiliary power unit S5L by SLM additive technology. The thesis also includes analysis of fracture surfaces and metallographic analysis of samples using light and scanning electron microscopy. The thesis ends with the evaluation of the achieved results.

Key words

Additive technology, 3D printing, SLM method, IN 939

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ROBL, Jan. *Využití kovové aditivní technologie při výrobě oběžného axiálního kola turbínového motoru pomocné energetické jednotky*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124624>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Využití kovové aditivní technologie při výrobě oběžného axiálního kola turbínového motoru pomocné energetické jednotky** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

26.6.2020

Datum

Bc. Jan Robl

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu doc. Ing. Josefu Sedlákovvi, Ph.D. za odborné vedení práce, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat společnosti PBS Velká Bíteš a. s. za poskytnutí zázemí a možnosti přínosné spolupráce, konkrétně pak Ing. Ondřeji Dvořáčkovi, Ing. Petru Šabackému za jejich čas, který mi v průběhu řešení obětovali. Velký dík patří také Ing. Kateřině Mouralové, Ph.D. a jejímu výzkumnému týmu za ochotu a veškerý čas, který mi věnovala. Mé poděkování patří také panu prof. RNDr. Antonínu Dlouhému, CSc. za jeho pomoc, rady a čas, který mi obětoval při řešení dané problematiky.

Děkuji své přítelkyni Marii za její podporu během studia. V neposlední řadě děkuji také svým rodičům za možnost studovat.

Část práce byla provedena za podpory společnosti PBS Velká Bíteš a. s.

Část práce byla provedena za podpory výzkumné infrastruktury CzechNanoLab (ID LM2018110, MŠMT, 2020–2022), CEITEC Vysoké učení technické v Brně.

OBSAH

ABSTRAKT	3
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	3
PROHLÁŠENÍ	4
PODĚKOVÁNÍ	5
ÚVOD.....	8
1 PŘEDSTAVENÍ SPOLEČNOSTI	9
1.1 Divize přesného lití	9
1.2 Divize letecké techniky	9
2 VÝBĚR APLIKACE.....	10
2.1 Proudové motory.....	10
2.2 Pomocné energetické jednotky	11
2.3 Konstrukce turbínového motoru	12
3 KOVOVÉ ADITIVNÍ TECHNOLOGIE VE VÝROBĚ TURBÍNOVÝCH MOTORŮ	15
3.1 Princip kovové aditivní technologie.....	15
3.2 Selective Laser Melting.....	16
3.3 Použité materiály technologie SLM.....	17
3.4 Vlastnosti materiálu IN939	19
3.5 Tepelné zpracování materiálu IN 939	21
3.5.1 Tepelné zpracování tisknutých vzorků IN939	21
3.5.2 Tepelné zpracování litých vzorků z IN939	22
3.6 Anizotropie mechanických vlastností	22
4 VOLBA KOMPONENTY PRO IMPLEMENTACI KOVOVÉ ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	23
4.1 Konvenční výroba oběžného kola	24
4.1.1 Využití progresivních metod v konvenční výrobě.....	24
4.2 Volba materiálu pro aditivní výrobu	26
5 MECHANICKÉ VLASTNOSTI	27
5.1 Konstrukce a výroba tisknutých vzorků pro mechanické zkoušky	27
5.1.1 Výroba tisknutých vzorků.....	27
5.1.2 Výroba litých vzorků	28
5.1.3 Značení vzorků mechanických zkoušek	29
5.2 Souhrnný seznam vyrobených vzorků pro mechanické vlastnosti	30
5.3 Výstupy mechanických zkoušek.....	32
5.3.1 Zkouška tahem za pokojové teploty ČSN EN ISO 6892-1	32
5.3.2 Zkouška tahem za zvýšené teploty ČSN ISO EN 6892-2	33

5.3.3	Zkouška pevnosti při tečení dle ČSN ISO 204	34
5.4	Úprava tiskových parametrů pro výrobu sady vzorků s 60 μm výškou vrstvy.....	36
5.4.1	Zkouška tahem za pokojové teploty ČSN EN ISO 6892-1 (60 μm)	37
5.4.2	Zkouška tahem za zvýšené teploty ČSN EN ISO 6892-2 (60 μm)	37
5.4.3	Zkouška pevnosti při tečení dle ČSN ISO 204 (60 μm).....	37
5.4.4	Anizotropie mechanických vlastností tisknutých vzorků (60 μm).....	38
5.4.5	Závislost výstupů mechanických zkoušek na teplotě	39
5.5	Zpracování výstupů mechanických zkoušek.....	40
6	MATERIÁLOVÉ ROZBORY	44
6.1	Chemické složení	44
6.2	Makrostruktura materiálu.....	45
6.3	Mikrostruktura materiálu	46
6.4	Analýza prvkového složení pomocí analýzy EDX	55
6.5	Mikročistota materiálu	56
6.6	Fraktografická analýza lomových ploch	57
6.6.1	Tisknuté vzorky po tahové zkoušce za pokojové teploty (HT-P, HIP-P).....	57
6.6.2	Lité vzorky po tahové zkoušce za pokojové teploty (HT-C, HIP-C)	59
6.6.3	Litý a tisknutý vzorek po tahové zkoušce za zvýšené teploty (HT-C, HT-P).....	60
6.6.4	Lité vzorky po zkoušce pevnosti při tečení (HT-C)	62
6.6.5	Tisknutý vzorek po zkoušce pevnosti při tečení (HT-P)	64
7	VÝROBA A TESTOVÁNÍ OBĚŽNÉHO KOLA TURBÍNY S5L	65
7.1	Konstrukční část projektu	65
7.2	Výroba oběžného kola.....	66
7.3	Geometrické skenování oběžného kola.....	66
7.4	Struktura povrchu tisknutého oběžného axiálního kola.....	68
7.5	Testování kola v reálné aplikaci.....	71
7.5.1	Příprava oběžného kola.....	71
7.5.2	Testování aditivně vyrobeného oběžného kola v turbíně motoru.....	72
7.5.3	Očekávané výstupy zkoušek v reálné aplikaci	72
	ZÁVĚR	73
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	76
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	80
	SEZNAM PŘÍLOH.....	81

ÚVOD

Vývoj nových výrobků a jejich zavádění na trh se stal synonymem pro úspěšný podnik 21. století. Flexibilně reagovat na neustále se měnící požadavky ze strany zákazníků a dokázat svoje produkty dostatečně rychle personalizovat, se stává čím dál větší překážkou pro velkou řadu strojírenských firem. Tento trend je možné pozorovat obzvláště v oblasti letecké techniky, která byla v posledních letech významně ovlivněna zejména rozvojem aditivní technologie. Dříve nevyrobitelné konstrukce tak díky rychlému vývoji 3D tisku mohou čím dál častěji vystupovat z počítačového prostředí ve formě prototypů či nahrazovat některé konvenčně vyráběné díly. Neustále zvyšující se tlak ze strany zákazníků na nové, výkonnější a úspornější turbínové motory vede jejich výrobce ke stále většímu apelu na ještě rychlejší implementaci nově vyvinutých koncepcí a poznatků z výzkumu a vývoje. Jednou z možností, jak tento cíl naplnit, by mohlo být využití aditivní technologie v produkčním procesu prototypů nebo jako výrobní technologie některých konvenčních produktů.

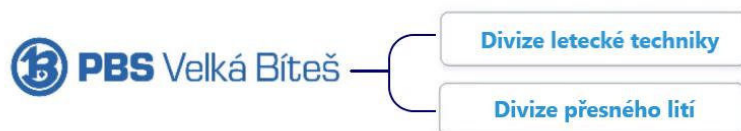
Vyzrállost dnešních aditivních technologií ukazuje i možnost tisknout velmi těžce zpracovatelné materiály, jako jsou niklové a kobaltové superslitiny. Konvenční zpracování těchto slitin probíhá zpravidla technologií přesného lití v kombinaci s následným obrobením. Standardní proces výroby prototypů touto technologií zahrnuje zdlouhavý a nákladný vývoj technologických parametrů a časově náročnou výrobu. Přesto se jedná v dnešní době o zpravidla jediný ověřený způsob výroby žárupevných komponent leteckého průmyslu.

Tato situace se však s pokrokem aditivních technologií postupně mění. Především díky certifikacím nových materiálů a metod 3D tisku dochází k výraznému rozšíření spektra jejich využití. V posledním desetiletí se celé řadě sléváren již podařilo úspěšně implementovat progresivní metody 3D tisku slévárenských modelů, nejčastěji z polymerních materiálů a vosku, které jim výrazně napomohly zkrátit standardní dodací doby prvních funkčních prototypů.

Ve společnosti PBS Velká Bíteš a. s. vyústil tento trend v zahájení testování progresivních metod kovové aditivní technologie za účelem výroby hotových prototypů komponent turbínových motorů. Při zvládnutí této technologie by došlo k výraznému zkrácení dodacích termínů testovacích prototypů pro zákazníky, stejně jako k uvolnění vývojových a výrobních kapacit slévárny.

1 PŘEDSTAVENÍ SPOLEČNOSTI

Společnost PBS Velká Bíteš a. s. disponuje dvěma hlavními výrobními divizemi. Divizí přesného lití, která patří mezi přední evropské dodavatele odlitků ze žárupevných materiálů, a divizí letecké techniky, která se řadí mezi celosvětově renomované výrobce pohonných jednotek a zařízení leteckého průmyslu (obr. 1) [1].



Obr. 1 Schéma společnosti PBS Velká Bíteš a. s.

1.1 Divize přesného lití

Provoz slévárny byl zahájen v roce 1969 jako výroba odlitků technologií přesného lití. Aktuálně divize disponuje šesti vakuovými pecemi o maximální vsázce až 68 kg a je primárně orientována na odlitky ze žárupevných materiálů. V novém tisíciletí proběhly významné investice do výrobních zařízení, které otevřely nové možnosti pro rozšíření výrobního portfolia společnosti, které lze aktuálně rozdělit na tři hlavní kategorie. Energetický průmysl v čele s lopatkami a segmenty plynových turbín, odlitky radiálních a axiálních kol turbodmychadel a komponenty pro letecký průmysl. Část portfolia společnosti tvoří i biokompatibilní odlitky určené pro lékařství. Příklady odlitků jsou uvedeny na obr. 2 až obr. 4. [1; 2]



Obr. 2 Oběžné turbínové lopatky.



Obr. 3 Statorový segment turbíny.



Obr. 4 Radiální kolo turbodmychadla.

1.2 Divize letecké techniky

Prvním výrobkem společnosti pro letecký průmysl byl startér motoru AI-25 W pro cvičný letoun L-39, jehož výroba začala v roce 1967. V roce 1973 začala společnost samostatný vývoj pomocných energetických jednotek, po kterých následoval vývoj vlastních pohonných jednotek. V roce 2019 společnost oslavila jubileum v podobě tisícové dodané pomocné energetické jednotky S5K/G MI. V tomtéž roce společnost zaznamenala další velký úspěch v podobě 1000. prodaného kusu svého nejúspěšnějšího proudového motoru TJ 100. Během stejného roku se společnosti také podařilo úspěšně uvést na trh dva nové typy proudových motorů vlastní konstrukce, TJ 80 a TJ 150. [2].

2 VÝBĚR APLIKACE

Při volbě aplikace pro implementaci aditivně zpracované niklové superslitiny byl konečný výběr zúžen na dvě kategorie produktů z portfolia divize letecké techniky. Jednalo se o kategorie proudových motorů a pomocných energetických jednotek. Oba typy zařízení jsou využívány v leteckém průmyslu a obsahují velkou část komponent, které jsou vyráběny ze žárupevných niklových superslitin.

2.1 Proudové motory

Proudový motor je jeden z nejkompexnějších pohonných mechanismů využívaný v letectví. Jeho koncepce vzniku tahu byla adaptována do nespočtu konstrukčních řešení a modifikací. Od nejjednodušších náporových motorů, využívaných již za druhé světové války (obr. 5), až po velmi důmyslné dvouproudé pohonné jednotky s tříhřídelovou konstrukcí dnešních moderních letadel (obr. 6). Všechny tyto motory však pracují na stejném základním principu vycházejícím z třetího Newtonova zákona akce a reakce [2; 3].



Obr. 5 Využití proudového pulzačního motoru pro pohon raket V1 v druhé světové válce [4].



Obr. 6 Moderní proudový motor LEAP konstrukce General Electric [5].

Popis funkce

V přední části motoru se nachází vstupní úsek, který slouží ke vstupu vzduchu do vnitřní části motoru. U komplexnějších konstrukcí je vzduch následně nasáván do kompresoru, který jej stlačuje a snižuje jeho měrný objem. Stlačený vzduch putuje do spalovací komory, kde je do něj vstříknuto palivo. Po zažehnutí směsi dojde k uvolnění velkého množství tepelné energie a k prudkému zvětšení objemu procházejících plynů. Za spalovací komorou se nachází turbína, která pomocí axiální hřídele pohání kompresor v přední části motoru. Ve výstupní trysce je přeměňována entalpie spalin na potřebnou kinetickou energii. Výsledný tah motoru je pak dán právě velikostí kinetické energie výstupních spalin motoru. [3; 6]

Portfolio proudových motorů společnosti PBS Velká Bíteš a. s.

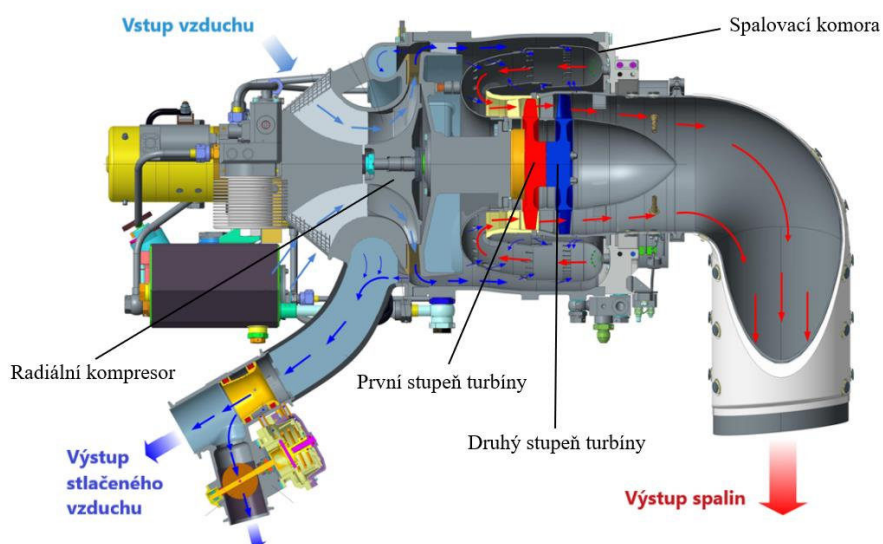
Společnost PBS Velká Bíteš a. s. disponuje širokým spektrem proudových motorů od výkonu 230 N a hmotností pod 2 kg až po motory určené pro pohon bezpilotních prostředků a dronů s výkonem dosahující nominálního výkonu až 1500 N. Vybraní zástupci z portfolia proudových motorů jsou uvedeny na obr. 7 [2].



Obr. 7 Produktová řada motorů společnosti PBS Velká Bíteš a. s. [7].

2.2 Pomocné energetické jednotky

Jednou z koncepcí, kde je využíváno podobného principu jako u proudových motorů, jsou pomocné energetické jednotky (PEJ). Konstrukčně se PEJ od proudových motorů liší především formou výstupního výkonu. Hlavním cílem není generování tahu, ale využití co největšího množství energie, vytvořené spalováním paliva, pro pohon turbíny. Část přenesené energie je spotřebována kompresorem, zbytek slouží k pohánění dalších přídatných zařízení na výstupní hřídeli. Příkladem mohou být generátory elektrické energie, či hydraulická čerpadla. Hlavní funkcí PEJ je ve většině případů startování hlavních motorů letounů a vrtulníků, a to pomocí dodávky elektrické, nebo přímo stlačeného vzduchu odebraného z kompresoru PEJ. Tuto funkci může PEJ zastávat kromě předletové přípravy i v případně vypnutí nebo poruše hlavních motorů během letu. Mezi další funkce patří například i zásobování palubních systémů elektrickou energií. Důležitým požadavkem při konstrukci pomocných energetických jednotek je jejich spolehlivost a nízké nároky na údržbu. Schéma pomocné energetické jednotky S5L je uvedeno na obr. 8 [2; 8; 9].



Obr. 8 Schéma pomocné energetické jednotky S5L podle [10].

Standardně bývají tato zařízení umísťována v zadních částech letadel, u vrtulníků bývají skryta pod rotorem hlavní vrtule (obr. 9).



Obr. 9 Zástavba PEJ Safir 5K/G MI ve vrtulníku MI 8/17 podle [2; 11].

Portfolio PEJ společnosti PBS Velká Bíteš a. s.

Společnost PBS Velká Bíteš a. s. disponuje pomocnými energetickými jednotkami, které jsou schopny pokrýt požadavky od dodávky stlačeného vzduchu až po zásobování paluby elektrickou energií. Společnost uvedla na trh již čtvrtou pomocnou energetickou jednotku. Standardně jsou PEJ schopny pracovat až do výšky 6 000 metrů nad mořem, v omezeném provozu do 2 hodin až do výšky 8 000 metrů. Mezi vybavení patří i rozsáhlé příslušenství umožňující dlouhodobou i momentální diagnostiku – příkladem je nepřetržitá kontrola teploty výfukových plynů, otáček či kontrola stavu paliva, oleje a olejového filtru. Jako zástupce portfolia společnosti byla vybrána pomocná energetická jednotka S5L (obr. 10) [2].

PEJ S5L

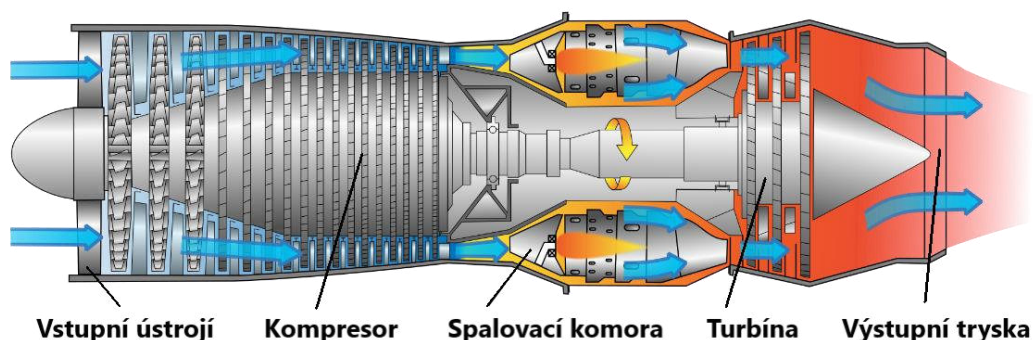
S5L je zástupce produktové řady pomocných energetických jednotek určených především k dodávce stlačeného vzduchu pro startování hlavních motorů letounu. Hlavní důraz při konstrukci této jednotky byl kladen na její snadnou údržbu, ekologický provoz a dlouhou životnost. Jedná se o zástupce z výrobní řady pomocných energetických jednotek společnosti PBS Velká Bíteš a. s., který v sobě kloubí vysoké množství dodávaného tlakového vzduchu pro start motorů (≥ 32 kg/min), malé rozměry a nízkou hmotnost (≤ 42 kg). Celkem již bylo společností PBS Velká Bíteš a. s. vyrobeno a odesláno zákazníkům z celého světa více než 5 000 kusů PEJ v různých modifikacích [2].



Obr. 10 Pomocná energetická jednotka S5L [2].

2.3 Konstrukce turbínového motoru

I přes rozdílné primární funkce využívají proudové motory a pomocné energetické jednotky k transformaci energie podobného konstrukčního řešení, takzvaného turbínového motoru. Jeho princip je založen na zapojení kompresoru, který ve spolupráci s difuzorem zásobuje spalovací komoru vzduchem o zvýšené měrné hustotě a tlaku. Za těchto podmínek může docházet k efektivnějšímu spalování paliva a je také umožněno dosahovat mnohem stabilnějšího provozu a vyšších výkonů než u klasické konstrukce náporových motorů. Za spalovací komorou se nachází rozvaděč, který se stará o přeměnu tlaku spalin na kinetickou energii. Na výstupu z rozvaděče se tak nacházejí spaliny s vysokou kinetickou energií. Ty jsou dále nasměrovány na lopatky axiálního oběžného kola turbíny. Díky interakci usměrněných spalin a specifické geometrie lopatek turbínového oběžného kola dochází k přeměně velké části kinetické energie na technickou práci, potřebnou pro pohon kompresoru. Ten je poháněn propojením oběžného kola turbíny pomocí axiálního hřídele. Schéma proudového motoru je uvedeno na obr. 11 [3; 6].

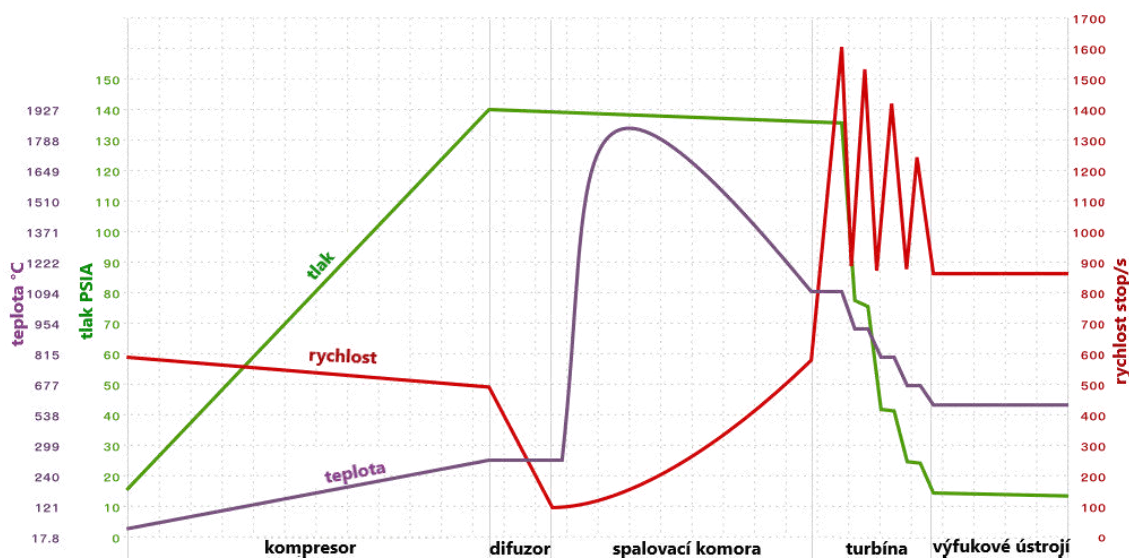


Obr. 11 Schéma proudového motoru podle [12].

Jedním z parametrů turbínového motoru, který je nutné respektovat i při jeho návrhu, je provozní tepelné zatížení. To má rozhodující vliv na konečnou konstrukci jednotlivých komponent a je klíčové pro výběr vhodných materiálů [3; 6].

K prvnímu teplotnímu zvýšení dochází již v kompresoru, kdy je kinetická energie předaná vzduchu difuzory přeměňována na tlak. Při zvyšování tlaku konvergentními lopatkami difuzoru dochází k přeměně značné části energie na teplo. To se projeví zvýšením teploty vzduchu vycházejícího z kompresorové části motoru, kde může teplota dosahovat až do 550 °C [3; 6].

Stlačený a zahřátý vzduch putuje do spalovací komory, kde je obohacen o palivo. Po zažehnutí může teplota plamene u určitých konstrukcí přesahovat i 1 900 °C. Spaliny jsou před vstupem do turbíny ochlazovány sekundárním vzduchem, který se neúčastnil hoření, a to na teplotu mezi 850 až 1 700 °C (dle konstrukce motoru). Takto ochlazené spaliny jsou nadále urychlovány přes rozváděcí kolo turbíny. Po předání dostatečného množství energie oběžnému kolu turbíny jsou spaliny při výstupu z motoru opět urychlovány výstupní konvergentní tryskou [3; 6].

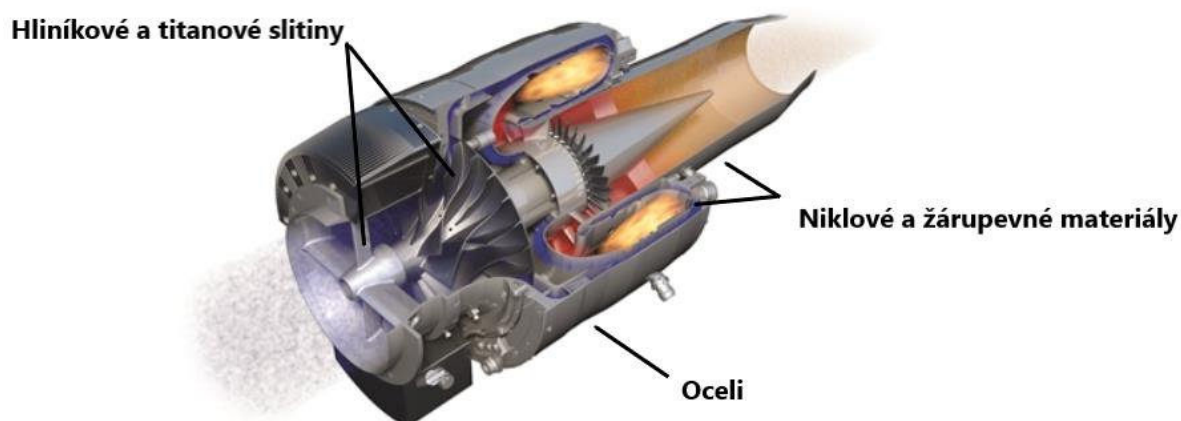


Obr. 12 Teplotní zatížení turbínového motoru podle [13].

Z uvedeného teplotního zatížení motoru v obr. 12 je patrné, že materiály v jeho jednotlivých částech musí pracovat za velmi rozdílných provozních teplot. Od teploty okolí ve vstupním ústrojí, až po teploty spalin dosahující až 1 800 °C. V portfoliu použitých materiálů se tak vyskytují kromě standardních hliníkových slitin a ocelí i slitiny titanu a niklu. Pro nejvíce tepelně exponované komponenty jsou využívány superslitiny na bázi niklu, titanové slitiny pak nacházejí uplatnění v kompresorech a nízkotlakých turbínách. Přehled standardně používaných materiálů turbínových motorů byly zpracovány v tab. 1 a jejich znázornění v zástavbě proudového motoru na obr. 13 [3; 6].

Tab. 1 Materiály využívané v turbínových motorech.

Druh materiálu	Nejčastější možné použití
Oceli	Rámy a skříně, nízkotlaké turbíny, konstrukční prvky
Hliníkové slitiny	Kompresorové komponenty, konstrukční prvky
Titanové slitiny	Nízkotlaké turbíny, kompresory
Žárupevné slitiny	Tepelně exponované součásti, turbíny, tepelné štíty



Obr. 13 Řez motorem TJ100 se zastoupením jednotlivých materiálů podle [2].

3 KOVOVÉ ADITIVNÍ TECHNOLOGIE VE VÝROBĚ TURBÍNOVÝCH MOTORŮ

Velký rozmach zaznamenaly v posledních letech aditivní technologie především v oblasti zpracování niklových a titanových slitin. Velkým průkopníkem v této oblasti je americká společnost General Electric (GE). Jednou z prvních sériově vyráběných součástí, využitých v produkci proudových motorů, byla palivová tryska společnosti GE, zobrazena na obr. 14, která v roce 2018 dosáhla na milník v podobě 3 000 vyrobené komponenty. Jedná se o revoluční příklad využití aditivní technologie, který ukázal, jakým způsobem mohou tyto progresivní technologie šetřit pracovní sílu a celkové náklady. V současnosti již proběhla úspěšná zástavba těchto trysek do motorů využívaných v letounech společnosti Boeing a Airbus. Společnost GE také aktuálně testuje svůj dosavadní největší motor GE9X, který obsahuje na více než 300 tisknutých součástí. Mezi ně patří i tisknuté lopatky nízkotlakého kompresoru vyrobené z titanových slitin pomocí aditivní metody EBM (obr. 15). I díky nim dokázal motor předčít svého předchůdce, motor GE90, snížením spotřeby paliva až o 10 %. Jedná se velmi zásadní úspory vzhledem k tomu, že spotřebované palivo tvoří přibližně 19 % celkových provozních nákladů aerolinií. Kovová aditivní technologie našla také uplatnění v kompresorech proudových motorů, kde je společností GE používána pro výrobu pouzder teplotních čidel (obr. 16). Tento díl dostal také jako první certifikaci pro použití v leteckém průmyslu od úřadu federální letecké správy v USA (Federal Aviation Administration) [1; 14; 15; 16].



Obr. 14 Palivová tryska proudového motoru společnosti General Electric [17].



Obr. 15 Turbínové lopatky největšího proudového motoru na světě GE9X společnosti General Electric [18].

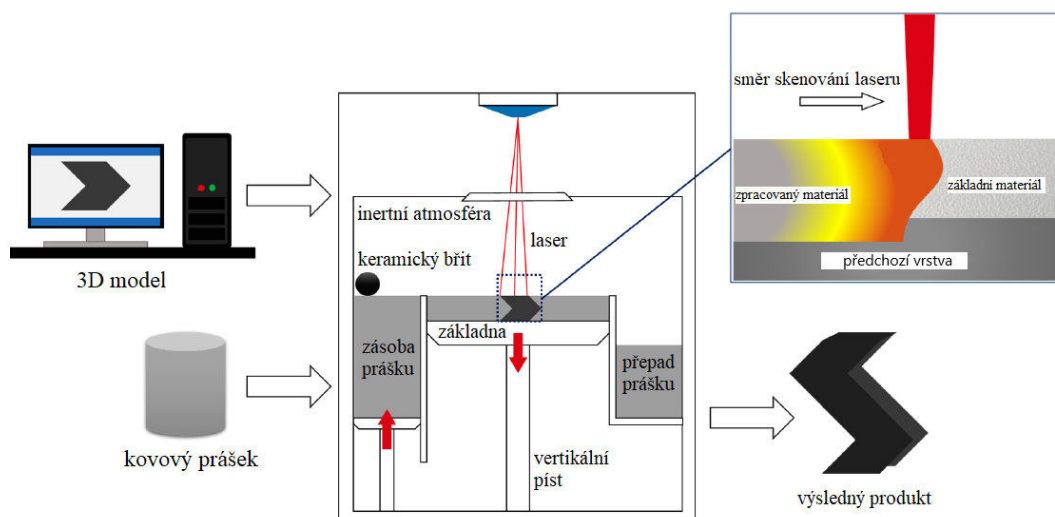


Obr. 16 Pozdro pro teplotní čidlo kompresoru proudového motoru společnosti General Electric [16].

3.1 Princip kovové aditivní technologie

Proces aditivní výroby lze rozdělit na tři základní fáze. Pre-processing zaměřený na přípravu modelů a nastavení parametru výrobního procesu. Operační systémy pracují standardně s formátem „*.STL“, ten je možné získat konvertováním původních modelů pomocí integrované funkce běžných modelovacích programů, jako je Inventor společnosti Autodesk. Po nahrání je model rozdělen na jednotlivé vrstvy, které představují jeden pracovní krok stroje. Ten je složen ze snížení tiskové platformy, zarovnání práškové vrstvy pomocí keramického břítu a průjezdu laseru v pracovní komoře. Výška jednotlivých vrstev se pohybuje v rozmezí od 10 do 75 μm . Po nastavení všech potřebných parametrů procesu následuje samotná fáze Processingu, tedy výroby dílu. Aby se zamezilo případné reakci

tavné lázně s okolní atmosférou, probíhá tavný proces standardně v komoře vyplněné argonem či dusíkem. Tím se omezuje tvorba nežádoucích struktur uvnitř tisknutého materiálu, jako jsou například oxidy. Tyto struktury mohou mít velmi negativní dopad na konečné mechanické vlastnosti materiálu a je tedy nutné jejich tvorbu co nejvíce omezit. Po dosažení požadované čistoty atmosféry je prvním krokem snížení tiskové platformy pomocí vertikálního pístu. Ten tiskovou platformu posouvá vždy o jednu výšku vrstvy. Ze zásobníku je následně doplněno potřebné množství prášku k zaplnění vzniklého prostoru. Nový prášek je rovnoměrně rozprostřen ramenem s keramickým břitem po tiskové ploše. Po dokončení přípravné fáze je zahájen samotný proces tisku. Je aktivován zdroj tepelné energie (v případě metody SLM se jedná o laser), který dle přednastavené strategie provádí tavení kovového prášku. Nejprve dochází ke spékání kontury celé vrstvy následované vnitřními plochami. Po dokončení vrstvy je tisková platforma opět snížena a proces se opakuje, dokud nedojde k dokončení celého modelu. Jakmile je celý proces hotový dostává se výrobní proces do poslední fáze zvané Post-processing. Jedná se o odstranění nevyužitého prášku z komory, odříznutí modelů z tiskové platformy a případné odstranění podpor. Modely jsou následně tryskány pískem, či korundem pro očištění nespečených částic prášku z vnější strany modelu a homogenizaci vnějšího povrchu. Proces výroby součásti je zobrazen na obr. 17 [1; 19; 20].



Obr. 17 Schéma výroby modelu technologií SLM podle [1; 21].

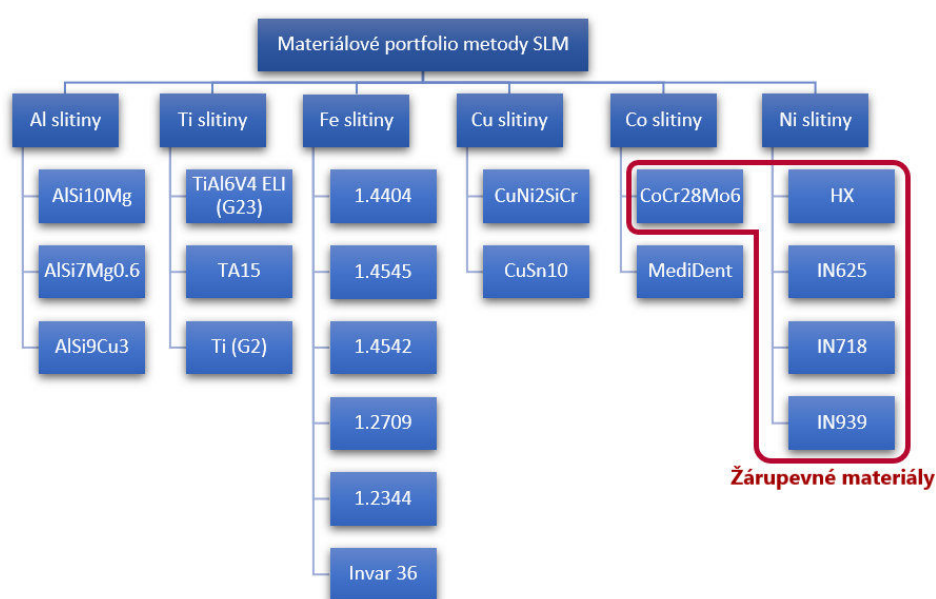
3.2 Selective Laser Melting

Normou ISO/ASTM 52900 je metoda SLM zařazena mezi metody využívající spékání práškové vrstvy (Powder Bed Fusion). Do této kategorie spolu se SLM patří i další metody jako Direct Metal Laser Sintering (DMLS) či Electron Beam Melting (EBM), které byly již blíže popsány v bakalářské práci (dle zdroje 1). Na rozdíl od technologie DMLS zde dochází výkonným laserem k úplnému roztavení částic kovového prášku. Výsledkem je tak pevný díl s vysokou hustotou, která se pohybuje až nad hranicí 99,5 %. Pro porovnání, standardně dosahovaná porozita litého materiálu se pohybuje až do 3 %. Úplné roztavení kovového prášku však vyžaduje velké množství tepelné energie. Pro tyto účely tisku jsou v zařízeních SLM využívány lasery o společném výkonu až 2800 W (700 W připadající na každý z celkem čtyř laserů). Takto velké množství tepelné energie potřebné k úplnému

roztavení kovového prášku s sebou nese i určité nevýhody. Ta hlavní spočívá ve vytvoření vysokého teplotního gradientu během tisku, který po ukončení výrobního procesu zanechává v součásti značné zbytkové napětí. Pro většinu aplikací je z tohoto důvodu nutné počítat se zařazením určité formy tepelného zpracování do výrobního procesu, což se negativně projevuje na konečné ceně součásti. Velkou výhodou této metody je však schopnost zpracovávat i žárupevné niklové superslitiny [1; 22; 23; 24].

3.3 Použité materiály technologie SLM

V materiálovém portfoliu standardně zpracovávaných materiálů metodou SLM se nachází materiály od hliníkových slitin, přes korozivzdorné oceli, až po těžce zpracovatelné materiály jako jsou slitiny na bázi niklu či titanu. Na obr. 18 je uveden seznam superslitin, které byly vyvinuty pro použití v žárupevných aplikacích [1; 25].



Obr. 18 Hierarchie použitých materiálů SLM [25].

CoCr28Mo6

Slitina kobaltu, chromu a molybdenu s všestranným použitím. Materiál vyniká svojí biokompatibilitou a je hojně využíván v lékařském průmyslu pro výrobu implantátů a protéz. Tato kobaltová slitina je také používána pro výrobu některých komponent v žárupevných aplikacích proudových motorů. Chemické složení bylo uvedeno do tab. 2 [1; 25].

Tab. 2 Chemické složení materiálu CoCr28Mo6 [hm. %] [25].

Materiál: CoCr28Mo6														
Co	Cr	Mo	Mn	Si	Fe	Ni	C	Al	B	N	P	S	W	Ti
Bal.	27,00 – 30,00	5,00 – 7,00	1,00	1,00	0,75	0,50	0,35	0,10	0,01	0,25	0,02	0,01	0,20	0,10

HX

Prvním zástupcem z portfolia žárupevných materiálů na bázi niklu je superslitina s vyšším obsahem chromu, molybdenu a železa zvaná HX. Hlavní předností slitiny je pevnost až do teploty 1200 °C, díky které našla uplatnění v nejrůznějších komponentech spalovacích komor či přídavného spalování. Svoje místo našla také v jaderném průmyslu, při výrobě plynových turbín, či průmyslových pecí. Chemické složení bylo uvedeno do tab. 3 [1; 25; 26].

Tab. 3 Chemické složení materiálu HX [hm. %] [25].

Materiál: HX										
Ni	Cr	Co	Mo	Fe	W	C	Mn	P	S	Si
Bal.	20,50 – 23,0	0,5 -2,5	8 – 10	17 – 20	0,2 - 1	0,05 – 0,15	1,00	0,04	0,03	1,00

IN 625

Precipitačně vytvrzená niklová slitina s výbornou odolností proti creepu až do teploty 700 °C. IN 625 našla uplatnění v oblasti leteckých motorů a je využívána až do teploty 650 °C. Chemické složení bylo uvedeno do tab. 4 [1; 25; 27].

Tab. 4 Chemické složení materiálu IN 625 [hm. %] [25].

Materiál: IN 625												
Ni	Cr	Co	Mo	Al	Fe	Ti	Nb	C	Mn	P	S	Si
Bal.	20 – 23	1	8-10	0,4	5	0,4	3,15 – 4,15	0,1	0,5	0,015	0,015	0,5

IN 718

Niklová superslitina, která je určena k tepelnému zpracování. Po precipitačním vytvrzení je využívána pro aplikace s tepelným zatížením od -252 do 700 °C. Díky své schopnosti odolávat nízkým teplotám našla uplatnění při výrobě komponent chladicích a kryogenních zařízení. Z žárupevných aplikací lze zmínit součásti plynových turbín a raket na kapalná paliva. Chemické složení této slitiny je uvedeno v tab. 5 [1; 25].

Tab. 5 Chemické složení materiálu IN 718 [hm. %] [25; 28].

Materiál: IN 718														
Ni	Cr	Co	Mo	Al	Fe	Ti	Nb+Ta	C	B	Cu	Mn	P	S	Si
50 – 55	17 – 21	1	2,8 – 3,3	0,2 – 0,8	Bal.	0,65 – 1,15	4,75 – 5,50	0,08	0,006	0,3	0,35	0,015	0,015	0,35

IN 939

Materiál IN 939 patří mezi materiály využívané při konstrukci turbodmychadel a lopatek plynových turbín. Z řady niklových superslitin zpracovávaných technologií SLM patří IN 939 mezi materiály s nejnižší degradací mechanických vlastností při zvýšených teplotách. Chemické složení bylo uvedeno do tab. 6 [1; 25; 29].

Tab. 6 Chemické složení materiálu IN 939 [hm. %] [25].

Materiál: IN 939												
Ni	Cr	Co	Al	Ti	W	Nb	Ta	C	Zr	Mn	Si	
Bal.	22,0 – 23,0	18 – 20	1,0 – 3,0	3,0 – 4,5	1,0 – 3,0	0,5 – 1,5	1,0 – 1,8	0,15	0,10	0,50	0,50	

Následující kapitola 3.4 je věnována podrobnějšímu rozboru materiálu IN 939.

3.4 Vlastnosti materiálu IN939

Výrobce technologie zvolené pro výrobu prototypu oběžného kola poskytuje základní údaje o mechanických a fyzikálních vlastnostech materiálu. Většina dat je poskytována pro dvě varianty rozlišení tisku, pro 30 a 50 μm výšku vrstvy. Všechny poskytované fyzikální vlastnosti jsou spolu se základními informacemi materiálu uvedeny v tab. 7. Kompletní materiálový list materiálu IN 939 byl uveden jako příloha 1 [25].

Tab. 7 Vlastnosti materiálu IN 939 [30].

	Výška vrstvy 30 μm	Výška vrstvy 50 μm
Hustota [g]	8,2	
Mikroporozita (homogennost)	>99,5 %	> 99,5 %
Rychlost stavby [cm^3/h]	9,1	16,4
Velikost částic prášku	10-45	10-45
Tvar částic prášku	Sférické	Sférické

Hustota materiálu uvedená pro 30 mikrometrovou vrstvu, může dle dodavatele prášku mírně variovat na základě tolerancí v chemickém složení. Mikroporozita udávaná výrobcem v tab. 7 byla vyhodnocována pomocí světelné mikroskopie. Rychlost stavby byla vypočtena výrobcem zařízení na základě vztahu mezi obecnými parametry tisku jako jsou výška vrstvy a skenovací rychlost. Jedná se tedy o teoretickou hodnotu, která slouží především pro zpřesnění odhadované doby tisku. U mechanických vlastností udává výrobce konkrétně výstupy z tahových zkoušek za pokojové a zvýšené teploty spolu se zkouškou tvrdosti HV10 pro materiál v tisknutém (*as built*) i tepelně zpracovaném stavu. Uvedeny jsou také mechanické vlastnosti v kombinaci tepelného zpracování a HIP (Hot Isostatic Pressuring). Garantované mechanické vlastnosti IN 939 výrobcem byly zaneseny do tab. 8 až tab. 11. Kompletní materiálový list IN 939 byl zahrnut také do přílohy práce [30].

Tab. 8 Mechanické vlastnosti IN 939 v as-built stavu pro výšku vrstvy 30 μm [30].

IN939 v as-built stavu pro 30 μm		
Mechanické vlastnosti	Označení a jednotky	Hodnota
Mez pevnosti	Rm [MPa]	1009 \pm 35
Mez kluzu	Rp0,2 [MPa]	735 \pm 41
Tažnost	A [%]	30 \pm 5
Kontakce	Z [%]	45 \pm 7
Modul pružnosti	E [GPa]	177 \pm 8
Tvrdość HV	[HV10]	302 \pm 3

Tab. 9 Mechanické vlastnosti IN 939 v as-built stavu pro výšku vrstvy 50 μm [30].

IN939 v as-built stavu pro 50 μm		
Mechanické vlastnosti	Označení a jednotky	Hodnota
Mez pevnosti	Rm [MPa]	928 \pm 72
Mez kluzu	Rp0,2 [MPa]	633 \pm 33
Tažnost	A [%]	23 \pm 10
Kontakce	Z [%]	28 \pm 9
Modul pružnosti	E [GPa]	156 \pm 12
Tvrdość HV	[HV10]	305 \pm 7

Tab. 10 Mechanické vlastnosti materiálu IN 939 po tepelném zpracování (30 μm) [30].

IN939 tepelně zpracován dle Tab. 12 (30 μm)		
Mechanické vlastnosti	Označení a jednotky	Hodnota
Mez pevnosti	Rm [MPa]	1247 \pm 76
Mez kluzu	Rp0,2 [MPa]	749 \pm 21
Tažnost	A [%]	13 \pm 5
Kontakce	Z [%]	12 \pm 3
Modul pružnosti	E [GPa]	201 \pm 3

Tab. 11 Mechanické vlastnosti materiálu IN 939 po tepelném zpracování a HIP (30 μm) [30].

IN939 tepelně zpracován dle tab. Tab. 12 v kombinaci s HIP (30 μm)		
Mechanické vlastnosti	Označení a jednotky	Hodnota
Mez pevnosti	Rm [MPa]	1348 \pm 57
Mez kluzu	Rp0,2 [MPa]	957 \pm 18
Tažnost	A [%]	11 \pm 5
Kontakce	Z [%]	12 \pm 2
Modul pružnosti	E [GPa]	156 \pm 6

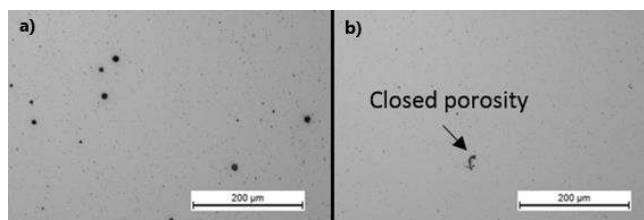
Z uvedených výstupů lze pozorovat závislost mezi výstupy z mechanických zkoušek a parametry tisku, příkladem je výška vrstvy. Významný vliv na konečné mechanické vlastnosti materiálu má i jeho tepelné zpracování. Uváděné mechanické vlastnosti jsou garantovány výrobcem prášku a jsou poskytovány se základními údaji o jejich tepelném zpracování.

3.5 Tepelné zpracování materiálu IN 939

Postup prováděného tepelného zpracování byl závislý na technologii výroby polotovarů. Pro vzorky vyrobené metodou SLM byl dodržen postup předepsaný dodavatelem. Pro tepelné zpracování vzorků vyrobených technologií přesného lití byl proveden postup, jakým jsou zpracovávány vzorky pro verifikace zkušebních taveb IN 939 ve společnosti PBS Velká Bíteš a. s. V rámci projektu byla do tepelného zpracování některých vzorků zařazena i operace HIP.

HIP (Hot Isostatic Pressuring)

Tepelné zpracování kombinující teplotu až 2000 °C s tlakem o velikosti až 2070 barů vede při správném nastavení parametrů k eliminaci pórů v materiálu a přeměně některých nežádoucích struktur, jako jsou oxidy, nitridy a některé formy karbidů. Díky tomu je možné docílit zvýšení tažnosti a únavové odolnosti materiálu. Současně také dochází ke zvýšení hustoty zpracovávaného materiálu. Příklad změny mikroporozity zařazením procesu HIP do tepelného zpracování je uvedeno na obr. 19 [31].



Obr. 19 Mikroporozita materiálu AM 17-4 PH [32]: a) Před hipování, b) po hipování.

Doporučené tepelné zpracování tisknutého materiálu

Materiálový list IN 939 (příloha 1) uvádí následující parametry tepelného zpracování:

Tepelné zpracování

1107 °C/2 h + chlazení o 3 °C/min na 899 °C + 913 °C/8 h + 982 °C/6 h + 802 °C/4 h

Tepelné zpracování v kombinaci s HIP

1107 °C/2 h + chlazení o 3 °C/min na 899 °C + 913 °C/8 h + 982 °C/6 h + 802 °C/4 h + HIP

Tepelné zpracování uváděné výrobcem v materiálovém listu bylo velmi zevrubné. Na základě požadavku byl od společnosti SLM Solutions Group AG poskytnut i podrobný popis doporučeného tepelného zpracování materiálu IN939 doplněný o přesné parametry procesu HIP [30].

3.5.1 Tepelné zpracování tisknutých vzorků IN939

Pro tepelné zpracování tisknutých vzorků byl využit doporučený postup tepelného zpracování pro materiál Inconel 939 od dodavatelem.

Parametry procesu HIP pro tisknuté vzorky

HIP při teplotě 1200 °C a tlaku 1000 barů po dobu 4 hod.

Základní uvolňovací tepelné zušlechtní

Rychlé zahřátí na 1107 °C ve vakuové peci, udržení teploty po dobu 2 hodin, dále pomalé chlazení 3 °C/min na 899 °C. Po dosažení 899 °C rychlé zchlazení pomocí Ar na pokojovou teplotu.

Následné vytvrzování ve 3 krocích:

Rychlé zahřátí na 913 °C ve vakuu po dobu 8 h a rychlé zchlazení pomocí argonu na PT.
 Rychlé zahřátí na 982 °C ve vakuu po dobu 6 h a rychlé zchlazení pomocí argonu na PT.
 Rychlé zahřátí na 803 °C ve vakuu po dobu 4 h a rychlé zchlazení pomocí argonu na PT.

3.5.2 Tepelné zpracování litých vzorků z IN939

Pro tepelné zpracování litých vzorků byl využit standardizovaný postup tepelného zpracování pro materiál Inconel 939 společnosti PBS Velká Bíteš a. s. založený na homogenizaci s následným stárnutím. U části vzorků byla zařazena i operace HIP.

Parametry procesu HIP pro lité vzorky

HIP při teplotě 1205 ± 15 °C a tlaku 1035 ± 17 barů po dobu 4 hodin ± 15 minut v argonu o minimální čistotě 99,995 %.

Základní uvolňovací tepelné zušlechťení v kombinaci s vytvrzováním

Homogenizace při 1160 ± 15 °C po dobu 2 hodin s následnou rychlostí chladnutí 30 ± 10 °C za minutu na teplotu 700 °C s následným samovolným chlazením vzduchem. Následné stárnutí při 845 ± 15 °C po dobu 16 hodin s následným chlazením ventilátory.

Značení tepelných zpracování

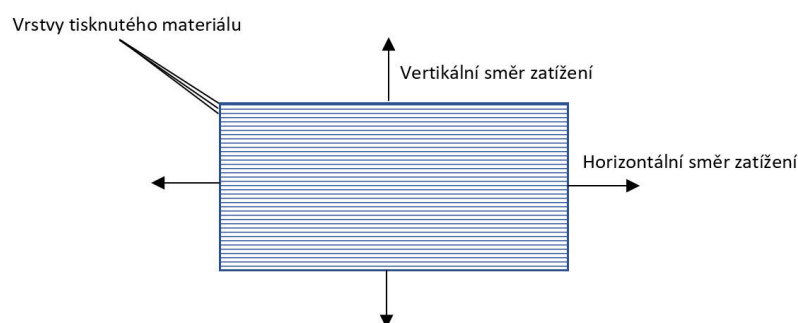
Pro lepší orientaci bylo jednotlivým tepelným procesům přiřazeno speciální označení dle tab. 12.

Tab. 12 Značení tepelného zpracování vzorků.

Tepelné zpracování litých vzorků	HT-C
Tepelné zpracování tisknutých vzorků	HT-P
Tepelné zpracování + HIP litých vzorků	HIP-C
Tepelné zpracování + HIP tisknutých vzorků	HIP-P

3.6 Anizotropie mechanických vlastností

Ze studií vyplývá závislost aditivně zpracovaného materiálu mezi mechanickými vlastnostmi a směrem zatížení. Nejvyšší rozdíl lze pozorovat mezi aplikovaní zatížení ve vertikálním a horizontálním směru (obr. 20). Materiál zatěžovaný ve vertikálním směru, kdy zatížení prochází skrz hranice jednotlivých vrstev, může dosahovat až o 20 až 30 % vyšších pevností, než je tomu v případě zatížení aplikovaném vertikálně. Při výběru a konstrukci dílů vyráběných aditivní metodou Powder Bed Fusion je nezbytné s těmito rozdíly počítat například při provádění simulací a pevnostních výpočtů. [33]



Obr. 20 Znáornění zatížení tisknutého materiálu.

4 VOLBA KOMPONENTY PRO IMPLEMENTACI KOVOVÉ ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

Pro konečnou implementaci aditivní technologie byla vybrána pomocná energetická jednotka S5L. Jedním z hlavních důvodů upřednostnění zařízení PEJ před proudovými motory byl jejich režim chodu. Přestože obě zařízení pracují na podobném principu, proudový motor slouží jako letecká pohonná jednotka. Pomocná energetická jednotka je využívána především ke startování hlavních motorů či pro zajištění některých provozních funkcí, jako je dodávka elektrické energie. Jak již z použití jednotlivých aplikací vyplývá, pomocná energetická jednotka pracuje v mnohem stabilnějších podmínkách a její doba chodu v případě startování hlavních motorů bývá v porovnání s dobou chodu pohonného motoru výrazně kratší. Zároveň se jedná o velmi dobře zavedenou a zvládnutou část portfolia společnosti PBS Velká Bíteš a. s., která se opírá o více než padesátileté zkušenosti z vlastního vývojového programu pomocných energetických jednotek. [2].

Mezi nejkomplexněji zatěžované součásti PEJ patří bezpochyby samotná turbína. Teplota až 905 °C působící na součásti za spalovací komorou v kombinaci s mechanickým zatížením jejich oběžných komponent z ní dělá nejvíce namáhanou část zařízení. Pro účel implementace kovové aditivní technologie do PEJ bylo, jakožto vhodný zástupce, vybráno oběžné axiální kolo turbíny PEJ S5L z portfolia společnosti PBS Velká Bíteš a. s. (obr. 21). Ověřením možného využití aditivních technologií pro zpracování niklové superslitiny IN 939 a zvládnutím výroby takto komplexní oběžné komponenty turbíny by došlo k otevření cesty pro implementaci 3D tisku do dalších částí turbíny [2].



Obr. 21 Integrální oběžné axiální kolo turbíny S5L.

4.1 Konvenční výroba oběžného kola

Standardní proces výroby oběžných kol technologií přesného lití zahrnuje zhotovení kovové formy určené pro vstřikovací lisy, kde dochází k vytvoření voskového modelu. Z jednotlivých modelů je sestaven stromeček, hlavní vtok obsahující vícero modelů. Následným krokem je vytvoření keramické skořepiny (obr. 22). Po jejím dostatečném vyschnutí následuje vytavení voskového modelu ze skořepiny, čímž dojde k vytvoření dutiny. Pomocí následného vyžihání se ze skořepiny odstraní případné zbytky vosku a skořepina získá konečnou pevnost. Před odléváním je skořepina opět zahřáta, standardně na teplotu 950 °C, aby se omezil teplotní rozdíl mezi tekutým kovem a skořepinou. Vhodný teplotní gradient patří mezi hlavní technologické parametry licího procesu. Jakmile dojde po odlití ve vakuové peci (obr. 23) k dostatečnému zchladnutí, jsou pomocí pneumatického kladiva v kombinaci s tryskáním korozivzdornými broky odstraněny zbytky skořepiny. Od očištěných odlitků jsou následně odřezány vtoky, které jsou ve výrobě přetavovány a dále recyklovány. Odlitky putují na kontrolní operace dle předepsaných podmínek. V sériové výrobě se jedná kromě ověřování mechanických vlastností z vybraných kusů i například o nedestruktivní testování jako je fluorescenční penetrační kontrola (FPI) či rentgenové testování (RTG) [1; 2].



Obr. 22 Robotizované pracoviště obalovny.



Obr. 23 Vakuová pec.

4.1.1 Využití progresivních metod v konvenční výrobě

Časově nejnáročnější část životního cyklu výrobku je jeho vývoj, proto se mnohdy při výrobě prototypů či kusové a malosériové výrobě využívá řada progresivních nových technologií, které mohou potřebný vývojový čas výrazně zkrátit.

Standardní doba výroby prototypu včetně vytvoření formy se může pohybovat v rozmezí od 80 až 120 dnů. Z tohoto času je vyhrazeno minimálně 60 dnů pro konstrukci a dodání formy, na samotnou výrobu oběžného kola připadá přibližně 35 dnů. Implementací 3D tisku, jako substitutu výroby modelů, odpadá nutnost výroby formy a celkový čas pro dodání hotového odlitku mnohdy nepřesahuje 40 dnů. V případě úspěšného zapojení kovového 3D tisku pro výrobu hotových prototypů se očekávaná doba dodání pohybuje mezi 2 až 5 dny.

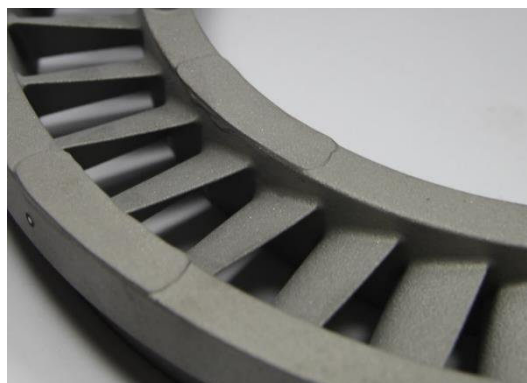
Divize přesného lití společnosti PBS Velká Bíteš a.s. již několik let pro výrobu modelů úspěšně využívá řadu aditivních technologií, které jí pomáhají snižovat vývojové časy a zkracovat dobu dodání prvních prototypů jejich zákazníkům. Využití aditivních technologií jako je Binder Jetting (BJ) či Fused Deposition Modeling (FDM) umožňují vytvoření modelů bez nutnosti výroby nákladné formy.

Binder Jetting

Jedná se o jednu z nejrozšířenějších aditivních technologií využívaných v technologii přesného lití. K vytvoření modelu je využíváno spojování práškového materiálu pomocí vytvrditelné kapaliny, která je nanášena vrstvu po vrstvě na tiskové lůžko s následným vytvrzením. Po snížení stavební plochy a doplnění potřebného prášku pro následnou vrstvu se proces opakuje. Model vyrobený z materiálu PMMA a výsledný odlitek je zachycen na obr. 24 a obr. 25 [34; 35].



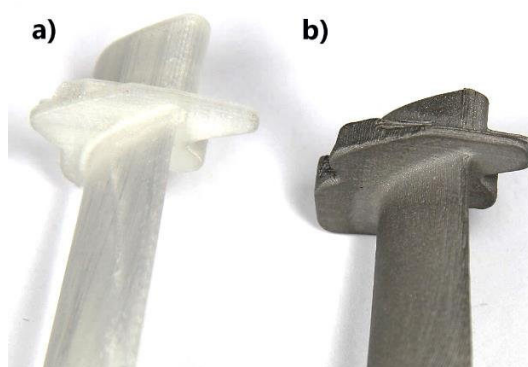
Obr. 24 Model produktu určený ke zpracování technologií přesného lití vyrobený metodou Binder Jetting.



Obr. 25 Odlitek zhotovený na základě modelu vyrobeného metodou Binder Jetting.

Fused Deposition Modeling

Metoda FDM je jednou z nejrozšířenějších technologií 3D tisku pro průmyslové i domácí využití. Pracuje na principu vytlačování roztaveného materiálu skrz trysku extruderu. Extruder při tisku vrstvy vykonává zpravidla pohyby v osách X a Y. Po dokončení vrstvy následuje zvýšení extruderu o příslušnou výšku. Tisk nové kontury navazuje na již vytisknutou vrstvu. V porovnání s metodou Binder Jetting dosahují FDM modely zpravidla horší struktury povrchu a vyšší drsnosti (na základě interního výzkumu až o 70 %). Přesto je tato metoda hojně využívána pro svoje nízké výrobní náklady. Ve slévárnách je nejčastěji používána pro stanovení technologických parametrů odlévání, jako je teplota předžhánání skořepiny, teplota odlévání či počet izolačních obalů. Příklad odlitku vyrobeného na základě FDM modelu je zachycen na obr. 26 až obr. 28 [1; 34; 36].



Obr. 26 Lopatka vyrobená metodou FDM: (a) modelu zhotoveného technologií FDM, (b) odlitek lopatky vyrobený na základě modelu FDM modelu.



Obr. 27 Detail modelu lopatky vyrobené metodou FDM.



Obr. 28 Detail odlitku lopatky vyrobené na základě FDM modelu.

4.2 Volba materiálu pro aditivní výrobu

Na základě zvolené aplikace bylo nutné vybrat nejvhodnější materiál. V bakalářské práci, která předcházela celému projektu, byly mimo jiné analyzovány mechanické vlastnosti materiálu IN718 zpracovaného technologií DMLS. U tohoto materiálu byly provedeny tahové zkoušky za pokojové a zvýšené teploty (600 °C). Z výstupů analýz těchto zkoušek bylo patrné, že mez pevnosti i smluvní mez kluzu výrazně přesahovaly hodnoty získané ze zkoušek prováděných na litém materiálu. Nedostačující výsledky však přineslo testování pevnosti při tečení. Zde ani jeden ze vzorků nedokázal odolat počátečnímu napětí a u všech zkoušek došlo k přetržení testovací tyčky ihned po spuštění testu. Z těchto nabytých informací byl vyvozen závěr, že aditivně zpracovaný materiál IN 718 (tepelně zpracováno dle AMS 5662) nedosahuje dostatečné odolnosti proti tečení pro použití v žárupevné aplikaci [1].

V rámci interních vývojových projektů ve společnosti PBS Velká Bíteš a. s. byl proveden test aditivně vyrobené rotační součásti v žárupevné aplikaci, který potvrdil výše zmíněné závěry. Z těchto důvodů byl pro další testování vybrán materiál IN939, který v litém stavu dosahuje lepších mechanických vlastností za zvýšených teplot než materiál IN718 [2; 29].

5 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

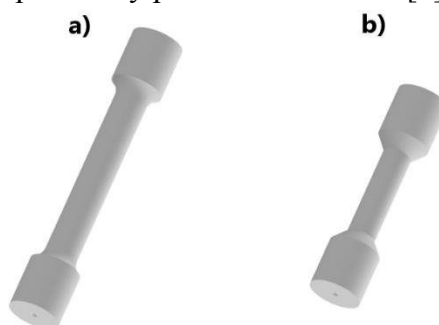
V rámci experimentální části projektu bylo provedeno mechanické testování tisknutých i litých vzorků. Konkrétně se jednalo o tahové zkoušky za pokojové teploty doplněné o zkoušky za zvýšených teplot. Proběhlo také testování pevnosti při tečení. Výstupy těchto zkoušek byly doplněny o materiálové rozbory mikročistoty, makrostruktury, analýzy lomových ploch po provedených zkouškách a metalografické analýzy litého i tisknutého materiálu na elektronovém mikroskopu.

5.1 Konstrukce a výroba tisknutých vzorků pro mechanické zkoušky

Za účelem testování mechanických vlastností byly zhotoveny vzorky dle výkresové dokumentace společností PBS Velká Bíteš a. s. Pro výrobu litých vzorků byla použita technologie přesného lití, tisknuté vzorky byly vyrobeny na zařízení SLM 280 2.0 od společnosti SLM Solutions Group AG.

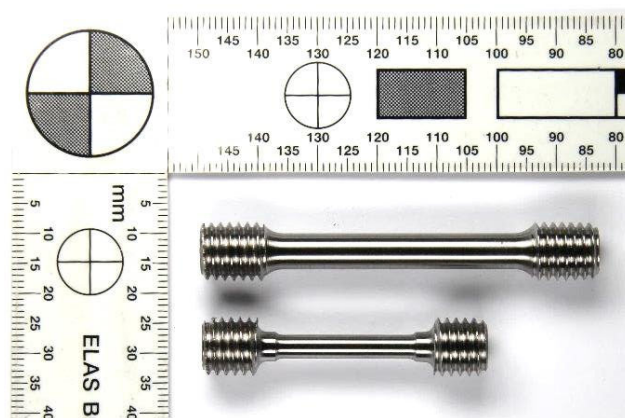
5.1.1 Výroba tisknutých vzorků

Pro výrobu polotovarů vyrobených metodou SLM byl dodržen stejný postup, který byl použit pro výrobu vzorků při předchozím testování materiálu IN 718 v bakalářské práci. Polotovary určené k obrábění (obr. 29) byly v případě aditivní technologie navýšeny o přídavek 1,2 mm na průměr součásti s předpokládanými třemi průjezdy nože se záběrem hlavního ostří nástroje 0,2 mm. Celý proces tisku probíhal na zařízeních SLM 280 2.0 přednastavenými tiskovými parametry pro materiál IN939 [1].



Obr. 29 Modely polotovarů určených pro tisk: a) polotovar vzorku tahové zkoušky, b) polotovar vzorku pevnosti při tečení.

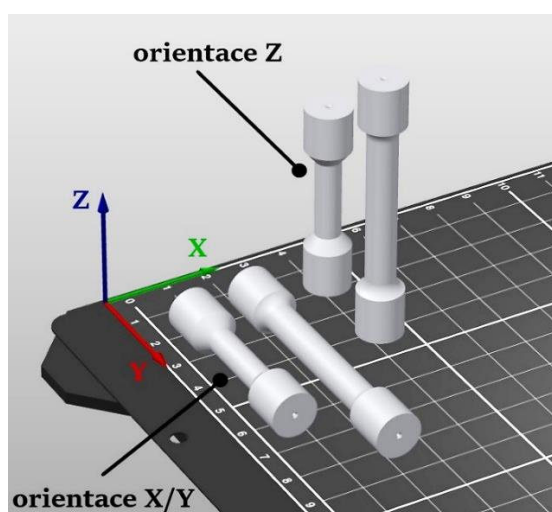
Na základě zkušeností z předešlé výroby vzorků z materiálu IN 718 byla vnější geometrie polotovarů pro testování pevnosti při tečení mírně upravena dle zásad aditivní technologie. Přejížděcí oblast střední části a závit polotovaru k testování pevnosti při tečení byla nahrazena zkosením. Touto změnou bylo docíleno samonosného efektu konstrukce a tím bylo výrazně redukováno množství generovaných podpor. Díky této nepatrné změně bylo docíleno výrazného snížení stavebního času a spotřebovaného materiálu než u geometrie vycházející z bakalářské práce. Všechny tisknuté polotovary byly doplněny o středící důlky usnadňující následné obrobení. Výsledné obrobené vzorky jsou zachyceny na snímku obr. 30 [1].



Obr. 30 Obrobené vzorky pro mechanické testování.

Definování orientace tisknutých polotovarů

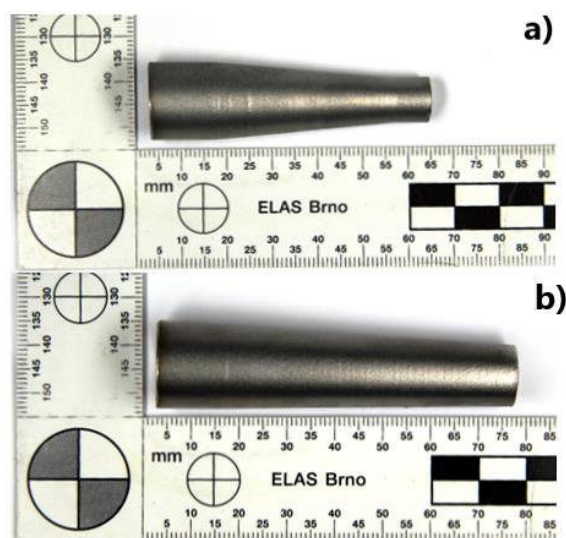
Materiály zpracované technologií SLM podléhají anizotropii mechanických vlastností, kdy nejvyšší meze pevnosti a kluzu dosahuje tisknutý materiál ve směru osy Z, tedy v případě, kdy osa zatížení prochází vertikálně jednotlivé vrstvy tisku (dle obr. 20). Všechny tisknuté vzorky byly označeny dle jejich příslušné orientace při tisku. Orientace vzorků tisknutých souose s osou Z byla značena písmenem Z. Orientace vzorků tisknutých kolmo k ose Z byla označena jako X/Y (obr. 31) [33].



Obr. 31 Druhy orientace vzorků při tisku.

5.1.2 Výroba litých vzorků

Pro výrobu litých testovacích vzorků byly využity standardní zkušební tělesa ve tvaru komolého kuželu s označením „typ 1–816794“ pro tyčky pevnosti při tečení, a „typ 3-816788“ pro tyčky určené na tahovou zkoušku (obr. 32). K výrobě litých vzorků byla využita technologie přesného lití do keramické molochitové skořepiny na bázi vody. Konečné složení poloviny hmotnosti kovové vsázky pocházela z přetavby již jednou využitého materiálu, druhá pocházela z panenského materiálu přímo od dodavatele. Výrobní parametry zkušebních vzorků jsou uvedeny v tab. 13.



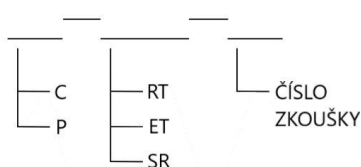
Obr. 32 Polotovary zkušebních těles pro: a) zkoušky pevnosti při tečení, b) tahové zkoušky.

Tab. 13 Výrobní parametry vzorků technologie přesného lití.

	Pevnost při tečení	Tahová zkouška
Označení vzorku	typ 1	typ 3
Číslo modelu	816794	816788
Hmotnost tělesa	0,075 kg	0,115
Kusů na vtok	7 ks	9 ks
Celková váha vtoku	3 kg	6 kg
Teplota skořepiny	1050 °C	1050 °C
Teplota lití	1360 °C	1360 °C
Vakuum	4·10 ⁻² mbar	4·10 ⁻² mbar

5.1.3 Značení vzorků mechanických zkoušek

Pro snadnější orientaci byly všechny mechanické vzorky označeny dle jednotných pravidel (obr. 33). První písmeno bylo přiděleno technologii výroby: P pro tisknuté vzorky (*Printed*) a C pro vzorky odlévané (*Casted*). Druhým znakem odděleným pomlčkami je označován typ prováděné zkoušky: RT pro tahové zkoušky za pokojové teploty (*Room Temperature*), ET pro tahové zkoušky za zvýšené teploty (*Elevated Temperatur*) a SR pro vzorky určené k testování pevnosti při tečení (*Stress Rupture*). Posledním znakem značení je přidělené pořadové číslo prováděné zkoušky. V případě prováděných zkoušek u tisknutého materiálu byly ve vybraných případech doplněny do závorky i informace ohledně orientace tisku a příslušné výšky vrstvy.



Obr. 33 Značení vzorků mechanických zkoušek.

5.2 Souhrnný seznam vyrobených vzorků pro mechanické vlastnosti

Souhrnné tabulky vyrobených vzorků (tab. 14 až tab. 16) byly doplněny o údaje tepelného zpracování dle kapitoly 3.5 a o parametry prováděných zkoušek. V případě tahové zkoušky byla uvedena teplota, u testování pevnosti při tečení i aplikované zatížení. Pro tisknuté vzorky byla tabulka rozšířena o údaje výšky vrstvy a orientace tisku.

Tab. 14 Seznamy vzorků určených pro tahové zkoušky.

Aditivní metoda SLM				Technologie přesného lití		
Označení vzorku	Teplota [°C]	Tepelné zpracování	Orientace/výška vrstvy	Označení vzorku	Teplota [°C]	Tepelné zpracování
P-RT-1	20	HT-P	Z / 30 μm	C-RT-1	20	HT-C
P-RT-2	20	HT-P	Z / 30 μm	C-RT-2	20	HT-C
P-RT-3	20	HT-P	Z / 30 μm	C-RT-3	20	HT-C
P-RT-4	20	HT-P	Z / 30 μm	C-RT-4	20	HIP-C
P-RT-5	20	HT-P	Z / 30 μm	C-RT-5	20	HIP-C
P-RT-6	20	HIP-P	Z / 60 μm	C-RT-6	20	HIP-C
P-RT-7	20	HIP-P	Z / 60 μm	C-ET-1	649	HT-C
P-RT-8	20	HIP-P	Z / 60 μm	C-ET-2	649	HT-C
P-RT-9	20	HIP-P	X/Y / 60 μm	C-ET-3	649	HT-C
P-RT-10	20	HIP-P	X/Y / 60 μm	C-ET-4	649	HIP-C
P-RT-11	20	HIP-P	X/Y / 60 μm	C-ET-5	649	HIP-C
P-ET-1	649	HT-P	Z / 30 μm	C-ET-6	649	HIP-C
P-ET-2	649	HT-P	Z / 30 μm			
P-ET-3	649	HT-P	Z / 30 μm			
P-ET-4	649	HT-P	Z / 30 μm			
P-ET-5	649	HT-P	Z / 30 μm			
P-ET-6	649	HIP-P	Z / 60 μm			
P-ET-7	649	HIP-P	Z / 60 μm			
P-ET-8	649	HIP-P	Z / 60 μm			
P-ET-9	649	HIP-P	X/Y / 60 μm			
P-ET-10	649	HIP-P	X/Y / 60 μm			
P-ET-11	649	HIP-P	X/Y / 60 μm			
P-ET-12	750	HIP-P	Z / 60 μm			
P-ET-13	750	HIP-P	Z / 60 μm			
P-ET-14	800	HIP-P	Z / 60 μm			
P-ET-15	800	HIP-P	Z / 60 μm			
P-ET-16	850	HIP-P	Z / 60 μm			
P-ET-17	850	HIP-P	Z / 60 μm			
P-ET-18	900	HIP-P	Z / 60 μm			
P-ET-19	900	HIP-P	Z / 60 μm			
P-ET-20	1000	HIP-P	Z / 60 μm			
P-ET-21	1000	HIP-P	Z / 60 μm			

Tab. 15 Seznam vzorků pro testování pevnosti při tečení vyrobených metodou SLM.

Aditivní metoda SLM				
Označení vzorku	Tepelné zpracování	Orientace/ výška vrstvy	Teplota [°C]	Zatížení [MPa]
P-SR-1	HT-P	Z / 30 μm	870	255
P-SR-2	HT-P	Z / 30 μm	982	112
P-SR-3	HT-P	Z / 30 μm	870	204
P-SR-4	HT-P	Z / 30 μm	982	89,6
P-SR-5	HT-P	Z / 30 μm	870	127,5
P-SR-6	HT-P	Z / 30 μm	982	56
P-SR-7	HIP-P	Z / 60 μm	870	255
P-SR-8	HIP-P	Z / 60 μm	982	112
P-SR-9	HIP-P	Z / 60 μm	870	204
P-SR-10	HIP-P	Z / 60 μm	982	89,6
P-SR-11	HIP-P	Z / 60 μm	870	127,5
P-SR-12	HIP-P	Z / 60 μm	982	56
P-SR-13	HIP-P	X/Y / 60 μm	870	255
P-SR-14	HIP-P	X/Y / 60 μm	982	112
P-SR-15	HIP-P	X/Y / 60 μm	870	204
P-SR-16	HIP-P	X/Y / 60 μm	982	89,6
P-SR-17	HIP-P	X/Y / 60 μm	870	127,5
P-SR-18	HIP-P	X/Y / 60 μm	982	56

Tab. 16 Seznam vzorků pro testování pevnosti při tečení vyrobených technologií přesného lití.

Technologie přesného lití			
Označení vzorku	Tepelné zpracování	Teplota [°C]	Zatížení [MPa]
C-SR -1	HT-C	870	255
C-SR-2	HT-C	870	255
C-SR-3	HT-C	870	255
C-SR-4	HT-C	982	112
C-SR-5	HT-C	982	112
C-SR-6	HT-C	982	112
C-SR-7	HIP-C	870	255
C-SR-8	HIP-C	870	255
C-SR-9	HIP-C	870	255
C-SR-10	HIP-C	982	112
C-SR-11	HIP-C	982	112
C-SR-12	HIP-C	982	112

5.3 Výstupy mechanických zkoušek

Veškerá data získaná z provedeného mechanického testování byla zanesena do tabulek včetně nastavených kritérií pro jejich vyhodnocování. Každý zkušební vzorek byl doplněn o značení příslušného tepelného zpracování.

5.3.1 Zkouška tahem za pokojové teploty ČSN EN ISO 6892-1

Tahové zkoušky za pokojové teploty byly prováděny ve společnosti PBS Velká Bíteš a. s. v mechanické laboratoři Divize přesného lití. Očekávané výstupy byly následně porovnávány s předpokládanými hodnotami jednotlivých parametrů na základě podmínek pro ověřování krycích taveb. Tyto podmínky jsou uvedeny v tab. 17.

Tab. 17 Minimální výstupy tahové zkoušky za pokojové teploty pro litý materiál IN 939 dle specifikace PBS Velká Bíteš a. s.

Smluvní mez kluzu (min.) Rp _{0,2} [MPa]	Mez pevnosti (min.) Rm [MPa]	Tažnost (min.) A [%]
725	950	3

Celkem bylo za pokojové teploty testováno 5 vzorků vyrobených aditivní technologií s tepelným zpracováním HT-P a 6 vzorků s tepelným zpracováním HT-C a HIP-C pro ověření mechanických vlastností litého materiálu. Výsledky zkoušek byly zaneseny do tabulek tab. 18 až tab. 20.

Tab. 18 Výstupy tahové zkoušky za pokojové teploty tisknutého materiálu (HT-P, orientace Z).

Označení vzorku	Tepelné zpracování	Smluvní mez kluzu Rp _{0,2} [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
P-RT-1	HT-P	1027	1367	8,9	8,5
P-RT-2	HT-P	1026	1314	6,3	4,9
P-RT-3	HT-P	1033	1371	8,7	6,9
P-RT-4	HT-P	1034	1368	8,4	7,2
P-RT-5	HT-P	1025	1343	7,6	7,2

Tab. 19 Výstupy tahové zkoušky za pokojové teploty litého materiálu (HT-C).

Označení vzorku	Tepelné zpracování	Smluvní mez kluzu Rp _{0,2} [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
C-RT-1	HT-C	924	989	0,7	0,67
C-RT-2	HT-C	911	1023	1,3	1,33
C-RT-3	HT-C	899	1024	1,3	0,67

Tab. 20 Výstupy tahové zkoušky za pokojové teploty litého materiálu (HIP-C).

Označení vzorku	Tepelné zpracování	Smluvní mez kluzu Rp _{0,2} [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
C-RT-4	HIP-C	896	1055	2,2	2,65
C-RT-5	HIP-C	891	1091	3,5	5,23
C-RT-6	HIP-C	920	1063	1,8	2,65

5.3.2 Zkouška tahem za zvýšené teploty ČSN ISO EN 6892-2

Pro určení mechanických vlastností materiálu IN939 za zvýšených teplot byla provedena pilotní zkouška tahem při teplotě 649 °C. Získané výstupy byly následně porovnávány s předpokládanými hodnotami jednotlivých parametrů na základě podmínek pro ověřování krycích taveb ve společnosti PBS Velká Bíteš a. s. Tyto podmínky pro minimální hodnoty výstupů z tahové zkoušky za zvýšené teploty jsou uvedeny v tab. 21.

Tab. 21 Minimální výstupy tahové zkoušky za teploty 649 °C pro litý materiál IN 939 dle specifikace PBS Velká Bíteš a. s.

Smluvní mez kluzu (min.) Rp0,2 [MPa]	Mez pevnosti (min.) Rm [MPa]	Tažnost (min.) A [%]	Kontrakce (min.) Z [%]
580	830	2	2

Pro testování mechanických vlastností bylo vyhrazeno 5 vzorků vyrobených aditivní metodou SLM s tepelným zpracováním HT-P a 6 vzorků vyrobených z odlévaných polotovarů s tepelným zpracováním HT-C a HIP-C. Výstupy zkoušek byly zaneseny do tab. 22 až tab. 24.

Tab. 22 Výstupy tahové zkoušky za teploty 649 °C tisknutého materiálu (HT-P, orientace Z).

Označení vzorku	Tepelné zpracování	Smluvní mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A5 [%]	Kontrakce Z [%]
P-ET-1	HT-P	902,3	1192,0	6,8	6,9
P-ET-2	HT-P	897,6	1228,1	9,8	9,7
P-ET-3	HT-P	939,0	1168,1	6,2	5,9
P-ET-4	HT-P	914,3	1204,9	7,8	7,9
P-ET-5	HT-P	922,1	1211,4	8,0	7,5

Tab. 23 Výstupy tahové zkoušky za teploty 649 °C litého materiálu (HT-C).

Označení vzorku	Tepelné zpracování	Smluvní mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
C-ET-1	HT-C	780,0	935,7	4,0	4,0
C-ET-2	HT-C	795,0	920,0	3,7	4,6
C-ET-3	HT-C	801,9	938,7	3,0	4,6

Tab. 24 Výstupy tahové zkoušky za teploty 649 °C litého materiálu (HIP-C).

Označení vzorku	Tepelné zpracování	Smluvní mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
C-ET-4	HIP-C	812,0	954,0	3,3	4,0
C-ET-5	HIP-C	799,0	967,6	3,9	5,9
C-ET-6	HIP-C	804,2	981,4	4,2	6,2

5.3.3 Zkouška pevnosti při tečení dle ČSN ISO 204

Veškeré testování pevnosti při tečení probíhalo na stroji T-800 ve společnosti SVÚM, a. s. dle zkušebního postupu ČSN ISO 204. Parametry prvních zkoušek byly stanoveny dle standardního procesu ověřování mechanických vlastností krycích taveb materiálu IN 939 společnosti PBS Velká Bíteš, a. s. Podmínky mechanických vlastností krycích taveb jsou uvedeny včetně parametrů samotné zkoušky v tab. 25.

Tab. 25 Minimální výstupy zkoušky pevnosti při tečení litého materiálu IN 939 dle specifikace PBS Velká Bíteš a. s.

Teplota [°C]	Zatížení [MPa]	Doba do lomu [h]	Tažnost [%]	Kontrakce [%]
870	255	min. 60	min. 5	-
982	112	min. 40	min. 5	min. 5

Tyto hodnoty byly ověřeny u litých vzorků C-SR-1, C-SR-2, C-SR-3 pro teplotu 870 °C a u vzorků C-SR-4, C-SR-5 a C-SR-6 pro teplotu 982 °C. Výstupy zkoušek litého materiálu byly zaneseny do tab. 26 a tab. 27.

Tab. 26 Výstupy zkoušky pevnosti při tečení litého materiálu (HT-C).

Označení vzorku	Tepelné zpracování	Teplota [°C]	Zatížení [MPa]	Doba do lomu [h]	Tažnost [%]	Kontrakce [%]
C-SR-1	HT-C	870	255	153,5	6,10	4,00
C-SR-2	HT-C	870	255	113,75	3,17	2,98
C-SR-3	HT-C	870	255	79,0	2,05	4,00
C-SR-4	HT-C	982	112	52,0	12,19	18,59
C-SR-5	HT-C	982	112	60,5	16,95	18,14
C-SR-6	HT-C	982	112	52,5	13,56	19,59

Tab. 27 Výstupy zkoušky pevnosti při tečení litého materiálu (HIP-C).

Označení vzorku	Tepelné zpracování	Teplota [°C]	Zatížení [MPa]	Doba do lomu [h]	Tažnost [%]	Kontrakce [%]
C-SR-7	HIP-C	870	255	64,25	1,30	-
C-SR-8	HIP-C	870	255	56,75	1,38	-
C-SR-9	HIP-C	870	255	69,0	1,02	-
C-SR-10	HIP-C	982	112	49,5	9,53	12,17
C-SR-11	HIP-C	982	112	52,5	13,63	19,99
C-SR-12	HIP-C	982	112	46,0	13,86	18,73

Provedenými testy pevnosti při tečení byl doplněn dosavadní soubor informací o mechanických vlastnostech materiálu IN939 zpracovaného technologií přesného lití.

Pro testování tisknutých vzorků byl zvolen mírně odlišný postup, kdy byly pro verifikaci výdrže vybrány pouze vzorky P-SR-1 a P-SR-2. Výsledky jejich testování byly zaneseny do tab. 28. Na základě výsledků došlo u následujících vzorků ke snížení aplikovaného napětí, a to nejprve na 80 a následně na 50 %. Kompletní výstupy a parametry provedených zkoušek pevnosti při tečení tisknutého materiálu s tepelným zpracováním HT-P jsou uvedeny v tab. 29 a tab. 30.

Tab. 28 Výstupy zkoušky pevnosti při tečení tisknutého materiálu s nastavenými parametry dle tab. 25 (HT-P, orientace Z).

Označení vzorku	Tepelné zpracování	Teplota [°C]	Zatížení [MPa]	Doba do lomu [h]	Tažnost [%]	Kontrakce [%]
P-SR-1	HT-P	870	255	0,25	4,68	3,96
P-SR-2	HT-P	982	112	0,25	14,39	9,77

Výstupy z první zkoušky pevnosti při tečení se ukázaly jako nerelevantní vzhledem k nízké době výdrže, proto bylo u vzorků P-SR-3 a P-SR-4 přistoupeno ke snížení aplikovaného zatížení o 20 % vůči parametrům z tab. 25. Konečnými parametry zkoušek bylo tedy zatížení 204 MPa při 870 °C a zatížení 89,6 MPa při teplotě 982 °C. Výsledky zkoušek byly zaneseny do tab. 29.

Tab. 29 Výstupy zkoušky pevnosti při tečení tisknutého materiálu se sníženým aplikovaným zatížením na 80 % původní hodnoty (HT-P, orientace Z).

Označení vzorku	Tepelné zpracování	Teplota [°C]	Zatížení [MPa]	Doba do lomu [h]	Tažnost [%]	Kontrakce [%]
P-SR-3	HT-P	870	204	0,50	4,24	1,49
P-SR-4	HT-P	982	89,6	0,75	17,71	14,44

I přes dvacetiprocentní snížení zatížení nebylo dosaženo požadované doby do lomu. Přistoupeno se tedy ke snížení zatížení pro následující zkoušku na poloviční hodnotu původních parametrů z tab. 25 při nezměněné teplotě. Třetí testování pevnosti při tečení tedy proběhlo za teploty 870 °C s aplikovaným zatížením 127,5 MPa. Pro zkoušku při teplotě 982 °C bylo zvoleno aplikované zatížení 56 MPa. Výsledky těchto zkoušek byly zpracovány v tab. 30.

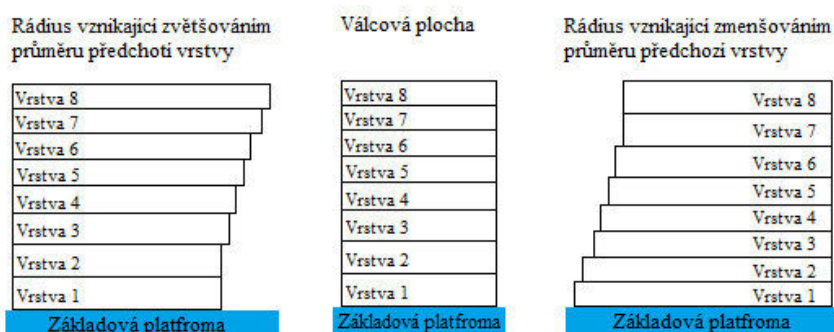
Tab. 30 Výstupy zkoušky pevnosti při tečení tisknutého materiálu se sníženým aplikovaným zatížením na 50 % původní hodnoty (HT-P, orientace Z).

Označení vzorku	Tepelné zpracování	Teplota [°C]	Zatížení [MPa]	Doba do lomu [h]	Tažnost [%]	Kontrakce [%]
P-SR-5	HT-P	870	127,5	5,0	13,0	9,75
P-SR-6	HT-P	982	56,0	3,5	28,2	27,39

Vzhledem k nesplnění předepsaných podmínek doby výdrže při zkouškách pevnosti při tečení tisknutých vzorků bylo dále rozhodnuto o výrobě další sady zkušebních tyček s novými tiskovými parametry.

5.4 Úprava tiskových parametrů pro výrobu sady vzorků s 60 μm výškou vrstvy

Hlavním cílem nové sady vzorků bylo zajistit zvýšenou odolnost proti tečení zvýšením stavební výšky vrstvy z původních 30 na 60 μm . Tato zásadní změna vede ke zvětšení zrn v materiálu, v jehož důsledku dochází ke snížení počtu hranic mezi nimi. Očekávaným přínosem bylo zvýšení odolnosti proti tečení a zvýšení doby lomu při testování pevnosti při tečení. Nevýhodou této modifikace stavebních parametrů je zhoršení schodovitého efektu (obr. 34), který se negativně projeví na textuře povrchu vyráběných součástí. Vzhledem k zásahu do makrostruktury vzorků bylo očekáváno i zhoršení výstupů tahových zkoušek. Pro kompenzaci negativního dopadu na výstupy tahových zkoušek a pro dodatečné zvýšení odolnosti proti tečení byla do tepelného zpracování zařazena i operace HIP.



Obr. 34 Obrázek schodovitého efektu.

Pro testování mechanických vlastností vzorků s novými parametry byly kromě zkoušky tahem za pokojové a zvýšené teploty přidány i zkoušky pro testování anizotropie. Dále bylo vyčleněno celkem 10 vzorků pro definování závislosti mezi výstupy z tahových zkoušek a teplotou. Tisk vzorků probíhal na základě totožných modelů, které byly využity při výrobě tiskové sady s výškou vrstvy 30 μm . Do tepelného zpracování těchto vzorků byla přidána operace HIP dle tab. 12. Kompletní sada vzorků byla tisknuta v jednom výrobním cyklu na stroji SLM 280 2.0. Umístění vzorků na tiskové platformě bylo zachyceno na obr. 35.



Obr. 35 Rozložení modelů s 60 μm výškou vrstvy na tiskové platformě.

5.4.1 Zkouška tahem za pokojové teploty ČSN EN ISO 6892-1 (60 µm)

Tahové zkoušky vzorků za pokojové teploty s výškou stavební vrstvy 60 µm byly prováděny ve společnosti PBS Velká Bíteš a. s. v mechanické laboratoři Divize přesného lití. Očekávané výstupy byly, stejně jako v případě 30 µm vrstvy, porovnávány s předpokládanými hodnotami jednotlivých parametrů na základě podmínek pro ověřování krycích taveb z tab. 17. Výstupy tahových zkoušek byly zaneseny do tab. 31.

Tab. 31 Výstupy tahové zkoušky za pokojové teploty tisknutého materiálu s 60 µm výškou vrstvy (HIP-P, orientace Z).

Označení vzorku	Tepelné zpracování	Smluvní mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
P-RT-6	HIP-P	815	1383	18,2	15,4
P-RT-7	HIP-P	823	1391	18,7	14,7
P-RT-8	HIP-P	817	1387	19,0	15,4

5.4.2 Zkouška tahem za zvýšené teploty ČSN ISO EN 6892-2 (60 µm)

K ověření mechanických vlastností z tahové zkoušky byla zvolena teplota 649 °C, která korespondovala s prováděnými zkouškami na vzorcích s 30 µm stavební vrstvou. Výstupy této zkoušky byly zpracovány do tab. 32.

Tab. 32 Výstupy tahové zkoušky za teploty 649 °C tisknutého materiálu (60 µm, HIP-P, orientace Z).

Označení vzorku	Tepelné zpracování	Smluvní mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
P-ET-6	HIP-P	725,5	1232,5	12,2	11,7
P-ET-7	HIP-P	735,0	1231,5	14,2	12,6
P-ET-8	HIP-P	719,0	1226,7	14,4	13,8

5.4.3 Zkouška pevnosti při tečení dle ČSN ISO 204 (60 µm)

Byly provedeny doplňující zkoušky pevnosti při tečení dle podmínek nastavených v tab. 25. Výstupy těchto zkoušek byly uvedeny do tab. 33.

Tab. 33 Výstupy zkoušky pevnosti při tečení tisknutého materiálu (60 µm, HIP-P, orientace Z).

Označení vzorku	Tepelné zpracování	Teplota [°C]	Zatížení [MPa]	Doba do lomu [h]	Tažnost [%]	Kontrakce [%]
P-SR-7	HIP-C	870	255,0	0,5	1,66	0,0
P-SR-8	HIP-C	870	204,0	1,5	1,43	0,5
P-SR-9	HIP-C	870	127,5	41,25	1,86	1,0
P-SR-10	HIP-C	982	112,0	1,5	3,95	3,48
P-SR-11	HIP-C	982	89,6	6,0	5,10	3,47
P-SR-12	HIP-C	982	56,0	42,0	5,61	4,46

5.4.4 Anizotropie mechanických vlastností tisknutých vzorků (60 μm)

K testování vlivu anizotropie mechanických vlastností na materiál IN939 byly vyhotoveny vzorky v tiskové orientaci X/Y, které sloužily ke zkouškám za pokojové a zvýšené teploty (649 °C). Anizotropie mechanických vlastností byla testována i na pevnosti při tečení tisknutého materiálu dle parametrů tab. 25. Výstupy zkoušek jsou uvedeny v tab. 34 až tab. 36 [33].

Tab. 34 Výstupy tahové zkoušky za pokojové teploty tisknutého materiálu (60 μm, HIP-P, orientace X/Y).

Označení vzorku	Tepelné zpracování	Smluvní mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
P-RT-9	HIP-P	844	1384	15,5	12,27
P-RT-10	HIP-P	839	1374	15,0	11,95
P-RT-11	HIP-P	835	1376	15,1	12,58

Tab. 35 Výstupy tahové zkoušky za teploty 649 °C tisknutého materiálu (60 μm, HIP-P, orientace X/Y).

Označení vzorku	Tepelné zpracování	Smluvní mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
P-ET-9	HIP-P	746,6	1238,0	11,5	11,7
P-ET-10	HIP-P	750,1	1238,3	11,3	9,8
P-ET-11	HIP-P	738,8	1243,5	11,5	11,0

Tab. 36 Výstupy zkoušky pevnosti při tečení tisknutého materiálu (60 μm, HIP-P, orientace X/Y).

Označení vzorku	Tepelné zpracování	Teplota [°C]	Zatížení [MPa]	Doba do lomu [h]	Tažnost [%]	Kontrakce [%]
P-SR-13	HIP-C	870	255,0	0,5	1,9	1,0
P-SR-14	HIP-C	870	204,0	1,5	2,2	2,48
P-SR-15	HIP-C	870	127,5	3,75	2,05	1,49
P-SR-16	HIP-C	982	112,0	1,25	5,48	4,93
P-SR-17	HIP-C	982	89,6	4,25	6,65	4,94
P-SR-18	HIP-C	982	56,0	31,25	11,02	4,46

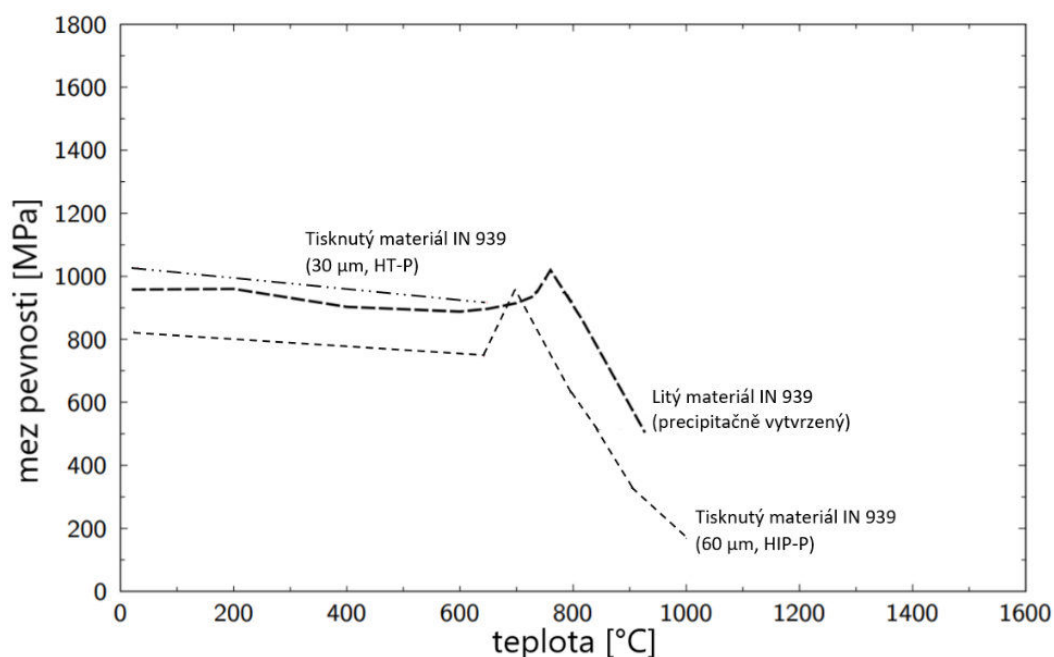
5.4.5 Závislost výstupů mechanických zkoušek na teplotě

Pro získání lepší představy o chování aditivně zpracovaného materiálu IN 939 za vysokých teplot bylo v dalším kroku přistoupeno ke zjištění závislosti mechanických vlastností na teplotě. Za tímto účelem byly provedeny dodatečné tahové zkoušky u tisknutého materiálu s tepelným zpracováním HIP-P (60 μm). Parametry zkoušek byly uvedeny v tab. 37.

Tab. 37 Parametry dodatečných tahových zkoušek z tisknutého materiálu (60 μm , orientace Z).

Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	750	800	850	900	1000
Vybrané vzorky	P-ET-12 P-ET-13	P-ET-14 P-ET-15	P-ET-16 P-ET-17	P-ET-18 P-ET-19	P-ET-20 P-ET-21

Jednotlivé teploty tahových zkoušek byly voleny na základě známé křivky závislosti teploty a meze pevnosti litého materiálu IN939 dle zdroje 29. Z výstupů zkoušky byla vyhotovena přibližná závislost meze pevnosti tisknutého materiálu IN 939 na teplotě, a to pro obě varianty tisku, tedy s 30 i 60 μm výškou vrstvy. Získané křivky byly doplněny do obr. 36 dle zdroje 29.



Obr. 36 Závislost meze pevnosti tisknutého materiálu IN 939 na teplotě podle [29].

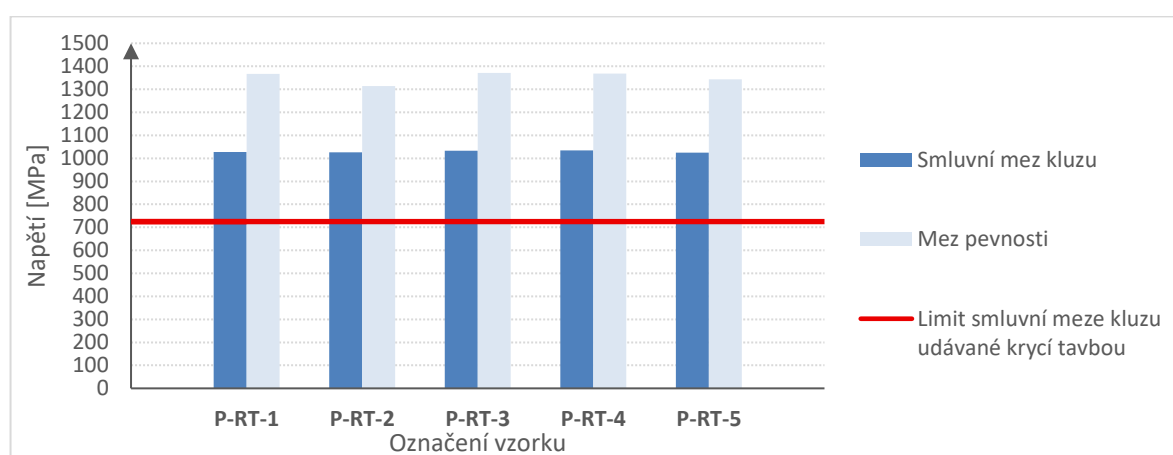
U tisknutého materiálu s 60 μm výškou vrstvy docházelo k vyšší degradaci mechanických vlastností než u litého materiálového stavu (obr. 36). Pro tisknuté vzorky s výškou vrstvy 30 μm byla vynesena křivka tvořena pouze hodnotami z provedených tahových zkoušek při pokojové teplotě a při 649 $^{\circ}\text{C}$.

5.5 Zpracování výstupů mechanických zkoušek

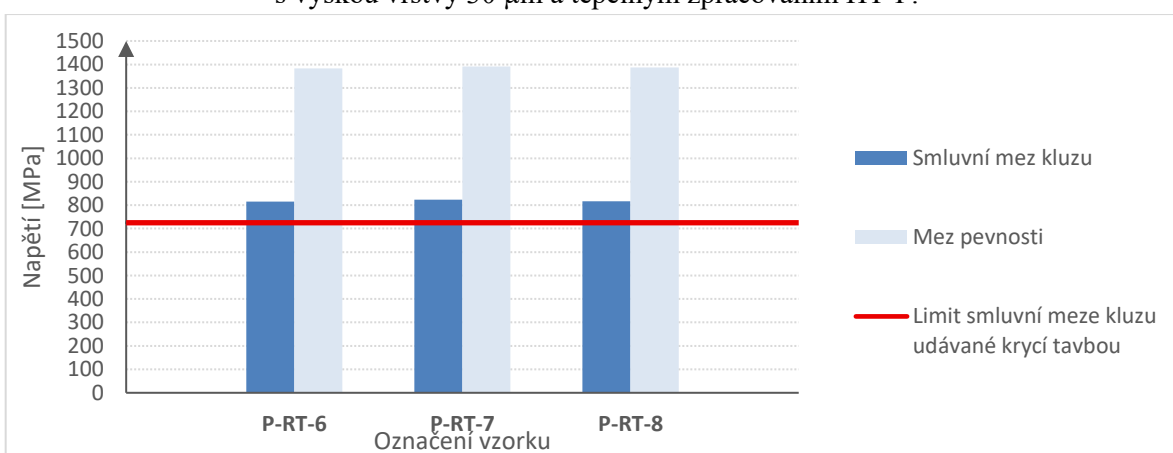
Vybrané výstupy z mechanických zkoušek byly přehledně zpracovány do grafů (obr. 37 až obr. 44) a porovnány s předepsanými limity. První porovnávanou hodnotou, zanesenou taktéž do grafu, byly požadované výstupy tahových zkoušek dle interního předpisu pro krycí tavby společnosti PBS Velká Bíteš a. s.

Výstupy tisknutých materiálů z tahových zkoušek za pokojové teploty

Za výchozí kritérium pro zhodnocení výstupů z tahové zkoušky za pokojové teploty byl zvolen limit minimální meze kluzu daný předpisy pro krycí tavby společnosti PBS Velká Bíteš a. s. Mez kluzu je jedním z výchozích kritérií pro použití komponent v žárupevných aplikacích, jelikož díky ní získává konstruktér jasnější představu o elastické deformaci daného materiálu. Vybrané mechanické vlastnosti tisknutého materiálu s 30 a 60 μm vrstvou byly zaneseny do grafu jako obr. 37 a obr. 38.



Obr. 37 Mechanické vlastnosti za pokojové teploty tisknutého materiálu s výškou vrstvy 30 μm a tepelným zpracováním HT-P.

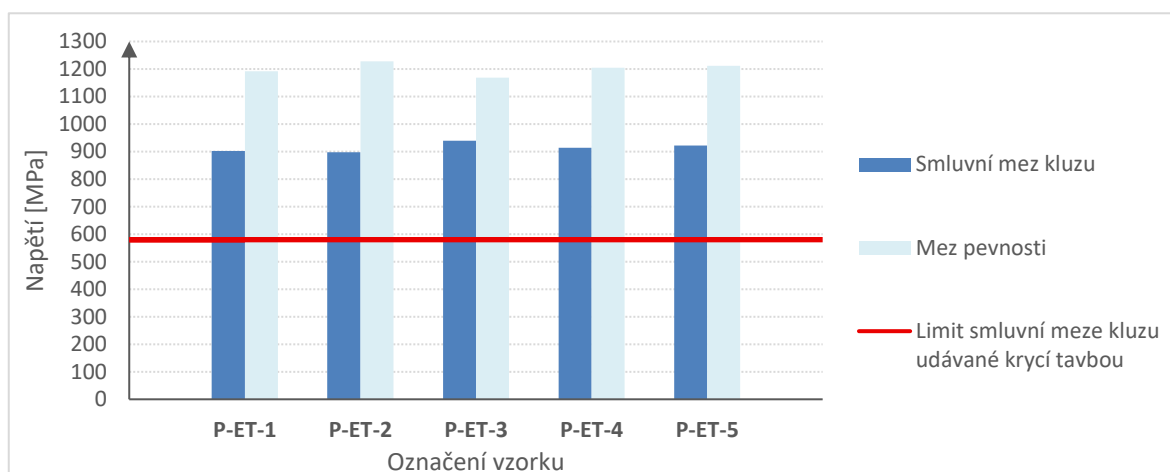


Obr. 38 Mechanické vlastnosti za pokojové teploty tisknutého materiálu s výškou vrstvy 60 μm a tepelným zpracováním HIP-P.

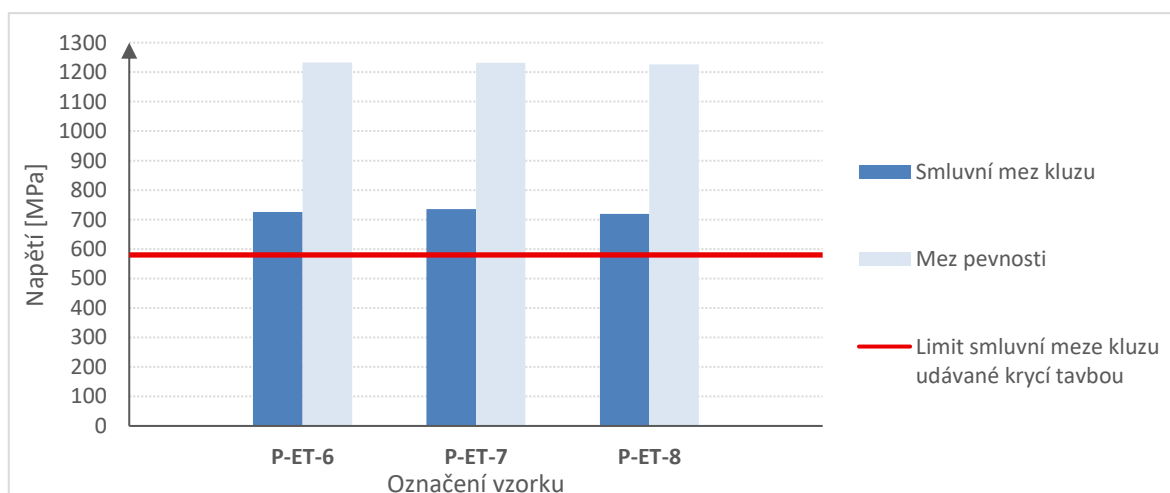
Limit meze pevnosti a smluvní meze kluzu splňovaly všechny testované vzorky. Změna výšky vrstvy v kombinaci se zařazením operace HIP do tepelného zpracování vzorků vedl k výraznému snížení meze kluzu tisknutého materiálu. Přesto všechny tisknuté vzorky odpovídaly nastavené hranici 725 MPa smluvní meze kluzu.

Výstupy tisknutých materiálů z tahových zkoušek za zvýšené teploty

Za výchozí kritérium pro zhodnocení výstupů z tahové zkoušky za zvýšené teploty (649 °C) byl zvolen limit minimální smluvní meze kluzu daný předpisem pro krycí tavby společnosti PBS Velká Bíteš a. s. Do grafu byly vyneseny meze pevnosti příslušných vzorků. Limit minimální meze pevnosti splňovaly všechny testované vzorky. Vybrané mechanické vlastnosti tisknutého materiálu s 30 a 60 μm vrstvou byly zaneseny do grafu jako obr. 39 a obr. 40



Obr. 39 Mechanické vlastnosti za teploty 649 °C tisknutého materiálu s výškou vrstvy 30 μm a tepelným zpracováním HT-P.

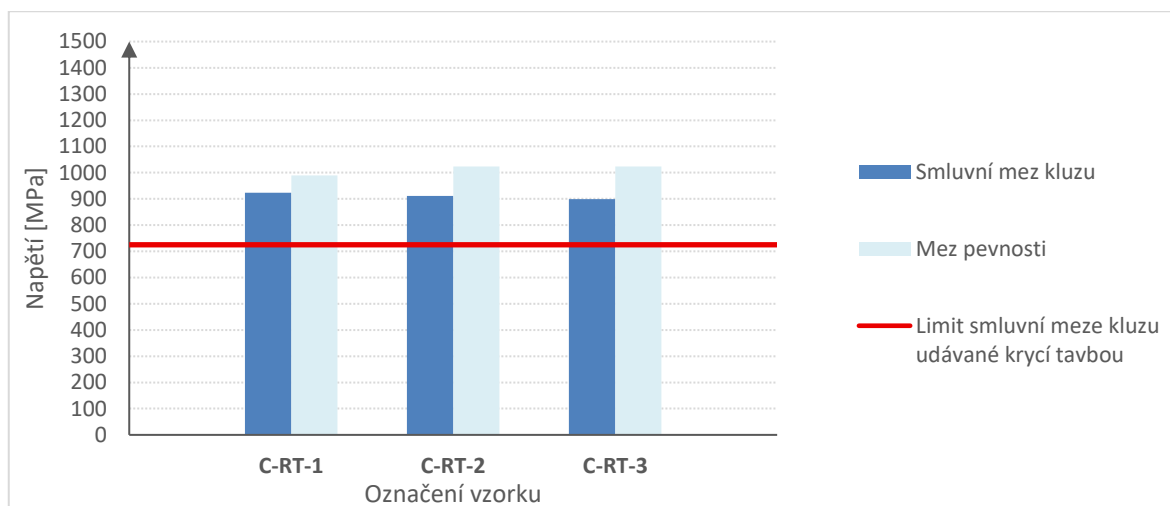


Obr. 40 Mechanické vlastnosti za teploty 649 °C tisknutého materiálu s výškou vrstvy 60 μm a tepelným zpracováním HIP-P.

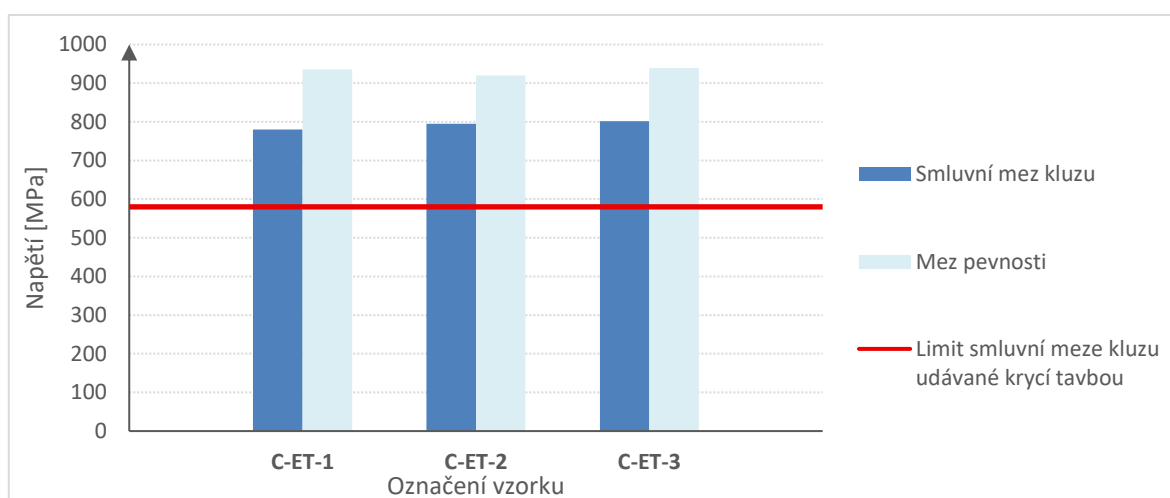
Veškeré tisknuté vzorky splňovaly kritérium minimální smluvní meze kluzu. U vzorků se zvýšenou výškou vrstvy na 60 μm došlo ke snížení dosahovaných hodnot smluvní meze kluzu, i přesto všechny testované tisknuté vzorky splňovaly nastavené limity.

Výstupy litého materiálu z tahových zkoušek za pokojové a zvýšené teploty

Výstupy smluvní meze kluzu odpovídaly nastaveným limitům u všech zkoušených vzorků. Oproti tisknutému materiálu vykazoval litý materiál výrazně nižších hodnot meze pevnosti, které však stále splňovaly nastavený limit dle krycí tavby.



Obr. 41 Mechanické vlastnosti za pokojové teploty litého materiálu s tepelným zpracováním HT-C.

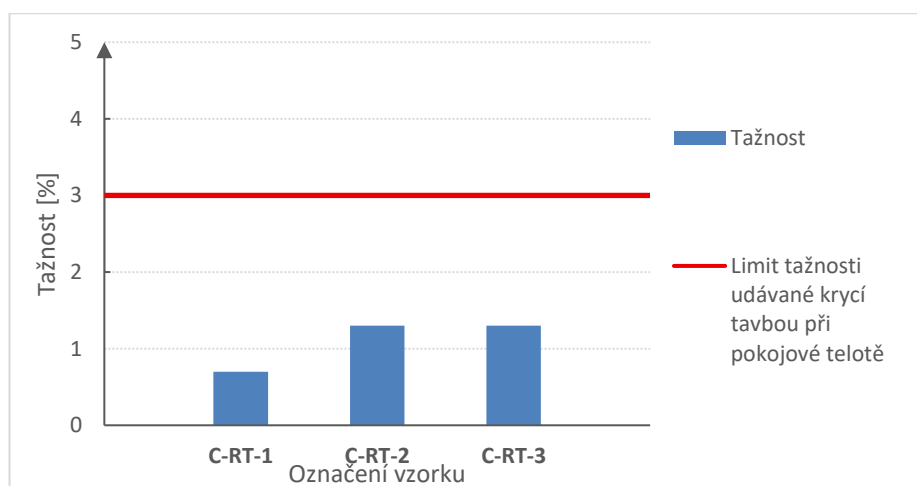


Obr. 42 Mechanické vlastnosti za teploty 649 °C litého materiálu s tepelným zpracováním HT-C.

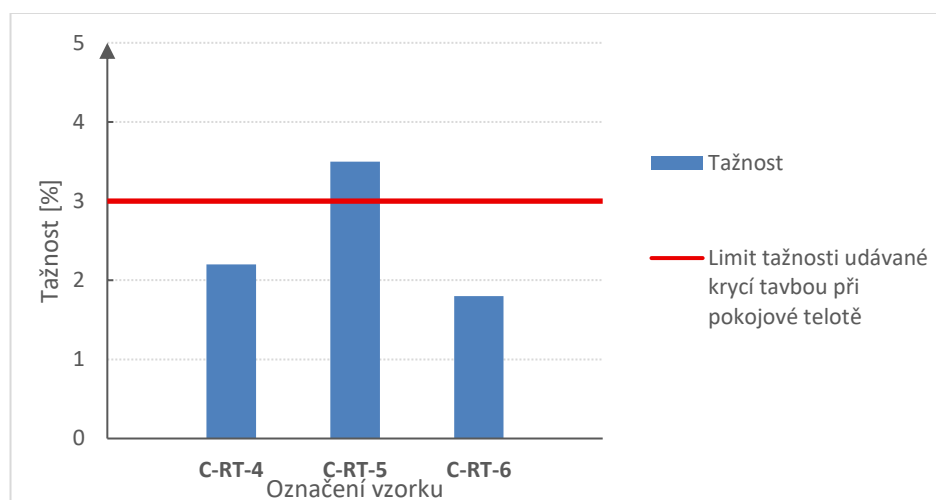
Zařazením operace HIP do tepelného zpracování nemělo za následek výrazné zvýšení smluvní meze kluzu či meze pevnosti. Výrazné zlepšení bylo však možné pozorovat na tažnostech zkoumaných vzorků. Vybrané mechanické vlastnosti litého materiálu s tepelným zpracováním HT-C byly zaneseny do grafu jako obr. 41 a obr. 42.

Tažnosti

Tažnost A_5 byla vyhodnocena na všech vzorcích při provádění tahových zkoušek. Vybrané výsledky tažností tisknutých vzorků byly zaneseny do obr. 43 a obr. 44. Všechny tisknuté vzorky splnily předepsané limity. U litých vzorků se ukázala tažnost při pokojové teplotě jako problémová, kdy ani jeden vzorek s tepelným zpracováním HT-C nedokázal splnit předepsané limity (obr. 43). Zařazením operace HIP do tepelného zpracování bylo možné pozorovat zlepšení tažnosti materiálu, přesto limitu tažnosti za pokojové teploty dokázal splnit pouze vzorek s označením C-RT-5 (obr. 44). Limit tažnosti litého materiálu za zvýšené teploty 649 °C se podařilo splnit všem zkoušeným vzorkům. Při této zkoušce již operace HIP neměla zásadnější vliv na výslednou tažnost litého materiálu.



Obr. 43 Tažnosti litého materiálu (HT-C) z tahové zkoušky za pokojové teploty.



Obr. 44 Tažnosti litého materiálu (HIP-C) z tahové zkoušky za pokojové teploty.

6 MATERIÁLOVÉ ROZBORY

Vybrané vzorky podstoupily podrobnější materiálové rozborů včetně analýzy makrostruktury, mikrostruktury, mikročistoty, chemického složení a skenování lomových ploch pomocí skenovací elektronové mikroskopie.

6.1 Chemické složení

Na vzorcích z obou technologií bylo provedeno také zkoumání chemického složení pomocí rentgenové spektrometrie. Pro vyhodnocování chemického složení litého i tisknutého materiálu byla získaná data z měření porovnána s chemickým složením pro ověřování krycích taveb (tab. 38) ve společnosti PBS Velká Bíteš a. s. V případě tisknutého materiálu proběhla i kontrola garantovaného složení dle podkladů od dodavatele dle přílohy 1. Výsledky měření rentgenové spektrometrie byly uvedeny do tab. 39 a tab. 40.

Tab. 38 Nastavené limity chemického složení litého materiálu IN 939 pro krycí tavby [hm. %].

Limity pro chemického složení materiálu IN 939											
Ni	Cr	Co	Al	Ti	W	Nb	Ta	C	Zr	Mn	Si
Bal.	21,50 –	18,0 –	1,5 –	3,5 –	1,8 –	0,8 –	1,2 –	0,10 –	0,05 –	Max.	Max.
	23,5	20,0	2,5	4,0	2,2	1,2	1,6	0,20	0,15	0,1	0,1

Nastavená kritéria pro chemické složení odlévaného materiálu v porovnání s limity tisknutého materiálu (příloha 1) cílí na menší variabilitu chemického složení přísněji nastavenými limity koncentrací jednotlivých prvků. Významným rozdílem je požadovaná přísnější maximální koncentrace křemíku u litého materiálu, který u materiálu IN 939 nesmí přesáhnout hranici 0,1 hm. %. Pro tisknutý materiál je tato koncentrace výrazně rozvolněna s povolenou maximální koncentrací křemíku až do 0,5 hm. %.

Tab. 39 Chemické složení litého materiálu [hm. %].

Chemické složení odlévaného materiálu IN 939							
Ni	Cr	Co	Al	Ti	W	Nb	Ta
47,53 ± 0,13	23,38 ± 0,11	18,5 ± 0,08	2,23 ± 0,1	4,27 ± 0,08	2,2 ± 0,08	0,97 ± 0,01	1,54 ± 0,07

Tab. 40 Chemické složení tisknutého materiálu [hm. %].

Chemické složení odlévaného materiálu IN 939							
Ni	Cr	Co	Al	Ti	W	Nb	Ta
48,3 ± 0,14	22,2 ± 0,11	18,68 ± 0,1	2,23 ± 0,09	4,22 ± 0,08	1,91 ± 0,08	0,96 ± 0,01	1,4 ± 0,07

Detekované prvky rentgenovou spektrometrií obou materiálových stavů zanesené v tab. 39 a tab. 40 odpovídaly všem předepsaným hodnotám až na koncentrace titanu. Ten přesahoval povolenou koncentraci v řádech desetin. V průběhu přípravy vzorku nebyla zjištěna žádná možná příčina kontaminace, je tedy předpokládána kontaminace základního materiálu či samotného spektrometru. Zjištění přesných příčin a případného ovlivnění mechanických vlastností touto odchylkou chemického složení by vyžadovalo podrobnou materiálovou analýzu.

6.2 Makrostruktura materiálu

Naleptání makrostruktury proběhlo u litých polotovarů po operaci HIP, kde odhalilo rozložení zrn v litých zkušebních vzorcích. U materiálu zpracovaného aditivně nebylo přistoupeno k leptání struktury na základě předpokladu, vycházejícího z bakalářské práce, o nedostatečné velikosti zrn tisknutého materiálu, která neumožňuje provedení řádné analýzy makrostruktury. Pro naleptání litých vzorků byl využit roztok o složení 50 ml H_2O_2 , 250 ml HCl a 150 ml H_2O [1].



Obr. 45 Makrostruktura polotovaru litých vzorků.

Distribuce a velikost zrn jsou důležitým faktorem pro výsledné mechanické vlastnosti odlitku. Naleptaná makrostruktura odhalila u polotovaru pro testování pevnosti při tečení tvorbu výrazných kolumnárních zrn rostoucích z jeho vnějšího povrchu. Střet kolumnárních zrn v ose polotovaru mohl vést ke zvýšené koncentraci slévárenských defektů, které mohly být jednou z příčin nedosáhnutí požadovaných mechanických vlastností litého materiálu. Pro bližší zkoumání této proměnné bylo navrženo provedení úpravy technologie výroby s cílem omezit tvorbu kolumnárních zrn ve vnitřní struktuře polotovaru.

6.3 Mikrostruktura materiálu

Rozbory mikrostruktury materiálu probíhaly v laboratoři divize přesného lití společnosti PBS Velká Bíteš a. s. a ve výzkumném středisku CEITEC Nano.

Metalografická analýza byla provedena u všech variant tepelného zpracování a technologií výroby za účelem zkoumání distribuce fází a struktur v materiálu. Pro analýzu litého materiálu byly testy prováděny z části odlévaných polotovarů (HT-C, HIP-C), doplněn byl vzorek vtoku bez tepelného zpracování. Aditivně vyrobený materiál byl analyzován na podélných řezech tisknutých polotovarů (HT-P, HIP-P).

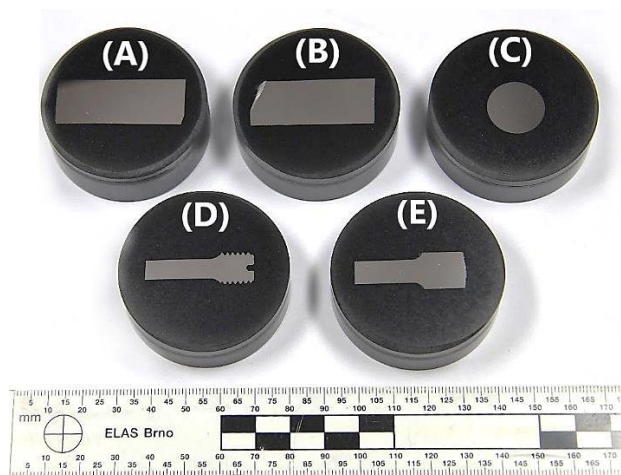
Metalografie pomocí světelné mikroskopie

Pro snímání mikrostruktury materiálu světelnou mikroskopií bylo připraveno celkem 5 vzorků. Pro litý materiál se jednalo o tři varianty zpracování, konkrétně vzorek (A) v odlévaném stavu, vzorek (B) s tepelným zpracováním HT-C a vzorek (C) s tepelným zpracováním včetně operace HIP. Pro analýzu tisknutého materiálu byly vyhrazeny dva vzorky. První tisknutý vzorek, s označením (D) a 30 μm , byl analyzován po tepelném zpracování HT-P, druhý vzorek, s označením (E), s 60 μm výškou vrstvy a tepelným zpracováním HIP-P. Přehledný seznam analyzovaných vzorků byl zpracován do tab. 41.

Tab. 41 Seznam vzorků metalografické analýzy.

Vzorek	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
Technologie výroby a tepelné zpracování	Litý materiál bez tepelného zpracování	Litý materiál (HT-C)	Litý materiál (HIP-C)	Tisknutý materiál (30 μm , HT-P)	Tisknutý materiál (60 μm , HIP-P)

Na obr. 46 jsou zachyceny příslušné vzorky zalisované v pryskyřici před samotným snímáním.

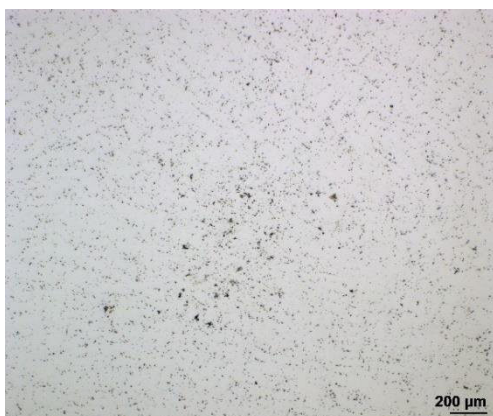


Obr. 46 Zalisované vzorky určené k metalografické analýze.

Vybrané snímky z provedené metalografie byly uvedeny jako obr. 47 až obr. 64. Pro první snímání byly vzorky nejprve vyleštěny a nasnímány pomocí mikroskopu ZEISS AXIO Observer Z1m. Následně proběhlo leptání vzorků v roztoku „Kallings 2“ složeného z 2 g CuCl_2 , 40 ml HCl a 40-80 ml ethanolu a bylo přistoupeno k dalšímu snímání.

Litý materiál

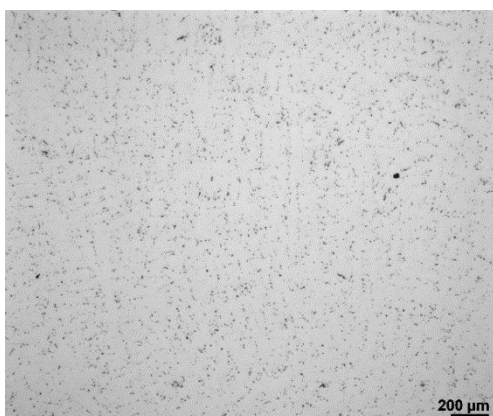
Analýza litého materiálu probíhala na vzorcích nesoucí označení (A), (B) a (C) dle obr. 46. Vybrané snímky jsou uvedeny jako obr. 47 až obr. 58.



Obr. 47 Leštěný litý materiál IN 939 bez TZ (A) zvětšeno 50x.



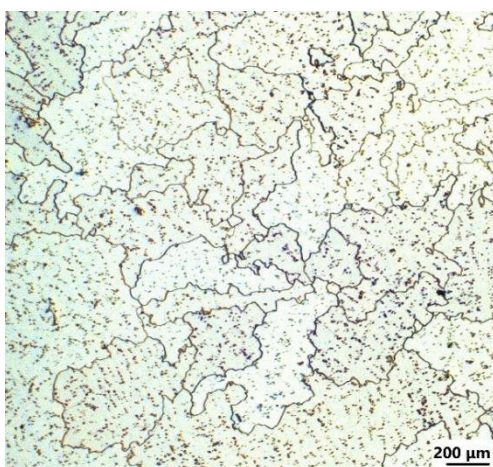
Obr. 48 Leštěný litý materiál IN 939 bez TZ (A) zvětšeno 200x.



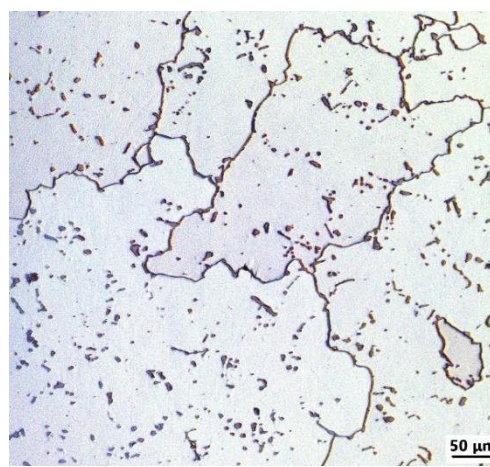
Obr. 49 Leštěný litý materiál IN 939 (HT-C) (B) zvětšeno 50x.



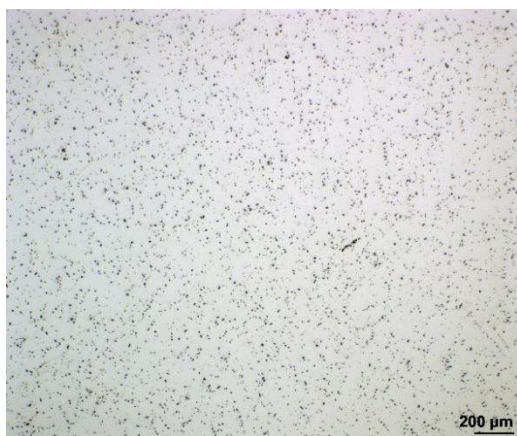
Obr. 50 Leštěný litý materiál IN 939 (HT-C) (B) zvětšeno 200x.



Obr. 51 Leptaný litý materiál IN 939 (HT-C) (B) zvětšeno 50x.



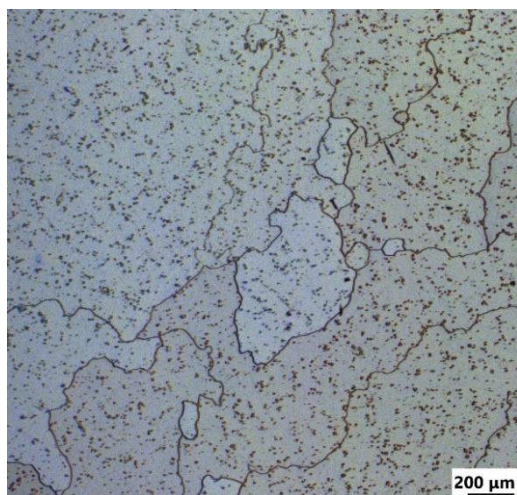
Obr. 52 Leptaný litý materiál IN 939 (HT-C) (B) zvětšeno 200x.



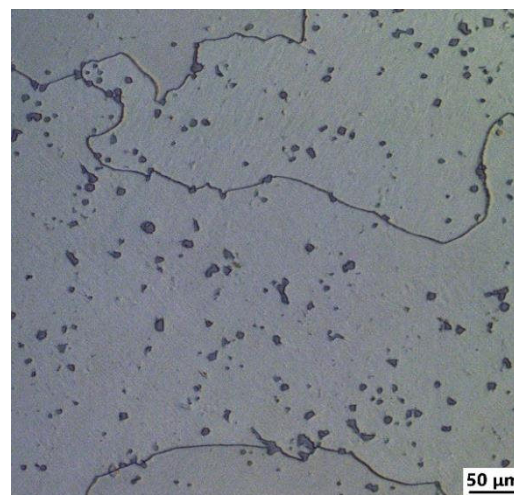
Obr. 53 Leštěný litý materiál IN 939 (HIP-C)
(C) zvětšené 50x.



Obr. 54 Leštěný litý materiál IN 939 (HIP-C)
(C) zvětšené 200x.

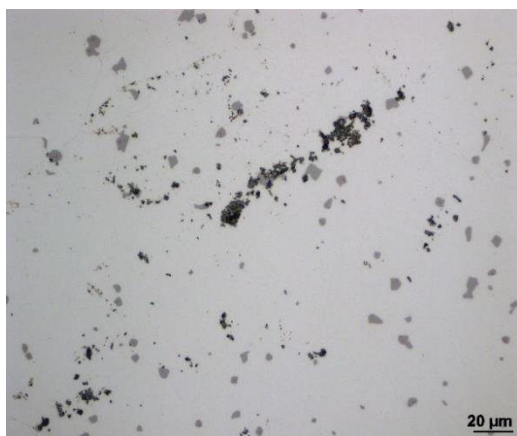


Obr. 55 Leptaný litý materiál IN 939 (HIP-C)
(C) zvětšené 50x.

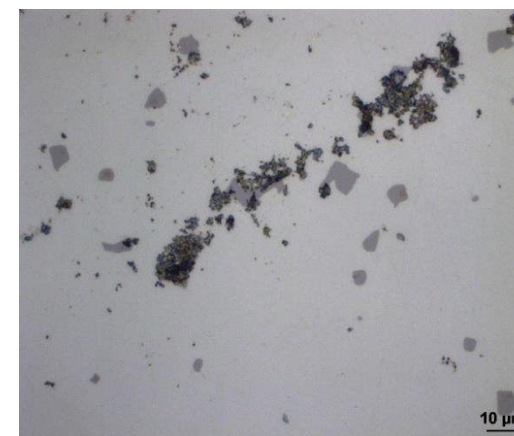


Obr. 56 Leptaný litý materiál IN 939 (HIP-C)
(C) zvětšené 200x.

Nehomogenita materiálu zachycená v litém materiálu s tepelným zpracováním HIP-C na snímku obr. 54 byla podrobena bližšímu zkoumání a bylo provedeno snímkování dané oblasti o vyšším zvětšení (obr. 57 a obr. 58).



Obr. 57 Leštěný litý materiál IN 939 (HIP-C),
(C) zvětšené 500x.



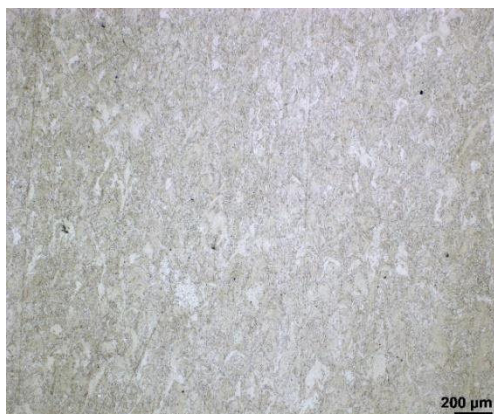
Obr. 58 Leštěný litý materiál IN 939 (HIP-C),
(C) zvětšené 1000x.

Ze získaných snímků s vyšším zvětšením nehomogenity na obr. 54 vyplynulo, že se s největší pravděpodobností jedná o shluk vměstků nekovového původu. Pro přesnější určení původu nečistot by bylo nutné provést podrobnější analýzu defektu včetně zkoumání lokálního chemického složení.

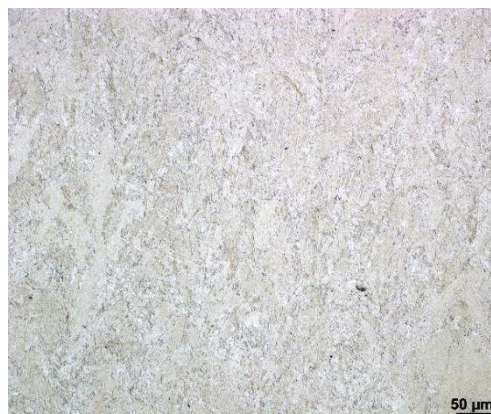
U všech odlévaných vzorků bylo možné pozorovat v celém průřezu řadu ojedinělých běžných slévárenských defektů, jako jsou řediny (obr. 47), vměstky a nečistoty (obr. 58). Množství těchto vad však odpovídalo koncentracím běžně se vyskytujících v odlévané struktuře. Mírné odlišnosti bylo možné pozorovat u materiálů s jednotlivými tepelnými zpracováními. Materiál s tepelným zpracováním HIP-C vykazoval v celé části zkoumaného průřezu známky nižší koncentrace staženin, což bylo přisuzováno právě zařazení izostatického lisování za tepla do jeho tepelného zpracování. U snímků naleptaných vzorků jsou zřetelně rozlišitelné hranice zrn s vyloučenými tvrdými strukturami. Bez podrobnější lokální analýzy složení těchto částic však není možné přesně určit jejich původ. S největší pravděpodobností se však jedná o sekundární karbidy typu $M_{23}C_6$ vzniklé reakcí méně stabilních karbidů typu MC s částicemi fáze γ . Primární karbidy jsou u všech zkoumaných vzorků rozloženy rovnoměrně uvnitř kovové matrice. Přesné určení typu těchto karbidů by vyžadovalo provedení podrobnějších lokálních analýz [37].

Tisknutý materiál

Metalografie tisknutého materiálu byla prováděna na naleptaných vzorcích s označením (D) a (E) dle obr. 46. Vybrané snímky jsou uvedeny jako obr. 59 až obr. 65.



Obr. 59 Leptaný tisknutý materiál IN 939 (HT-P, 30 μm), (D) zvětšeno 50x.



Obr. 60 Leptaný tisknutý materiál IN 939 (HT-P, 30 μm), (D) zvětšeno 200x.



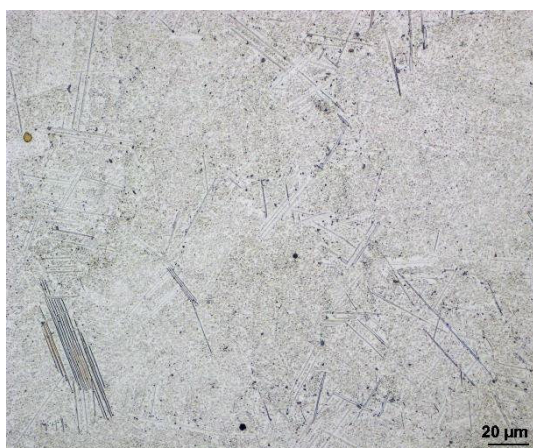
Obr. 61 Leptaný tisknutý materiál IN 939 (HT-P, 30 μm), (D) zvětšeno 500x.



Obr. 62 Leptaný tisknutý materiál IN 939 (HIP-P, 60 μm), (E) zvětšeno 50x.



Obr. 63 Leptaný tisknutý materiál IN 939 (HIP-P, 60 μm), (E) zvětšeno 200x.



Obr. 64 Leptaný tisknutý materiál IN 939 (HIP-P, 60 μm), (E) zvětšeno 500x.



Obr. 65 Leptaný tisknutý materiál IN 939 (HIP-P, 60 μm), (E) zvětšeno 1000x.

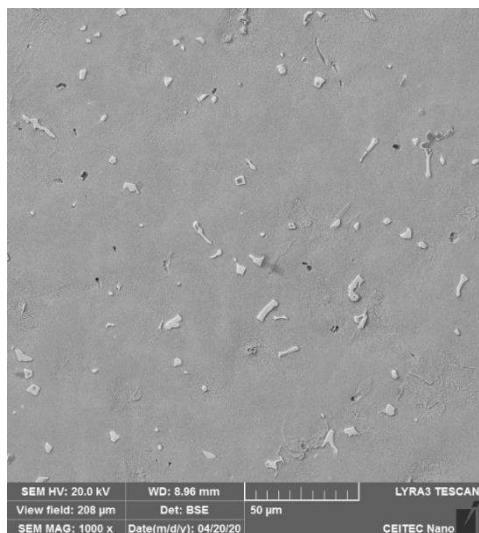
Tisknutý materiál vykazoval oproti litému materiálu vysokou míru homogenity pouze s občasným výskytem plynových staženin (obr. 59).

Metalografie pomocí skenovací elektronové mikroskopie

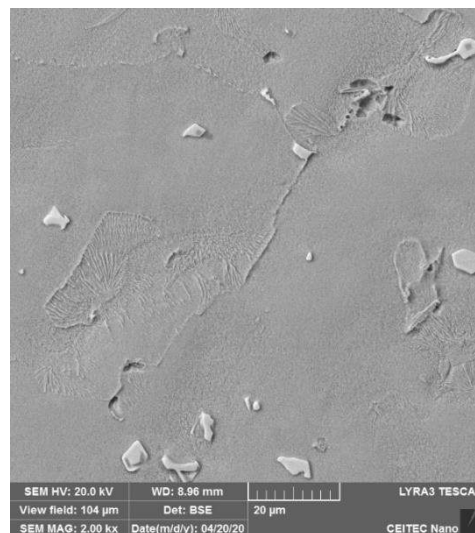
U vybraných vzorků byla provedena metalografie za pomoci skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) LYRA 3 Tescan ve výzkumném centru CEITEC Nano. Snímání bylo prováděno v režimu zpětně odražených elektronů a bylo zaměřeno na hranice zrn a vyloučení sekundárních a primárních karbidů v materiálu. Vybrané snímky z litých vzorků (A), (B), (C) jsou uvedeny jako obr. 66 až obr. 71, vzorky tisknutého materiálu (D) a (E) jako snímky obr. 75 až obr. 80.

Litý materiál

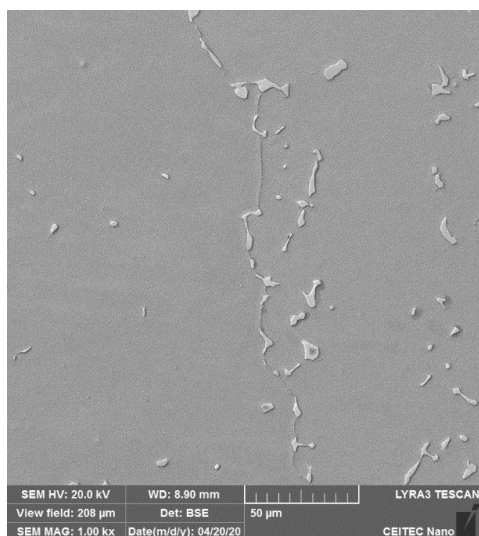
Analýza litého materiálu probíhala na vzorcích nesoucí označení (A), (B) a (C) dle obr. 46.



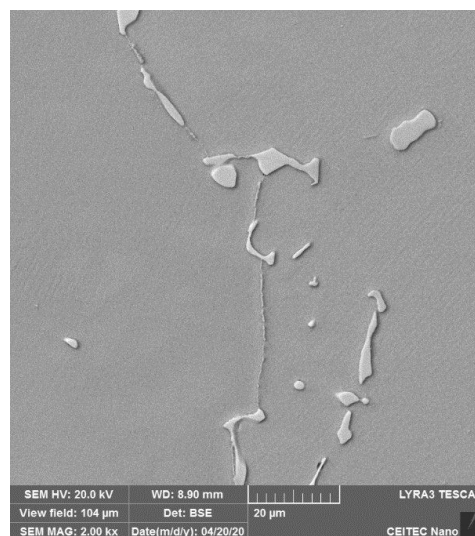
Obr. 66 Litý materiál IN 939 bez TZ,
(A) zvětšeno 1000x.



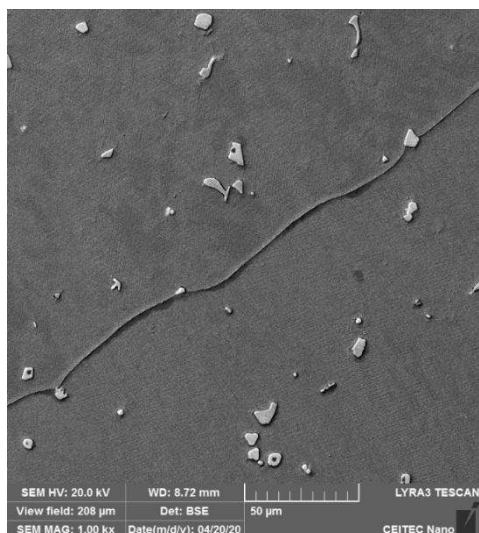
Obr. 67 Litý materiál IN 939 bez TZ,
(A) zvětšeno 2000x.



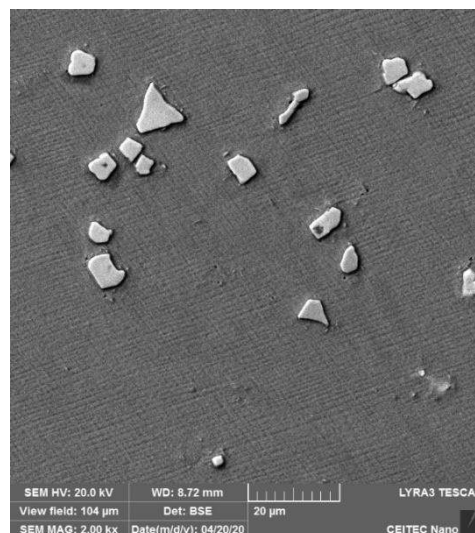
Obr. 68 Litý materiál IN 939 (HT-C),
(B) zvětšeno 1000x.



Obr. 69 Litý materiál IN 939 (HT-C),
(B) zvětšeno 2000x.



Obr. 70 Litý materiál IN 939 (HIP-C),
(C) zvětšeno 1000x.

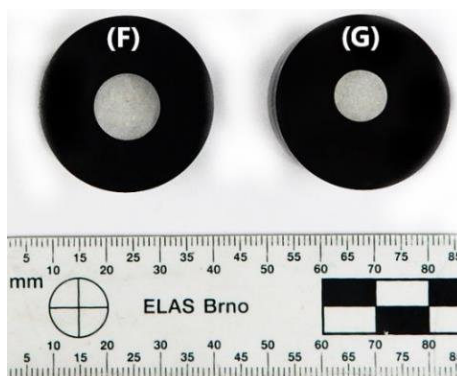


Obr. 71 Litý materiál IN 939 (HIP-C),
(C) zvětšeno 2000x.

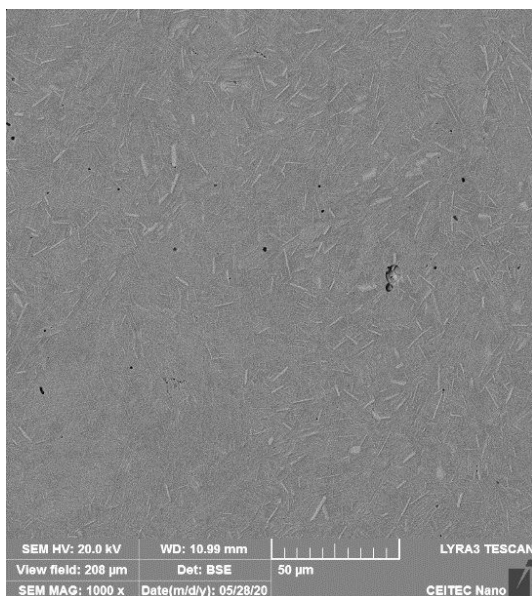
Na obr. 67 tepelně nezpracovaného litého materiálu bylo možné pozorovat lamelárně vyloučené fáze γ a γ' tvořící eutektické buňky vzniklé rychlým chladnutím materiálu během jeho odlévání. Tyto struktury byly u vzorků s tepelným zpracováním odstraňovány pomocí rozpouštěcího žíhání, kde dochází k homogenizaci vnitřní struktury materiálu. Následným stárnutím bylo ovlivněno opětovné vylučování fáze γ' do výhodnější vytvrzující intermetalické struktury uvnitř matrice γ (obr. 71) [37].

Tisknutý materiál

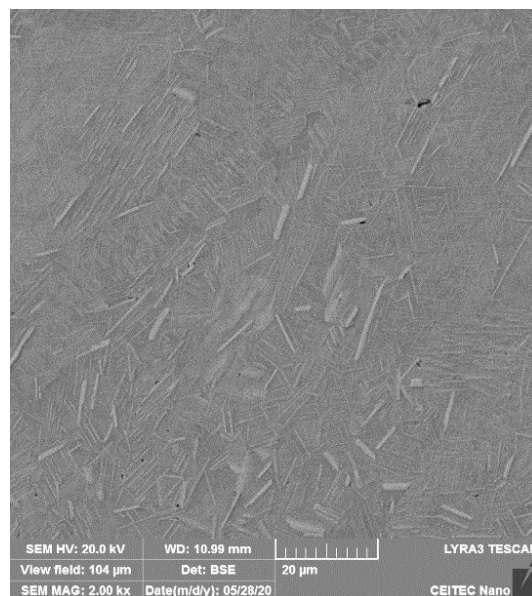
Ke komplexnějšímu zhodnocení tisknutého materiálu byly připraveny doplňující zalisované vzorky vytvořené příčným řezem závitové části zkušební tělesa, u kterých byla provedena metalografie pomocí skenovací elektronové mikroskopie. Vzorky byly označeny písmeny (F) a (G). Snímek takto připravených zalisovaných vzorků byl zanesen jako obr. 72. Výstupy snímání byly uvedeny jako obr. 73 a obr. 80.



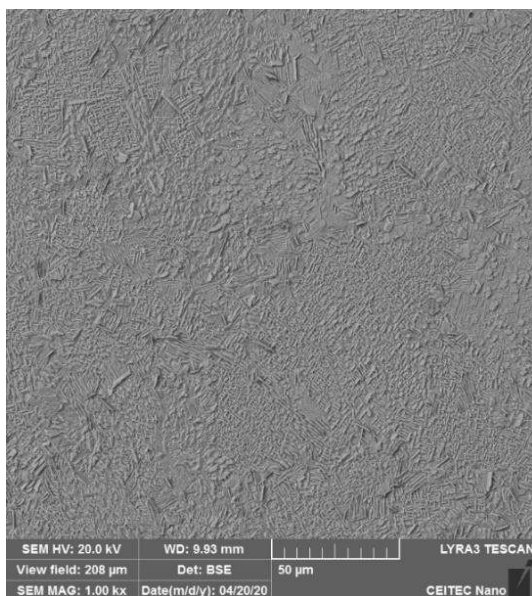
Obr. 72 Zalisované vzorky tisknutého materiálu určené ke snímání mikrostruktury pomocí SEM:
(F) 60 μm výška vrstvy (HIP-C), (G) 30 μm výška vrstvy (HT-C).



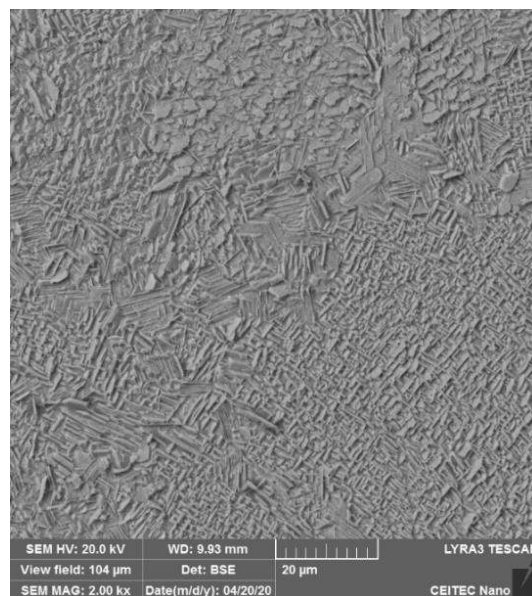
Obr. 73 Tisknutý materiál IN 939
(HT-P, 30 μm), (D) zvětšeno 1000x.



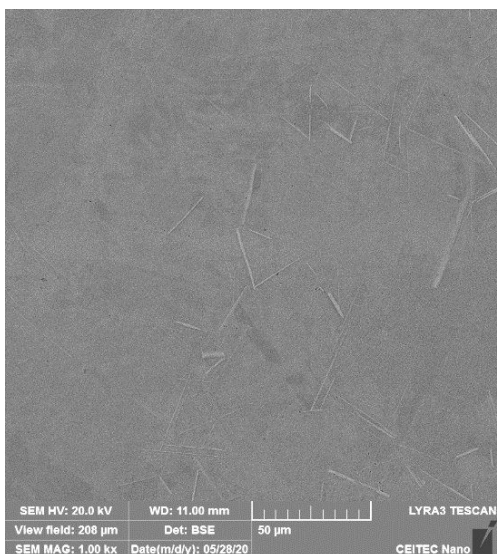
Obr. 74 Tisknutý materiál IN 939
(HT-P, 30 μm), (D) zvětšeno 2000x.



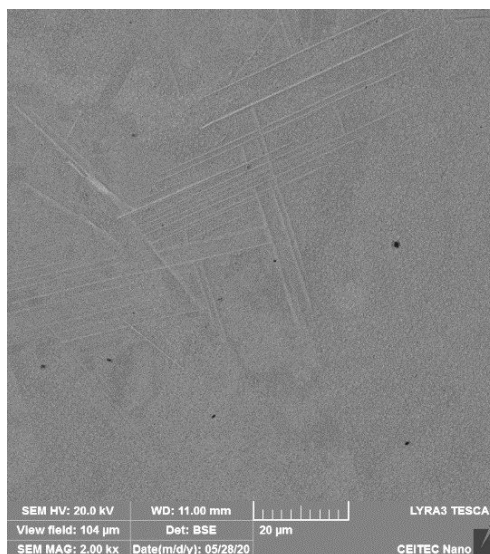
Obr. 75 Tisknutý materiál IN 939
(HT-P, 30 μm), (G) zvětšeno 1000x.



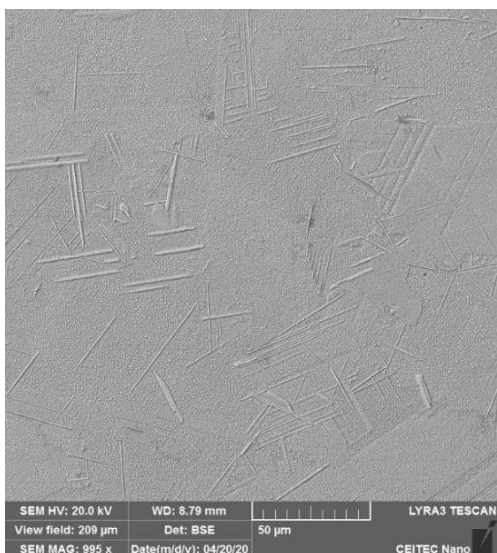
Obr. 76 Tisknutý materiál IN 939
(HT-P, 30 μm), (G) zvětšeno 2000x.



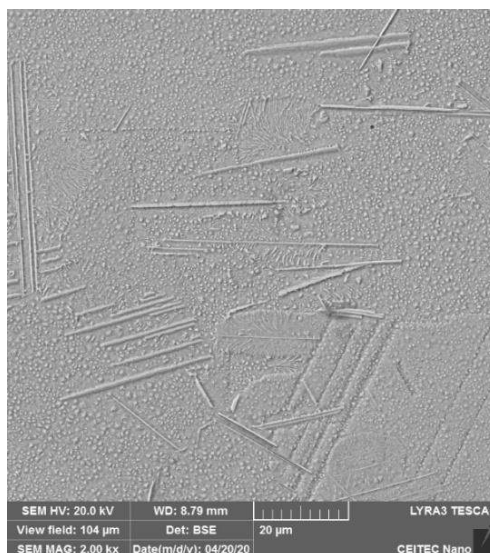
Obr. 77 Tisknutý materiál IN 939
(HIP-P, 60 μm), (E) zvětšeno 1000x.



Obr. 78 Tisknutý materiál IN 939
(HIP-P, 60 μm), (E) zvětšeno 2000x.



Obr. 79 Tisknutý materiál IN 939
(HIP-P, 60 μm), (F) zvětšeno 1000x.



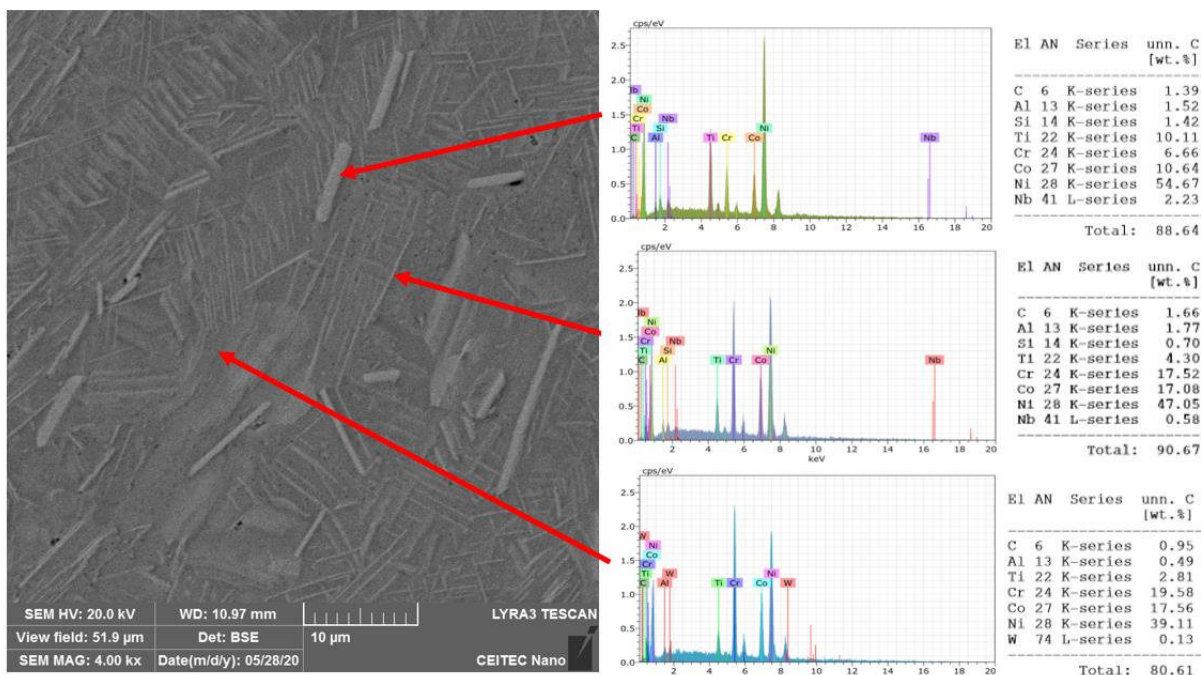
Obr. 80 Tisknutý materiál IN 939
(HIP-P, 60 μm), (F) zvětšeno 2000x.

Ze získaných snímků skenovací elektronové mikroskopie byly patrné výrazné rozdíly mikrostruktury tisknutého a odlévaného materiálového stavu. Hlavní odlišností byla rozdílná velikost a distribuce tvrdých částic. U litého materiálu byly primární karbidy v matici rozmístěny homogenně. U tisknutého materiálu byla jinak homogenní distribuce tvrdých částí narušena jehlicovitými útvary. Pro přesnější určení původu těchto útvarů bylo provedeno následné měření prvkového složení EDX [37].

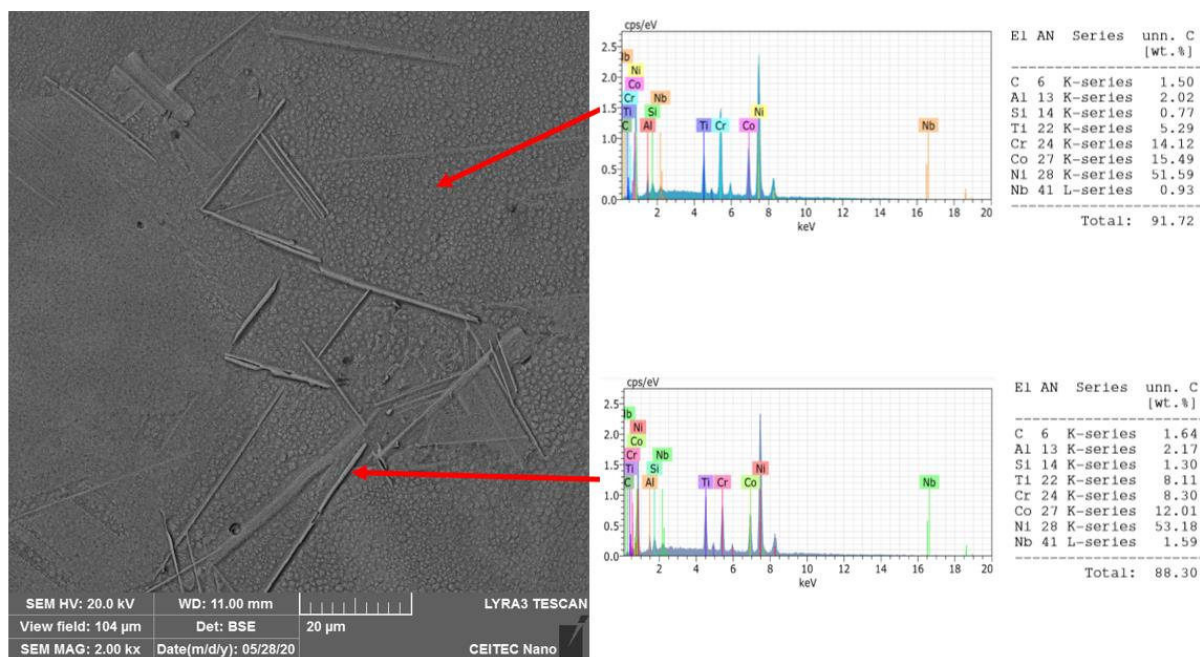
Z výsledných snímků jsou také patrné výrazné rozdíly mezi skladbou mikrostruktury tisknutého materiálu s 30 a 60 μm vrstvou. Na snímcích obr. 75 a obr. 79 je možné pozorovat rozdílné velikosti vyloučených tvrdých fází a rozdílné rozmístění i velikosti jehlicovitých útvarů, které v případě 30 μm výšky vrstvy dosahovaly velikosti pouze několika mikrometrů (obr. 76) avšak u materiálu s 60 μm výškou vrstvy se jejich délka pohybovala v řádech desítek mikrometrů (obr. 80).

6.4 Analýza prvkového složení pomocí analýzy EDX

Za účelem určení chemického složení jehlicových útvarů objevených v mikrostruktuře tisknutého materiálu bylo provedeno podrobnější zkoumání pomocí technologie EDX implementované ve skenovacím elektronovém mikroskopu LYRA 3 Tescan ve výzkumném centru CEITEC Nano. Snímkování proběhlo ze vzorků obou materiálových stavů tisknutého materiálu. Pro skenování materiálu s 30 μm výškou vrstvy byl využit vzorek s označením (D), pro analýzu vzorků s 60 μm výškou vrstvy byl vyhrazen vzorek s označením (E). Kompletní protokoly provedeného měření byly zaneseny jako příloha 3.



Obr. 81 Zpracované výsledky EDX analýzy tisknutého materiálu (30 μm , HT-P).



Obr. 82 Zpracované výsledky EDX analýzy tisknutého materiálu (60 μm , HIP-P).

Ze získaných výstupů EDX analýzy vyplynula zvýšená koncentrace uhlíku, titanu a niobu v oblasti vyloučených jehlic korelující se sníženým obsahem chromu. Koncentrace chromu naopak výrazně zastupovala chemické složení okolní kovové matrice. Zvýšená koncentrace niobu uvnitř jehlic odpovídá standardně tvořené TCP fázi sigma vznikající u odlévaných materiálů. Tyto fáze jsou tvořeny právě jehlicovými útvary Ni_3Nb . Přesné určení odhalených struktur by však vyžadovalo provedení detailnější analýzy.

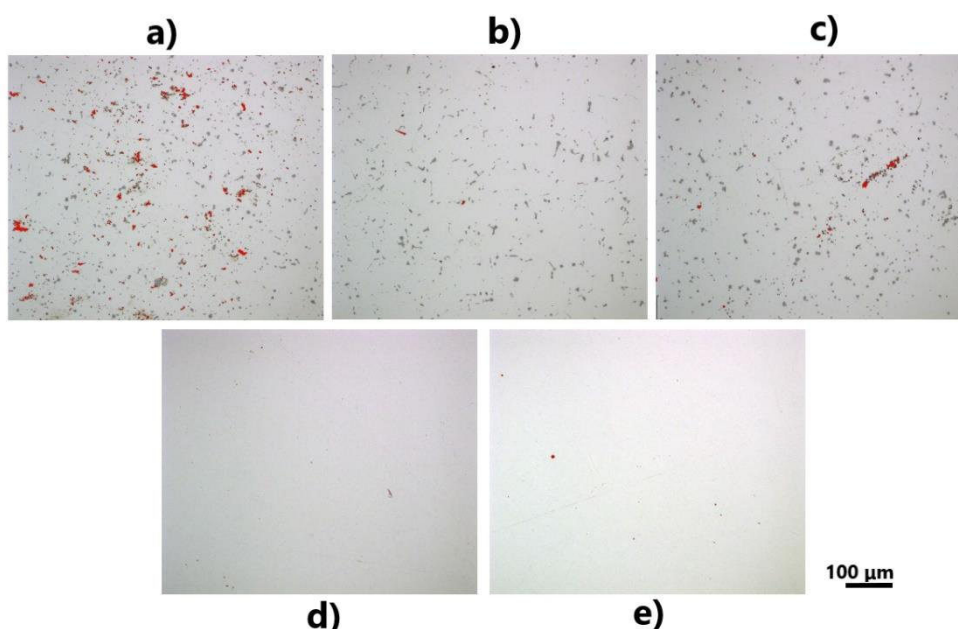
6.5 Mikročistota materiálu

U vybraných snímků ze světelné metalografie byla pomocí programu AxioVision vyhodnocena mikročistota zaměřená na množství vměstků a staženin. U litého i tisknutého materiálu bylo zkoumání zaměřeno na oblasti s největší koncentrací staženin a nečistot. Číselné výsledky mikročistoty jednotlivých materiálů byly zaneseny do tab. 42. Původní snímky s automaticky vyznačenými nečistotami a vměstkami jsou uvedeny jako obr. 83.

Tab. 42 Výsledky mikročistoty zkoumaných vzorků.

Vzorek	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
Technologie výroby a tepelné zpracování	Litý materiál bez tepelného zpracování	Litý materiál (HT-C)	Litý materiál (HIP-C)	Tisknutý materiál (30 μm , HT-P)	Tisknutý materiál (60 μm , HIP-P)
Mikročistota [%]	0,7342	0,0190	0,1193	0,0004	0,0121

Z důvodů zachování vyhodnocovaného průřezu jsou snímky s výstupy programu uváděny bez příslušných měřítek s červeně vyznačenými staženinami a vměstkami. Analyzovaný průřez odpovídal rozměrům 650 x 550 μm .



Obr. 83 Snímky po analýze mikročistoty s červeně vyznačenými nehomogenitami a vměstkami: a) vzorek (A), b) vzorek (B), c) vzorek (C), d) vzorek (D), e) vzorek (E), zvětšeno 200x.

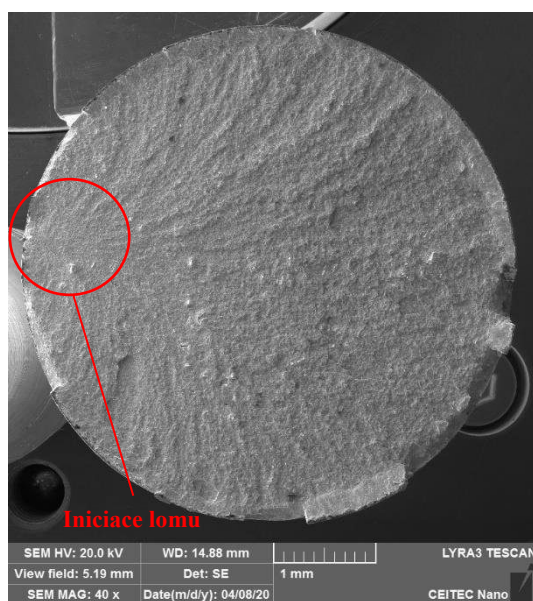
6.6 Fraktografická analýza lomových ploch

U vybraných vzorků byla realizována elektronová mikroskopie zaměřená na analyzování lomových ploch po provedených mechanických zkouškách. Ke studiu morfologie povrchu všech vzorků byl využit skenovací elektronový mikroskop LYRA 3 Tescan ve výzkumném centru CEITEC Nano.

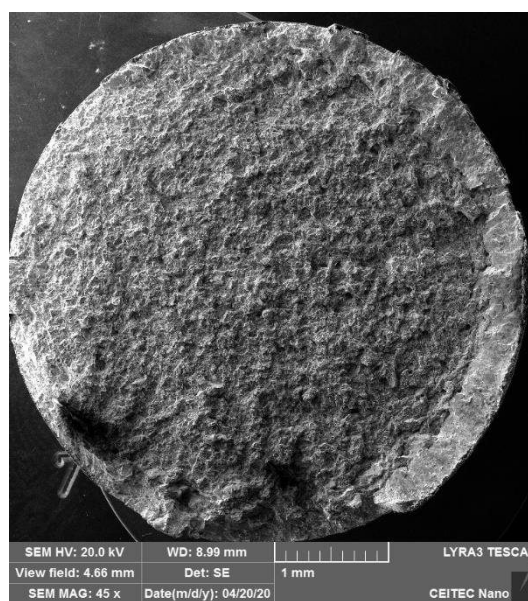
Obrobené vzorky byly před samotným skenováním očištěny v ultrazvukové čističce. Ke zkoumání lomových ploch po provedených tahových zkouškách za pokojové teploty byly vybrány vždy vzorky s nejnižšími výstupy smluvní meze kluzu. Konkrétně se jednalo o vzorky P-RT-5, C-RT-3, C-RT-5 z výstupů zpracovaných v kapitole 5.3.1 a vzorek P-RT-6 jako zástupce tisknuté varianty s kombinací 60 μm výškou vrstvy a operace HIP z kapitoly 5.4.1. Sada byla doplněna o vzorek P-RT-11 pro zkoumání rozdílů v lomové ploše vzorků vyrobených v orientaci X/Y a Z (kapitola 5.4.4).

6.6.1 Tisknuté vzorky po tahové zkoušce za pokojové teploty (HT-P, HIP-P)

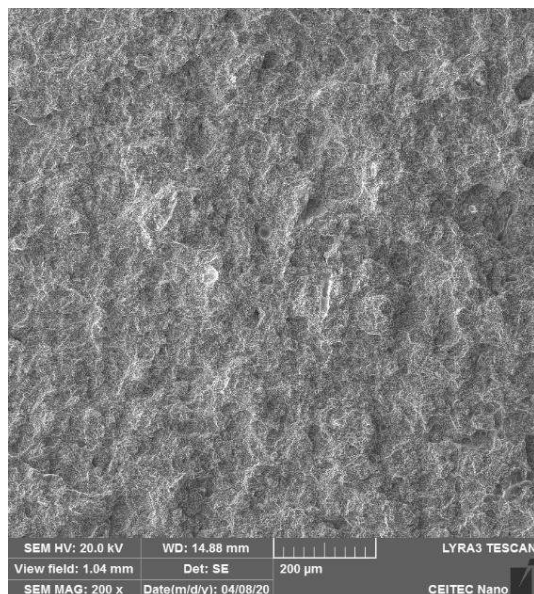
Pro účely fraktografické analýzy tisknutého materiálu po tahové zkoušce za pokojové teploty byly vybrány vzorky s označením P-RT-5 a P-RT-6, které dosahovaly nejnižších hodnot smluvní meze kluzu z provedených tahových zkoušek.



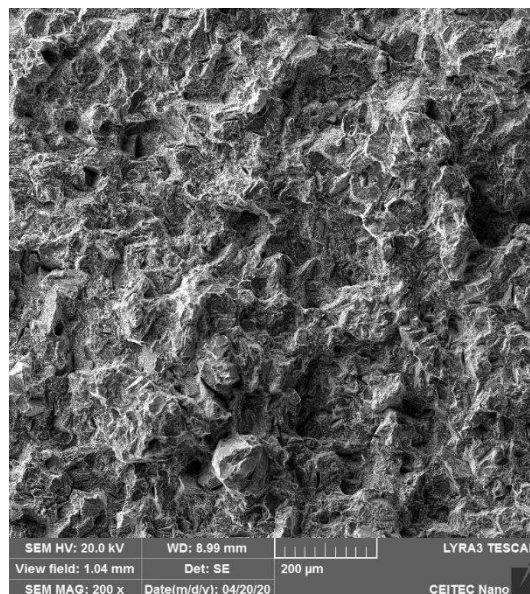
Obr. 84 Vzorek P-RT-5 (30 μm)
zvětšeno 40x.



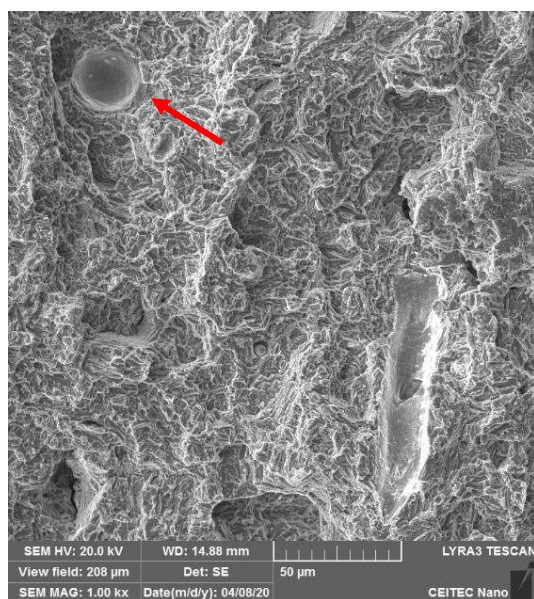
Obr. 85 Vzorek P-RT-6 (60 μm)
zvětšeno 45x.



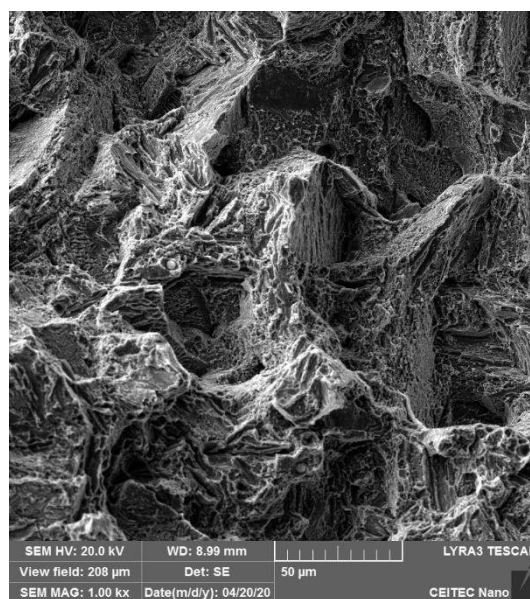
Obr. 86 Vzorek P-RT-5 (30 μm)
zvětšeno 200x.



Obr. 87 Vzorek P-RT-6 (60 μm)
zvětšeno 200x.

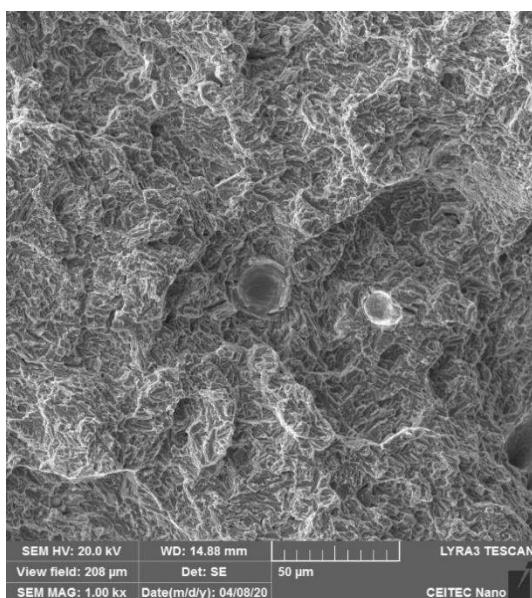


Obr. 88 Vzorek P-RT-5 (30 μm)
zvětšeno 1000x.

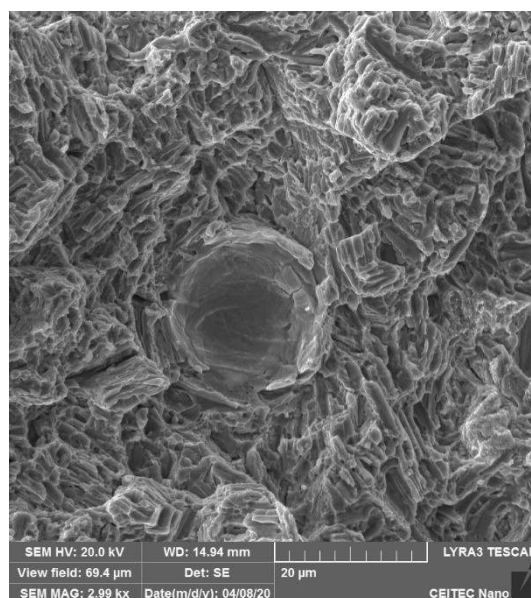


Obr. 89 Vzorek P-RT-6 zvětšeno (60 μm)
zvětšeno 1000x.

Po podrobnějším zkoumání vzorku bylo další snímání zaměřeno na vady tisknutého materiálu zachycené obr. 88, kde proběhlo detailnější snímkování kulovité dutiny.



Obr. 90 Vzorek P-RT-5 (30 µm)
zvětšeno 1000x.

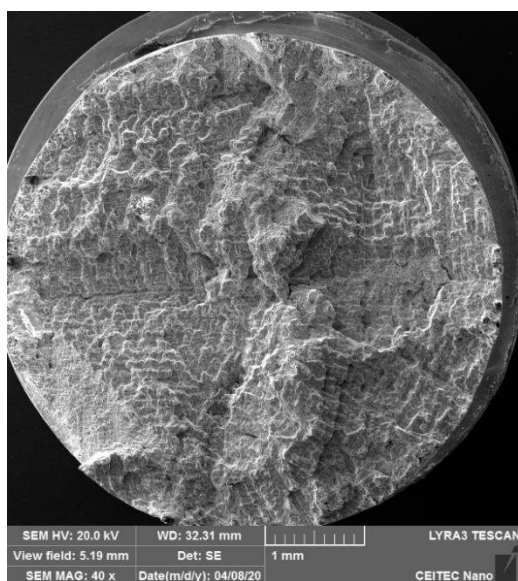


Obr. 91 Vzorek P-RT-5 (30 µm)
zvětšeno 3000x.

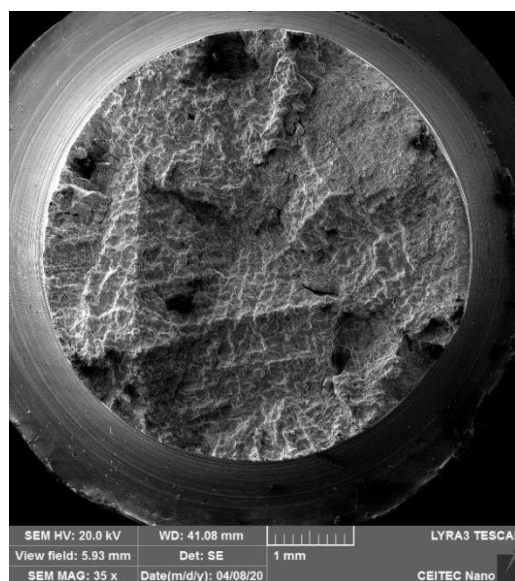
Morfologie tisknutého materiálu vykazuje známky tvárných lomů. Na obr. 84 je patrná iniciace lomu na povrchu vzorku s postupným šířením vzniklé trhliny. Pravdivost tohoto závěru potvrzuje i lasturová morfologie šíření trhliny v celém průřezu vzorku. Kulová dutina na obr. 91 byla určena jako otisk neroztavené částice kovového prášku, která během procesu tisku zůstala zachycena uvnitř materiálu a po provedené tahové zkoušce, byla z materiálu uvolněna. Pro zjištění přesné příčiny vzniku této dutiny by bylo nutné provedení podrobnějších analýz.

6.6.2 Lité vzorky po tahové zkoušce za pokojové teploty (HT-C, HIP-C)

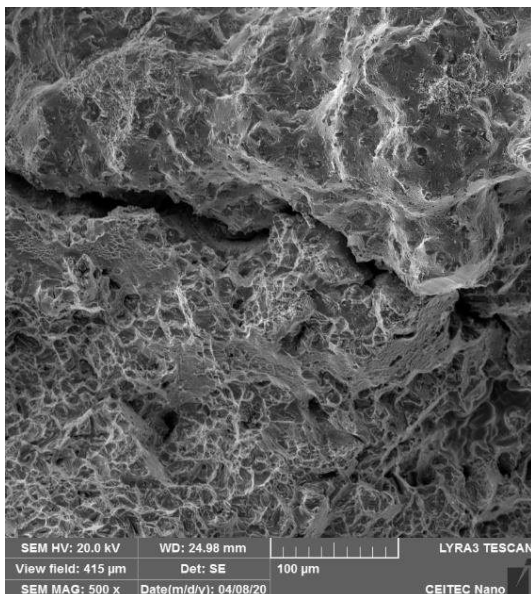
Pro účely fraktografické analýzy litého materiálu po tahové zkoušce za pokojové teploty byly vybrány vzorky s označením C-RT-3 a C-RT-5, které dosahovaly nejnižších hodnot smluvní meze kluzu z provedených tahových zkoušek.



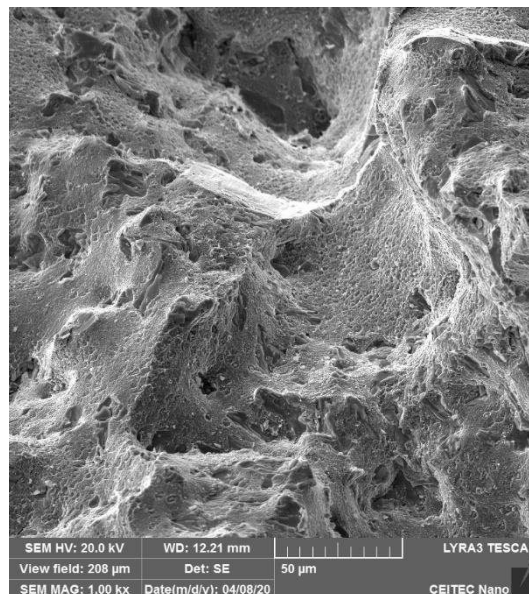
Obr. 92 Vzorek C-RT-3 zvětšeno 40x.



Obr. 93 Vzorek C-RT-5 zvětšeno 35x.



Obr. 94 Vzorek C-RT-3 zvětšeno 500x.



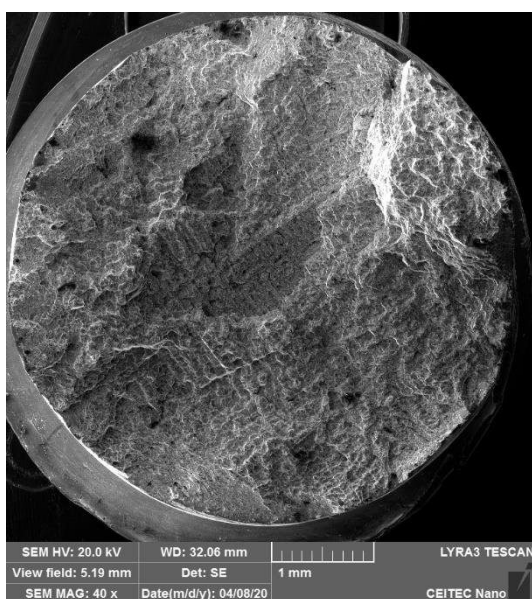
Obr. 95 Vzorek C-RT-5 zvětšeno 1000x.

Litý materiál IN 939 nese známky tvárného lomu s jemnými jamkami. U zkoumaného vzorku (obr. 94) bylo možné pozorovat pozůstatky sekundárních trhlin vzniklých na hranici zrn, které při tahové zkoušce vystoupily do lomové plochy magistrální trhliny.

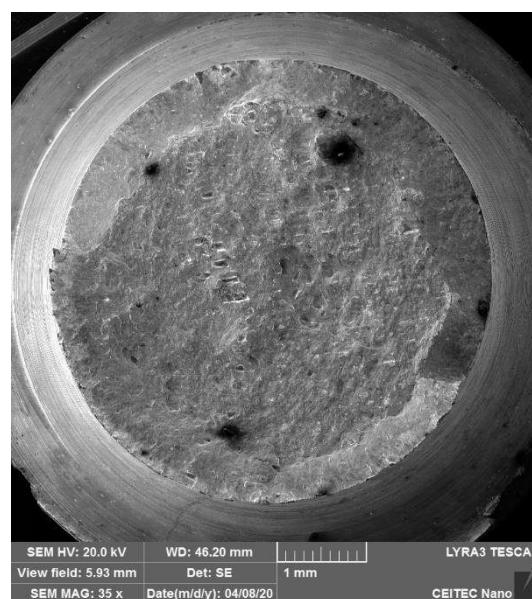
Vzorky zpracované technologií HIP vykazovaly známky tvárného lomu. Fazety vystupující do lomové plochy litého vzorku (obr. 93) nasvědčují o šíření trhlin po rozhraní dendritů a hranicích zrn.

6.6.3 Litý a tisknutý vzorek po tahové zkoušce za zvýšené teploty (HT-C, HT-P)

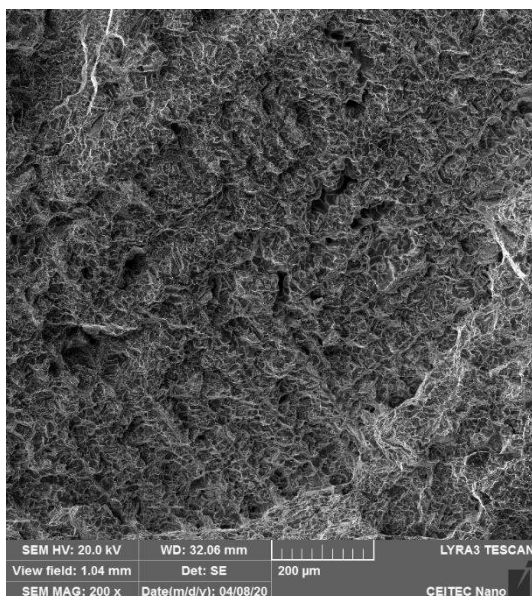
Studium morfologie lomových ploch bylo provedeno i u dvou vzorků po tahové zkoušce za zvýšené teploty 649 °C. Konkrétně se jednalo o vzorek P-ET-3 jakožto zástupce aditivní technologie a vzorek C-ET-2 pro zkoumání lomové plochy odlévaného materiálu.



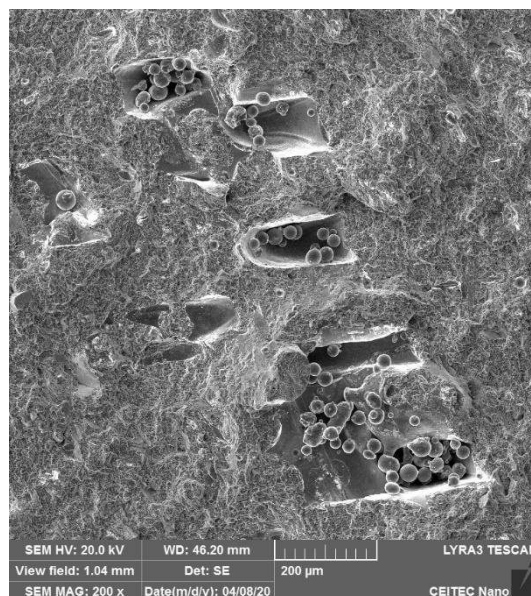
Obr. 96 Vzorek C-ET-2 zvětšeno 40x.



Obr. 97 Vzorek P-ET-3 zvětšeno 35x.

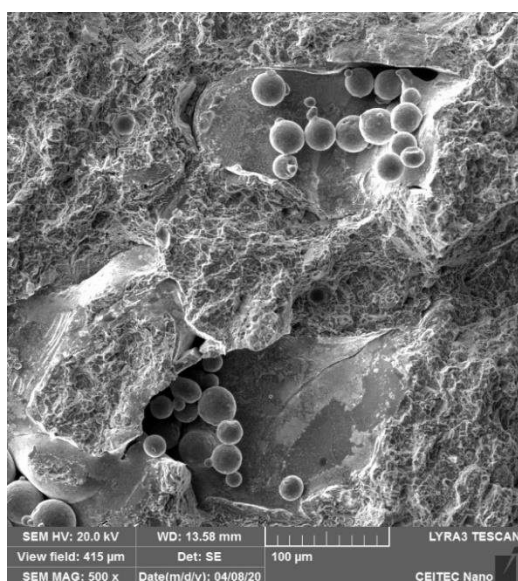


Obr. 98 Vzorek C-ET-2 zvětšeno 200x.

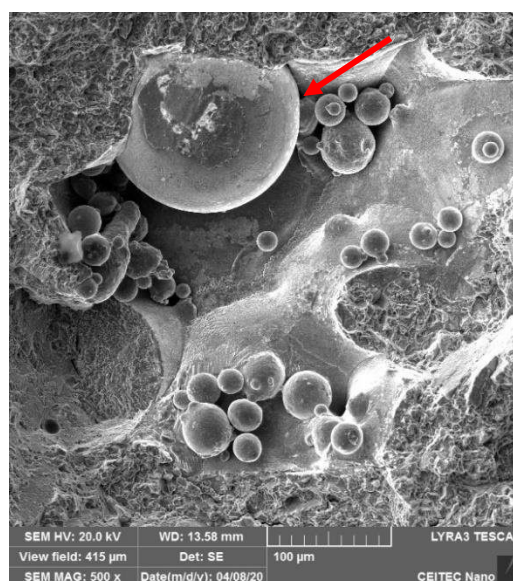


Obr. 99 Vzorek P-ET-3 zvětšeno 200x.

Při vyhodnocování lomových ploch tisknutého vzorku bylo další zkoumání zaměřeno na objevené staženiny s kulovými částicemi zachycené na obr. 99.



Obr. 100 Vzorek P-ET-3 zvětšeno 500x.

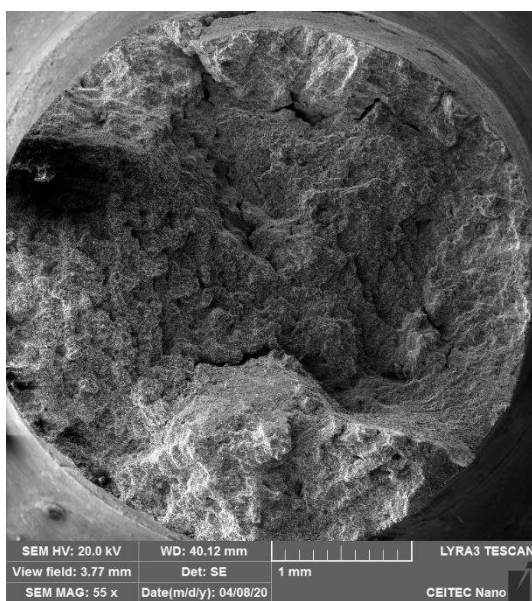


Obr. 101 Vzorek P-ET-3 zvětšeno 500x.

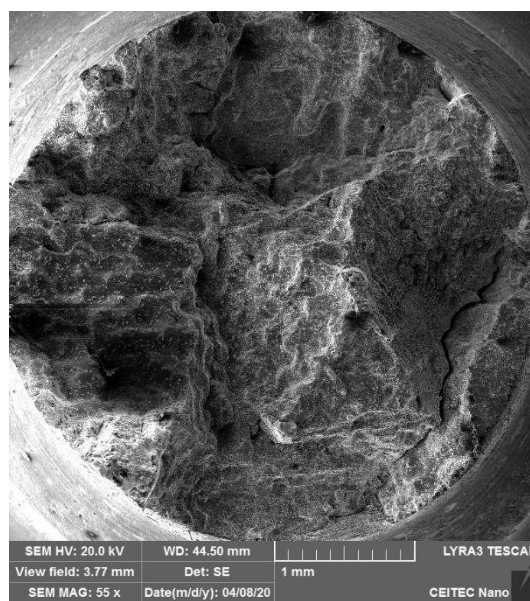
Bližší analyzované kulové artefakty nacházející se ve staženině tisknutého materiálu byly určeny jako partikulárně roztavené částice kovového prášku zachycené v průběhu tisku uvnitř staženin materiálu. Výrazně větší částice zachycená na snímku obr. 101 však neodpovídá garantovaným rozměrům práškových částic stavebního materiálu, které se pohybují mezi 10 až 45 µm. Může se tedy jednat o kontaminaci kovového prášku jinou částicí před samotnou výrobou vzorku, či částicí kovového prášku nespĺňující nastavené rozměrové limity. Přesnější zjištění původu této částice by vyžadovalo provedení podrobnější analýzy.

6.6.4 Lité vzorky po zkoušce pevnosti při tečení (HT-C)

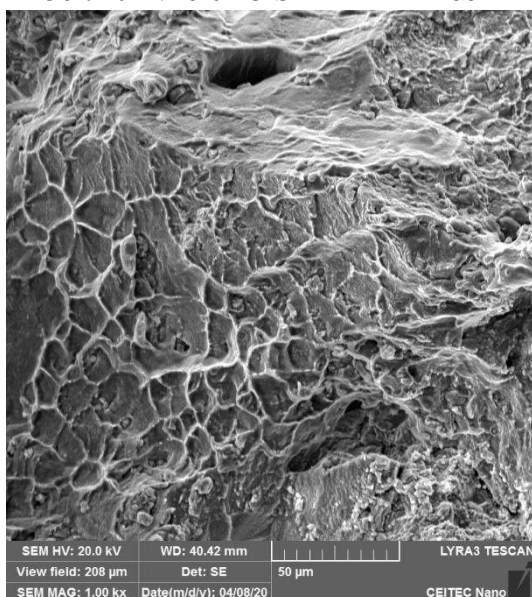
Závěrem analýzy lomových ploch byly výstupy doplněny o snímky lomových ploch litých vzorků po testech pevnosti při tečení. Jednalo se o vzorky s nejvyšší a nejnižší výdrží při tepelném zpracování HT-C, tedy vzorky C-SR-1 s výdrží dosahující 153 h a vzorek C-SR-3 jehož výdrž dosahovala doby 79 h. Pro porovnání s tisknutým materiálem byla nasnímána i lomová plocha vzorku P-SR-3.



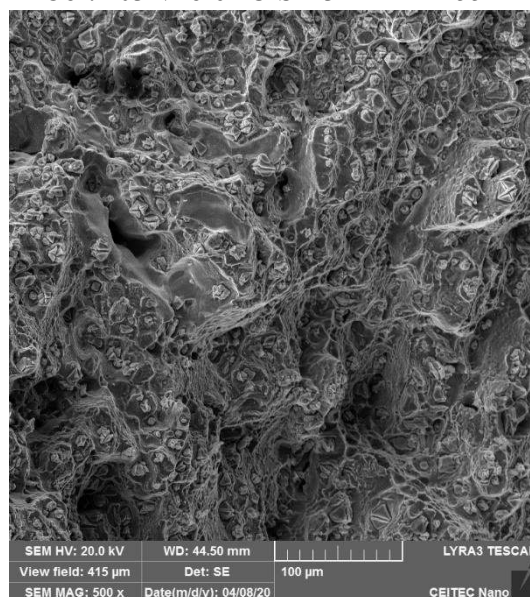
Obr. 102 Vzorek C-SR-1 zvětšeno 55x.



Obr. 103 Vzorek C-SR-3 zvětšeno 55x.

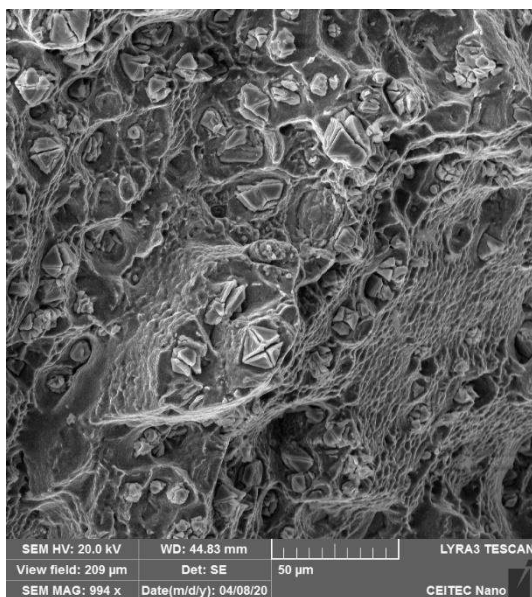


Obr. 104 Vzorek C-SR-1 zvětšeno 1000x.

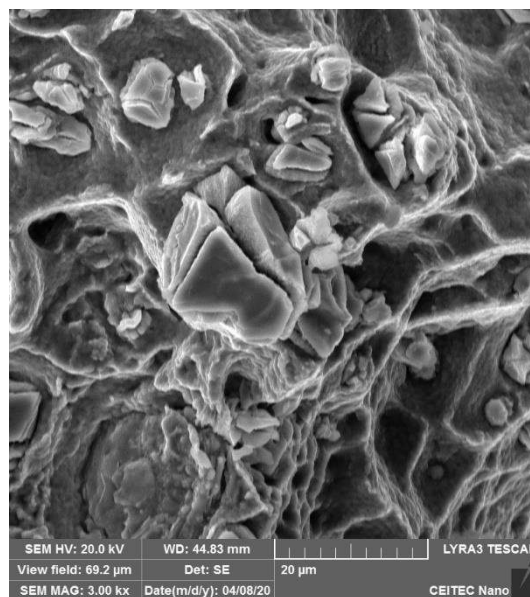


Obr. 105 Vzorek C-SR-3 zvětšeno 500x.

Po bližším prozkoumání obr. 105 bylo rozhodnuto o dalším snímkování této oblasti s větším zvětšením. Byly vyhotoveny snímky se zvětšením 1000x a 3000x.



Obr. 106 Vzorek C-SR-3 zvětšeno 1000x.

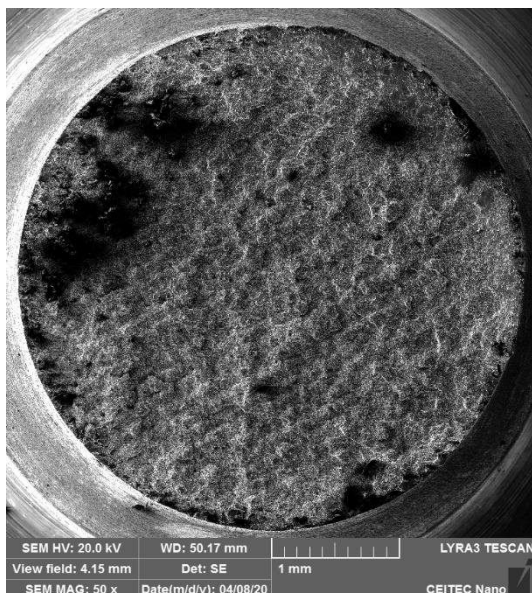


Obr. 107 Vzorek C-SR-3 zvětšeno 3000x.

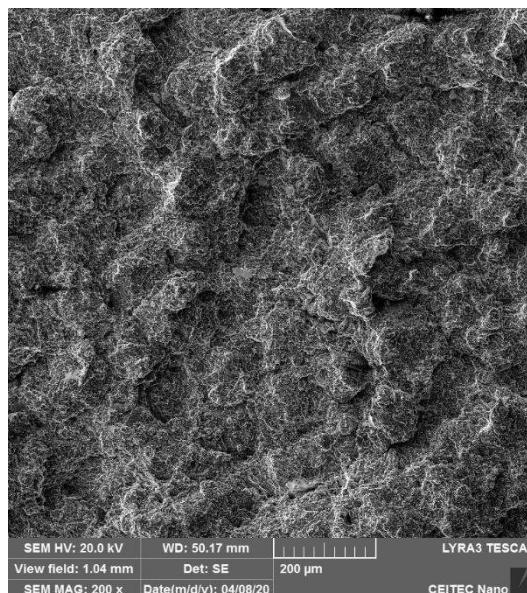
Na lomových plochách litých vzorků nebylo možné určit jasnou příčinu rozdílné hodnoty výdrže obou vzorků. Morfologie lomových ploch nevykazovala žádné patrné známky výrazných odlišností. Na doplňkových snímcích s vyšším zvětšením byly zachyceny tvrdé, křehké částice. S největší pravděpodobností se jedná o primární karbidy vyloučené v základní matici. Nejpravděpodobnějším mechanismem porušení vzorků byly místní kavitační lomy v oblasti vyloučených karbidů, u kterých došlo po aplikaci zatížení k jejich křehkému porušení. Kvůli lokálnímu překročení meze kluzu došlo ke kondenzaci vakancí, působící jako kondenzátor napětí, následované tvorbou tvárného lomu v blízkosti karbidu. Na obr. 104 bylo možné také pozorovat pozůstatky kavitačního mechanismu v podobě mapy tvořené tvárně dolomenými lemy okolo hladkých kavitačních ploch. Pozůstatky mechanismu kavitačního lomu byly zachyceny na obr. 107.

6.6.5 Tisknutý vzorek po zkoušce pevnosti při tečení (HT-P)

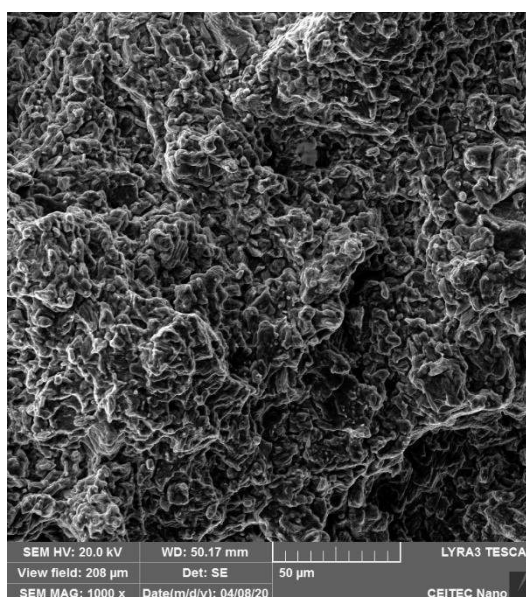
Zkoumání morfologie lomových ploch bylo doplněno o analýzu tisknutého materiálu s tepelným zpracováním HT-P po zkoušce pevnosti při tečení.



Obr. 108 Vzorek P-SR-3 zvětšeno 50x.



Obr. 109 Vzorek P-SR-3 zvětšeno 200x.

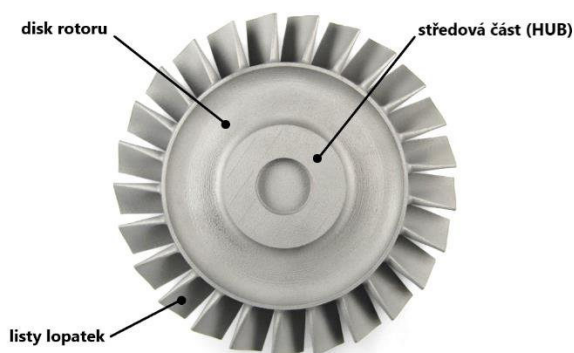


Obr. 110 Vzorek P-SR-3 zvětšeno 1000x.

Morfologie lomové plochy tisknutého materiálu vykazovala znaky větší homogenity bez staženin či ředin. Jemnější struktura materiálu může být právě jednou z příčin nevyhovující odolnosti tisknutého materiálu při jeho tečení. Význam nese v tomto ohledu velikost a distribuce zm, respektive množství hranic mezi nimi. Při jemné struktuře, kterou je možné pozorovat u tisknutého materiálu, dochází velmi snadno k mechanismům tečení [38].

7 VÝROBA A TESTOVÁNÍ OBĚŽNÉHO KOLA TURBÍNY S5L

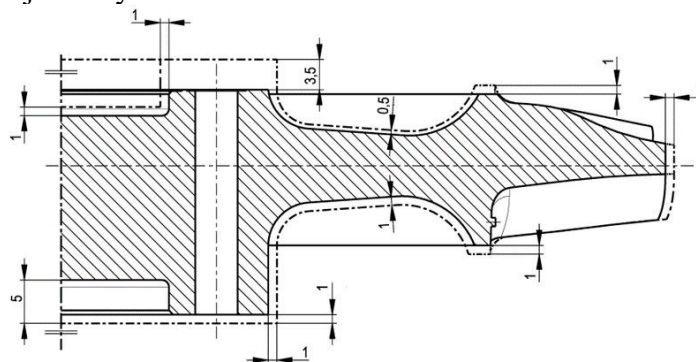
Prvním krokem výrobního procesu oběžného kola byla samotná konstrukce jeho modelu určeného k aditivní výrobě. Po dokončení výroby byla komponenta podrobena řadě analýz, které měly za úkol určit použitelnost vyrobeného dílu pro jeho testování. Prvním krokem k verifikaci využitelnosti podstoupilo kolo geometrické skenování, jehož výstupy jsou zpracovány v kapitole 7.3. Po následné vizuální kontrole bylo provedeno snímkování zevních vad na vnějším povrchu kola. Pro možnosti podrobnější analýzy povrchu došlo také ke zhotovení makrosnímků listů lopatek. Snímek oběžného kola s popisem jednotlivých částí je uveden jako obr. 111.



Obr. 111 Snímek integrálně litého axiálního turbínového kola.

7.1 Konstrukční část projektu

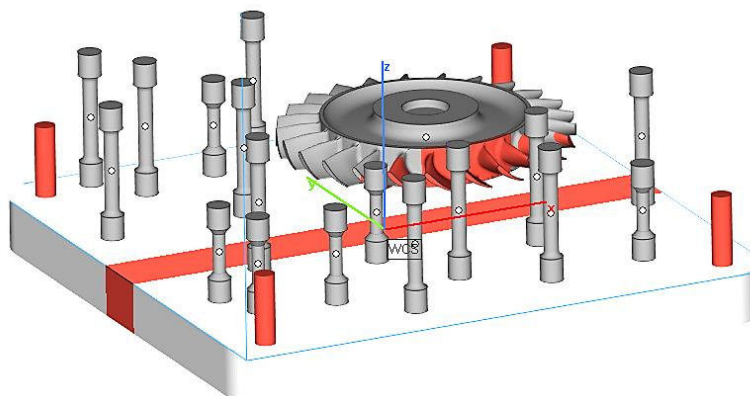
Komponenty turbín proudových motorů jsou výhradně vyráběny technologií přesného lití. Tento konvenční způsob výroby je charakterizovaný velmi specifickými konstrukčně technologickými požadavky. Už při samotné výrobě je nutné počítat se smrštěním voskových modelů a technologickými požadavky na vtakování, které se promítají například jako pozůstatky nálitků na odlitku. Své požadavky má i smrštění samotného odlévaného kovu při jeho tuhnutí. Jelikož se kovový 3D tisk od konvenčního odlévání principiálně liší, bylo nutné při konstrukci tisknutého polotovaru vycházet z výchozího modelu sestavy. Při zhotovování nového modelu polotovaru byl z důvodů upínací plochy při obrábění navýšen technologický přídavek na jednom z čel z 1 mm na 3,5 mm. Další významným odchýlením od standardně využívaného modelu pro odlévání byla absence procentuálního zvětšení modelu o hodnoty smrštění, kde ze samotné podstaty metody využívající spékání tenkých vrstev na tiskovém lůžku vrstvu po vrstvě nedochází k takovým objemovým transformacím jako při odlévání. Schéma se značeným přídavkováním kola je zachyceno na obr. 112.



Obr. 112 Schéma zvolených přídavků modelu axiálního kola.

7.2 Výroba oběžného kola

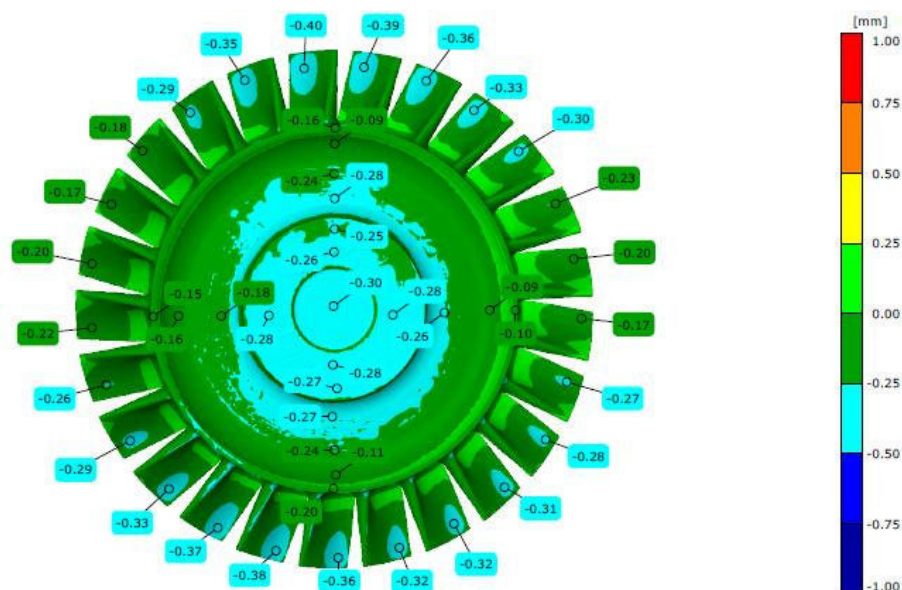
Výroba probíhala v jednom pracovním cyklu se vzorky P1 – P6, P1H – P5H a P1C – P6C (obr. 113 s rozmístěním vzorků při tisku) na zařízení společnosti SLM Solutions využívající metodu Selective Laser Melting s výškou vrstvy 30 μm . Kolo bylo dodáno po odstranění podpor a otryskání karbidy hliníku (korundem) a bylo podrobeno řadě analýz a zkoumání, která měla potvrdit vhodnost tisknutého dílu pro testování v reálné aplikaci.



Obr. 113 Rozložení modelů na tiskové platformě (30 μm).

7.3 Geometrické skenování oběžného kola

Jedním z hlavních parametrů určující využitelnost oběžného kola pro testování v reálné aplikaci byla rozměrová přesnost. Skenování oběžného kola proběhlo na přístroji ATOS Gom na pracovišti technické kontroly společnosti PBS Velká Bíteš, a. s. Na základě výstupů byl vyhotoven protokol (příloha 2) včetně vynesení zvolených bodů s odchylkami. Do práce byly zaneseny snímky obou čel a snímky meridiánů tisknutého prototypu.



Obr. 114 Výstupy skenu čelní plochy z náběžné strany kola.

7.4 Struktura povrchu tisknutého oběžného axiálního kola

Dalším z hlavních parametrů určující využitelnost aditivní technologie v žárupevných aplikacích je struktura povrchu. U měření prováděného v bakalářské práci byla zjištěna výrazná závislost mezi strukturou povrchu a tiskové orientací vzorku. Zhoršenou strukturou povrchu se vyznačují především plochy tvořené převisy vzniklé propékáním nové vrstvy materiálu do předchozí vrstvou neroztaveného prášku. Tento jev bylo možné pozorovat na tisknutých polotovarech pro testování mechanických vlastností na ploše vznikající zvětšováním průměru spékané plochy při tvorbě části tělesa určené pro následné obrobení závitu. [1]

Dalším pozorovaným jevem byl takzvaný *schodovitý efekt*, který je vytvářen na součásti při změnách jednotlivých vrstev tisku. Při výrobě ploch se zakřivenou vnější geometrií vůči základové platformě dochází v kombinaci s výškou vrstvy ke vzniku geometrické nepřesnosti. Tento jev byl již podrobněji popsán v bakalářské práci a v kapitole 5.4 [1].

Při prvotním vizuálním ohledání vytisknutého oběžného kola se tyto úkazy zcela zřetelně projeví na korytech listů lopatek, kde bylo možné pozorovat vytvoření zmiňovaného schodovitého efektu (obr. 118). Na spodní straně lopatek (hřbetu) došlo po separaci podpor k operaci broušení, která způsobila homogenizaci vnějších ploch (obr. 119).

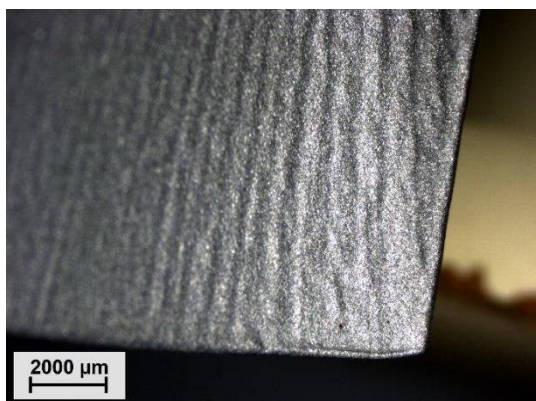


Obr. 118 Snímek koryt lopatek oběžného kola.

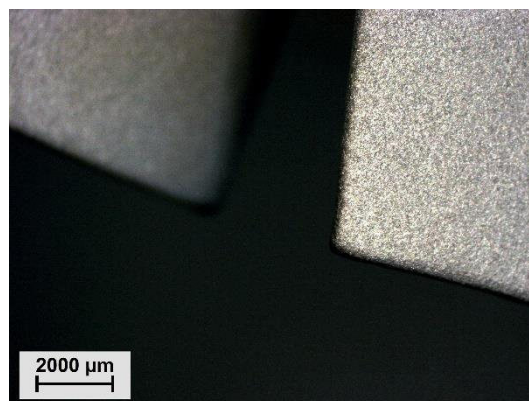
Obr. 119 Snímek hřbetů lopatek oběžného kola.

Pro podrobnější zdokumentování vnější struktury povrchu oběžného kola byl využit stereomikroskop ZEISS s označením Stemi 2000-C. Vybrané snímky míst na meridiánu kola a z ploch obou čel jsou uvedeny na obr. 120 až obr. 128.

Prvními zkoumanými místy byly listy lopatek. Byl pořízen podrobnější snímek schodovitého efektu (obr. 120) na korytu lopatky, který byl zřetelný již při prvotním vizuálním ohledání kola. Na snímku jsou patrné jednotlivé výškové změny spolu s již zmiňovanou odchylkou konce lopatky, která byla zaznamenána v kapitole 7.3 s výstupy 3D skenování. Na obr. 121 je zachycen hřbet stejné lopatky jako na obr. 120, na kterých je zřetelně patrný rozdíl způsobený zabroušením těchto ploch s následným otryskáním. Tímto způsobem došlo k potlačení vzniklého schodovitého efektu a homogenizaci povrchu.

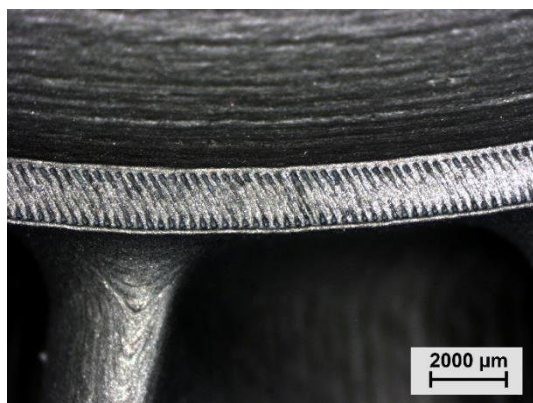
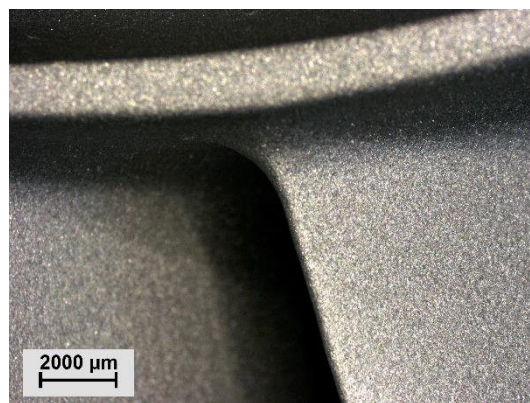


Obr. 120 Snímek koryta lopatky.



Obr. 121 Snímek hřbetu lopatky.

Pro další snímání byla vybrána oblast horního a dolního meridiánu oběžného kola. Na povrchu zachyceném na obr. 122 jsou zřetelné jednotlivé průjezdy laseru při strategii šrafování. U spodní části kola došlo opět vlivem broušení v post-processingu k homogenizaci spodní části modelu (obr. 123) což způsobilo rozdílnou jakost těchto povrchů.

Obr. 122 Horní meridián
(poslední tisknutá vrstva).Obr. 123 Spodní meridián
(první tisknutá vrstva).

Na obr. 125 až obr. 128 je zřetelně rozeznatelná jakost povrchu spodní a vrchní strany modelu. Na snímcích z vrchních stran modelu jsou opět patrné jednotlivé strategie šrafování. Po odstranění podpor ze spodní strany byly všechny příslušné plochy broušeny a následně homogenizovány tryskáním korundem.

Obr. 124 Rozložení makroskopických snímků z axiálního kola:
a) Obr. 125, b) Obr. 126, c) Obr. 127, d) Obr. 128.

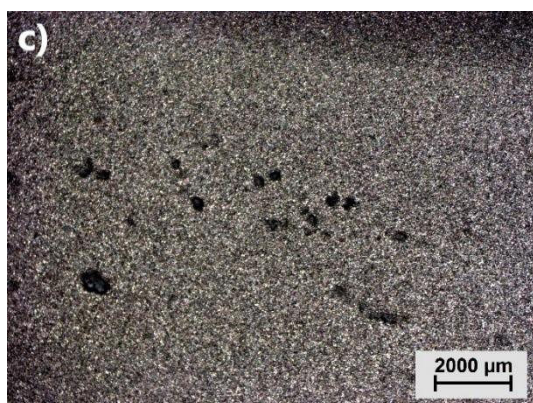


Obr. 125 Snímek šrafování střední části čelní plochy.

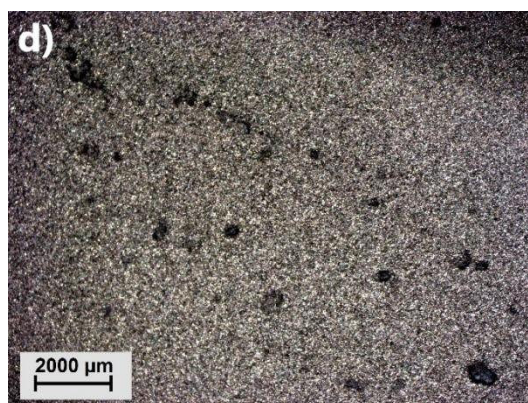


Obr. 126 Snímek šrafování plochy čela.

Snímky ploch na obr. 125 a obr. 128 byly pořízeny z čel oběžného kola. Artefakty na nich zachycené jsou výsledkem rozdílných strategií šrafování. Jedná se o místa, kde dochází k překryvu, či zahájení trasy laseru. Na lokálních místech tak dochází ke zhoršení struktury povrchu.



Obr. 127 Negativní vady detekované na čelní ploše.



Obr. 128 Negativní vady detekované na čelní ploše.

Póry zachycené na snímcích obr. 127 a obr. 128 potvrdily předpoklad, vycházející z bakalářské práce, o nutnosti zařazení přísad pro vnější plochy tisknutých dílů. Jedná se s největší pravděpodobností o místa, kde došlo k separaci materiálu při odstraňování stavebních podpor. Všechny tyto defekty se nacházely na místech určených k následnému obrobení. Vyhodnocení jejich vlivu na konečnou strukturu povrchu bylo analyzováno až při kontrole finálního obrobku pomocí fluorescenční penetrační kontroly a rentgenového testování (RTG) [1].

7.5 Testování kola v reálné aplikaci

Před samotným testováním tisknutého prototypu byla nutná úprava a obrobení polotovaru na stav, který by co nejvíce odpovídal standardně používaným sériovým komponentům. U oběžných kol zpracovávaných technologií přesného lití zahrnuje standardně obrobení, homogenizaci povrchu tryskáním, kalibraci a následné vyvážení hotového kola. Podrobný technologický postup provedený na tisknutém polotovaru je zpracován v následující kapitole.

7.5.1 Příprava oběžného kola

Na tisknutém polotovaru byl proveden stejný technologický postup, který je standardně využíván pro zpracování odlitků axiálních kol turbíny S5L.

Obrobení a broušení

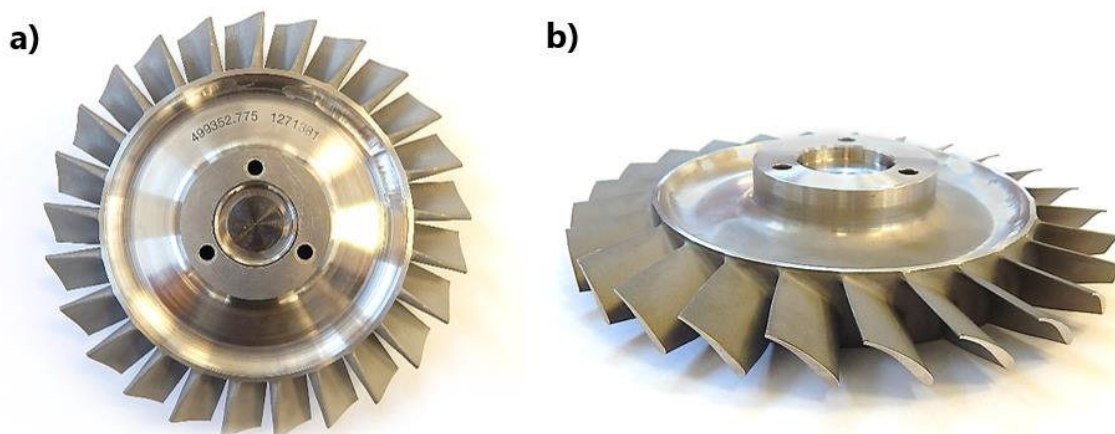
Po podrobné analýze struktury povrchu bylo přistoupeno k obrobení ploch dle standardní výkresové dokumentace. Na polotovaru dochází k obrobení čel, věnců čel, vrtání a vyjiskřování otvorů. K zajištění požadované účinnosti turbíny je stěžejní udržení co nejmenších vůlí mezi lopatkami oběžného kola a statorovou komorou turbíny. Proto je do technologického postupu zařazena kalibrace lopatek oběžného kola broušením na požadovanou hodnotu průměru kola dle výkresové dokumentace (obr. 129).

Vyvažování a tryskání

Tryskáním polotovaru je zajištěna homogenizace povrchu a vnesení tlakového napětí, které snižuje riziko případného šíření vzniklých trhlin. Pro niklové slitiny je využíváno tryskání pomocí hliníkových karbidů (korund WFA F150). Aby se předešlo poškození jemných integrovaných lopatek axiálního kola je nutné využívat zařízení určené pro jemné manuální tryskání.

Po dokončení všech technologických operací podstoupilo oběžné kolo řadu nezbytných testů, jako fluorescenční penetrační kontrolu (FPI), rentgenové testování (RTG), měření předepsaných rozměrů či kompletní 3D sken.

Na snímku obr. 129 je zachycen aditivně vyrobený prototyp oběžného kola turbíny S5L připravený k testování v reálné zátěži turbínového motoru.

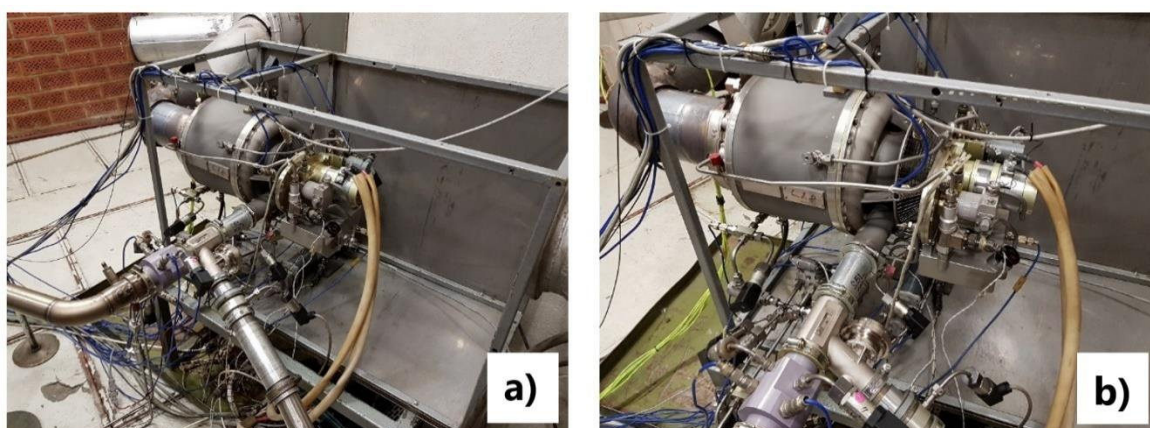


Obr. 129 Obrobené oběžné kolo a) obrobené čelo, b) kalibrované konce lopatek.

7.5.2 Testování aditivně vyrobeného oběžného kola v turbíně motoru

Před samotným testováním oběžného kola v reálné zátěži bylo nutné zajistit vystavení potřebné výjimky k jeho uvolnění z důvodu neodpovídající výdrži materiálu při zkouškách pevnosti při tečení. Výstupy zkoušky nesplňovaly nastavené podmínky dle tab. 25. Po vyhodnocení všech možných rizik spojených s případným porušením vytisknutého prototypu během testu bylo vedením konstrukčního oddělení udělena potřebná povolení k provedení krátkodobých i dlouhodobých zkoušek tisknutého oběžného kola prvního stupně turbíny.

Následnou kontrolou výstupního protokolu všech prováděných zkoušek bylo zkušebnou rozhodnuto o uvolnění tisknutého axiálního kola turbíny pro jeho testování v reálné zátěži. Testování bylo začleněno do zásobníku práce zkušebny pomocných energetických jednotek a je naplánováno na třetí kvartál roku 2020. Zkoušky ověření využitelnosti aditivní technologie pro rotační komponenty turbínových motorů budou prováděny na speciálně upravené sestavě určené k testování komponent pomocných energetických jednotek S5L. Snímek testovacího stendu zkušebního střediska společnosti PBS Velká Bíteš, a. s. osazené testovacím zařízením bylo zachyceno na obr. 130.



Obr. 130 Pomocná energetická jednotka určená pro testování komponent turbíny S5L:
a) umístění jednotky v testovacím stendu, b) detail zapojení testovacích snímačů.

7.5.3 Očekávané výstupy zkoušek v reálné aplikaci

Během zkoušky jsou simultánně měřeny procesní parametry jako teplota vstupního vzduchu, průtok vzduchu a paliva, či teplota spalin. Mezi další získávané parametry patří například tlak ve spalovací komoře, otáčky turbínového kola a měření vibrací. Následnou analýzou získaných údajů je zjišťována účinnost a provozní podmínky turbíny. Pro aditivně vyrobené oběžné kolo prvního stupně turbíny budou ověřeny pevnostní předpoklady a jeho výdrž při stabilním i přerušovaném chodu turbínového motoru. Po ukončení krátkodobých zkoušek bude přistoupeno k dlouhodobému testování, kde dojde k odzkoušení procesních parametrů chodu turbíny po maximální dobu, jež bude komponenta schopna odolat aplikovanému zatížení a nedojde k fatální kumulaci poškození, či přetížení komponenty.

ZÁVĚR

V rámci zhodnocení dosažených výsledků bylo provedeno porovnání tisknutého a litého materiálu IN 939 z pohledu mechanických vlastností následované diskusí a analýzou vybraných výstupů z experimentální části projektu. Část závěru byla věnována i celkovému zhodnocení využitelnosti aditivní technologie pro výrobu turbínových komponent. Práce byla zakončena závěrečným zhodnocením.

Zhodnocení a diskuse výstupů experimentální části

Výstupy tahových zkoušek za pokojové teploty obou materiálových stavů odpovídaly předpokladům vycházejícím z Hall-Petchova vztahu, který popisuje závislost velikosti zrna a výstupů mechanických hodnot. Tisknutý materiál s jemnou homogenní strukturou výrazně převyšoval hodnoty dosahované litým materiálem s výrazně většími zrny. U obou materiálů došlo ke splnění nastavených kritérií pro pevnosti v tahu za pokojové teploty. Tažnost A_5 tisknutého materiálu výrazně převyšovala minimální hodnoty nastavených kritérií. Vzorky vyrobené technologií přesného lití však nedokázaly vyhovět limitům tažnosti a kontrakce při pokojové teplotě.

U tahových zkoušek za teploty 649 °C dochází kvůli zvýšené teplotě k podpoření difuze uvnitř materiálu, což se projevilo na zhoršených pevnostních výstupech a výrazném zvýšení tažnosti všech testovaných vzorků. Materiálové stavy obou technologií přesto dokázaly vyhovět předepsaným limitům nastaveným dle krycích taveb společnosti PBS Velká Bíteš a. s.

U testování pevnosti při tečení litého materiálu docházelo ke kavitačním a křehkým lomům, které byly podpořeny zvýšenou difuzí při vysokých teplotách. U tisknutého materiálu docházelo při zkouškách pevnosti při tečení k nedostatečným dobám výdrže, které jsou přisuzovány právě velkému počtu hranic mezi jednotlivými strukturálními útvary uvnitř materiálu. Hranice jednotlivých struktur uvnitř materiálu vyžadují z hlediska difuze poměrně nižší množství energie a byly tedy s největší pravděpodobností jednou z hlavních příčin nevyhovujících pevností při tečení tisknutého materiálu. Mírné zlepšení bylo možné pozorovat zvýšením výšky vrstvy tisknutých vzorků, kde spolu se zvětšením pozorovaných struktur uvnitř materiálu došlo i k zvýšení doby výdrže do lomu. Toto zjištění odpovídá obecně známým závislostem mezi velikostí zrna litého materiálu a jeho výdrží při tečení.

Anizotropie mechanických vlastností se u tahových zkoušek za pokojové a zvýšené teploty projevila u vzorků s tiskovou orientací X/Y ve formě přibližně 2 % zvýšení dosahovaných mezí pevnosti a smluvních mezí kluzu. Výraznější rozdíl byl pozorován u hodnot tažnosti A_5 , kde u prováděných tahových zkoušek došlo u vzorků tisknutých v orientaci X/Y ke snížení tažnosti na přibližně 80 % hodnoty dosahované vzorky tisknutých v orientaci Z. Takto výrazné snížení tažnosti naznačuje významný vliv anizotropie mechanických vlastností na konečnou pevnost tisknutých dílů. Tento závěr potvrdila prováděná zkouška pevnosti při tečení, kde se změna tiskové orientace z osy Z na X/Y projevila výrazným snížením doby do lomu.

Ze získaných výstupů mechanických zkoušek tisknutého materiálu vyplynula výrazná závislost mezi výškou vrstvy a dosahovanými mechanickými vlastnostmi. Zvýšením výšky vrstvy je možné dosáhnout prodloužení doby do lomu při zkouškách pevnosti při tečení, je ovšem nutné počítat se snížením dosahovaných pevností z tahových zkoušek.

Na základě výsledků experimentální části byly vyvozeny tyto závěry a zjištění:

- tisknutý materiál IN 939 splňuje nastavená kritéria výstupů z tahových zkoušek,
- tisknutý materiál IN 939 dosahuje v porovnání s odlitkem několikanásobně vyšších tažností A_5 ,
- výdrž tisknutého materiálu při zkoušce pevnosti při tečení nesplňuje nastavené limity, přesto umožňuje testování komponenty v reálné zátěži,
- zvýšení tiskové výšky vrstvy na 60 μm přináší prodloužení výdrže materiálu při zkoušce pevnosti při tečení, avšak negativně ovlivňuje výstupy tahových zkoušek,
- anizotropie mechanických vlastností tisknutého materiálového stavu se projevuje u výstupů z tahové zkoušky snížením tažnosti v kombinaci s mírným zvýšením meze pevnosti a smluvní meze kluzu (do 2,5 %), u zkoušky pevnosti při tečení výrazným ovlivněním výdrže,
- tisknutý materiál IN 939 podléhá větší degradaci mechanických vlastností za zvýšených teplot než jeho konvenční litý materiálový stav,
- geometrické rozměry tisknutého dílu odpovídaly standardně nastavené toleranci pro odlitky,
- u ploch tisknuté komponenty, které jsou v kontaktu s podporami během tisku, je nutné počítat s přídavkem pro následné opracování,
- obrobené oběžné kolo vyrobené aditivní metodou SLM úspěšně prošlo kontrolou RTG a FPI,
- schodovitá textura povrchu listů lopatek umožňuje testování komponenty v reálné zátěži,
- tisknuté oběžné axiální kolo úspěšně prošlo konečnou výstupní kontrolou a je připraveno k testování v reálné zátěži.

Zhodnocení využitelnosti aditivní metody SLM pro žárupevné komponenty

Závěry práce ukázaly nové směry využití kovové aditivní technologie, kterými je možné se vydat díky neustálému intenzivnímu vývoji nových žárupevných materiálů. Mezi oblasti, které jsou již v současnosti aditivní technologií výrazně ovlivněny patří i letecký průmysl. Zavádění revolučních řešení či nových leteckých komponent standardně zahrnuje několikaletý vývoj následovaný testováním a finální certifikací. V případě úspěšného nasazení kovové aditivní technologie do vývojových fází projektů společnosti PBS Velká Bíteš a. s. dochází k úplnému přeskočení nutnosti výroby prototypových odlitků, což se v konečném důsledku promítne na výrazném zrychlení zavádění nových produktů na trh. Neustálý rozvoj žárupevných slitin otevírá nové příležitosti uplatnění aditivních technologií i v dříve nedosažitelných aplikacích, jako jsou právě silně tepelně exponované komponenty spalovacích turbín a leteckých motorů. Testovaný materiál IN 939 zpracovaný aditivní metodou SLM výrazně přesahoval výstupy z tahových zkoušek konvenčně litého materiálového stavu. Nižší výstupy výdrže tisknutého materiálu při zkouškách pevnosti při tečení zatím omezují nasazení tisknutých komponent pro sériovou výrobu, umožňují však plné využití komponent pro vývojové fáze projektu a jejich krátkodobé testování v reálné zátěži turbíny.

Závěrečné zhodnocení

Rozšiřování materiálového portfolia aditivně zpracovatelných niklových a titanových superslitin s sebou neustále přináší i nové možnosti jejich využití. Velké nadnárodní společnosti jako General Electric či Boeing již v minulosti ukázaly možný směr využití těchto progresivních technologií zařazením tisknutých dílců do svých sériových produktů. Dnes již standardně využívané palivové trysky proudových motorů LEAP či lopatky nízkotlaké turbíny spolu s dalšími více než 300 tisknutými komponenty nového motoru GE9X začínají již pomalu přetvářet zavedenou koncepci vývoje nových leteckých motorů. Aby se současným společnostem dařilo udržet krok v tak rychle se rozvíjícím leteckém průmyslu, je více než jindy důležité začít co nejdříve s postupnou implementací těchto nových progresivních technologií do svých výrobních a vývojových procesů. Na aditivní technologie je však nutné nahlížet nejenom jako na novou výrobní technologii, ale také jako na revoluční způsob, jakým je možné vytvářet a navrhovat nová konstrukční řešení a komponenty budoucnosti. Úspěšnou výrobou silně tepelně exponovaného integrálního axiálního kola turbíny S5L se prokázalo možné využití těchto technologií i v aplikacích, kde dříve obstávaly pouze komponenty vyrobené pomocí konvenční technologie přesného lití. Mechanické vlastnosti tisknutého materiálu IN 939 ve většině provedených zkouškách splňovaly nastavené limity a u velkého množství případů dokonce i výrazně přesahovaly hodnoty dosahované litým materiálem. Aditivně vyrobené axiální kolo také vyhovovalo podmínkám veškerých prováděných kontrol kvality, což umožnilo jeho nasazení k testům v reálné zátěži turbínového motoru.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ROBL, Jan. *Využití aditivní technologie pro návrh výroby žárupevných součástí turbodmychadel*. Brno, 2017.. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Sedlák Ph.D.
- [2] PBS: PBS Velká Bíteš a. s. *PBS* [online]. Praha: PBS Group, a. s., 2020 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.pbs.cz/cz/>
- [3] *The jet engine*. 5 edition. Chichester, West Sussex: Wiley, 2015. ISBN 978-1119065999.
- [4] Die V-1 sollte Vergeltung für die Invasion sein. *WELT* [online]. Deutschland: Visoon Video Impact GmbH & Co. KG, 2014 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.welt.de/geschichte/zweiter-weltkrieg/article129014443/Die-V-1-sollte-Vergeltung-fuer-die-Invasion-sein.html>
- [5] The LEAP engine. *Safran Group* [online]. Paris: Safran Group, 2020 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.safran-group.com/diaporama/leap-engine>
- [6] KOCÁB, Jindřich. *Letadlové motory*. Vyd. 1. Praha: KANT, 2000. ISBN 80-902914-0-6.
- [7] Jak se vyvíjí a vyrábí proudový motor?. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, s.r.o., 2018 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/jak-se-vyviji-a-vyrabi-proudovy-motor.html>
- [8] ZHANG, Yujie, Lulu WANG, Shaonian WANG, Peng WANG, Haitao LIAO a Yu PENG. Auxiliary power unit failure prediction using quantified generalized renewal process. *Microelectronics Reliability*. 2018, 84, 215-225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.03.002>. ISSN 0026-2714. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271418301070>
- [9] EBRAHIMI, Hadi, Javad GATABI a Hassan EL-KISHKY. An auxiliary power unit for advanced aircraft electric power systems. *Electric Power Systems Research*. 2015, 119, 393-406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.10.023>. ISSN 0378-7796. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779614003940>
- [10] AULICKÁ, Kateřina. *NÁVRH INSPEKČNÍHO PROGRAMU KRITICKÉHO DÍLU PEJ AI-9V* [online]. Praha, 2018 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/80009>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Jiří Pavlas.
- [11] Vzdušné síly Armády České republiky. *MILPower* [online]. MilPower.org, 2020 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <http://www.milpower.org/modarmedforces.asp?value=9>
- [12] How a Jet Engine Works. *Interesting Engineering* [online]. Interesting Engineering, Inc., 2014 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://interestingengineering.com/how-a-jet-engine-works>
- [13] Why is there a pressure drop in the combustion section of a jet engine?. *Aviation Stack Exchange* [online]. New York: Stack Overflow, 2016 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://aviation.stackexchange.com/questions/33280/why-is-there-a-pressure-drop-in-the-combustion-section-of-a-jet-engine>

- [14] GE Aviation 3D Prints 30,000th Metal 3D Printed Fuel Nozzle at Auburn, Alabama Plant. *3Dprint* [online]. Německo: All3DP [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://3dprint.com/226703/ge-aviation-fuel-nozzle-3d-printed-30000/>
- [15] BOEING 777X: GE9X ENGINES WITH 300 3D PRINTED PARTS POWERS LARGEST TWIN-ENGINE JETLINER IN FIRST FLIGHT. *3D Printing Industry* [online]. Anglie: 3D Printing Industry, 2020 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/boeing-77x-ge9x-engines-with-300-3d-printed-parts-powers-largest-twin-engine-jetliner-in-first-flight-167793/>
- [16] The FAA Cleared the First 3D Printed Part to Fly in a Commercial Jet Engine from GE. *General Electric* [online]. Fairfield (Connecticut): GE, 2015 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.ge.com/reports/post/116402870270/the-faa-cleared-the-first-3d-printed-part-to-fly-2/>
- [17] Mind Meld: How GE And A 3D-Printing Visionary Joined Forces. *GE Reports* [online]. Boston: General Electric, 2020 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://www.ge.com/reports/mind-meld-ge-3d-printing-visionary-joined-forces/>
- [18] The Blade Runners: This Factory Is 3D Printing Turbine Parts For The World's Largest Jet Engine. *GE Reports* [online]. Boston: General Electric, 2018 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://www.ge.com/reports/future-manufacturing-take-look-inside-factory-3d-printing-jet-engine-parts/>
- [19] YANG, Li, Keng HSU, Brian BAUGHMAN, Donald GODFREY, Francisco MEDINA, Mamballykalathil MENON a Soeren WIENER. *Additive manufacturing of metals: the technology, materials, design and production*. UK. Cham]: Springer International Publishing, 2017, vii, 168 stran : ilustrace (převážně barevné). ISBN 978-3-319-55127-2.
- [20] PAGÁČ, Marek. Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM). *Konstrukter* [online]. 2016 [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/2016/11/23/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
- [21] L. MESSIMER, Sherri, Phillip A. FARRINGTON a Albert E. PATTERSON. Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need. *Technologies* [online]. 2017, 2017(2) [cit. 2018-03-22]. DOI: 10.3390/technologies5020015. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2227-7080/5/2/15>
- [22] *ISO/ASTM 52900:2015: Additive manufacturing*. ASTM International, 2015.
- [23] CASTELLS, Ryan. DMLS vs SLM 3D Printing for Metal Manufacturing. *Element* [online]. 2016, 1 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://www.element.com/nucleus/2016/06/29/dmls-vs-slm-3d-printing-for-metal-manufacturing>
- [24] HAN, Pinlian. Additive Design and Manufacturing of Jet Engine Parts. *Engineering*. 2017, 3(5), 648-652. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.017>. ISSN 2095-8099. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917307166>
- [25] 3D Metals Discover the variety of Metal Powders. *SLM Solution* [online]. Germany Lübeck: SLM Solutions Group AG [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: https://slm-solutions.com/sites/default/files/downloads/201en171023-01-001-powder_web.pdf

- [26] INCONEL® alloy HX. *Special Metals Wiggin* [online]. [cit. 2018-03-27].
Dostupné z: <http://www.specialmetalswiggin.co.uk/pdfs/products/INCONEL%20alloy%20HX.pdf>
- [27] INCONEL® alloy 625. *Special Metal Swiggin* [online]. [cit. 2018-03-27].
Dostupné z: <http://www.specialmetalswiggin.co.uk/pdfs/products/INCONEL%20alloy%20625.pdf>
- [28] INCONEL® alloy 718. *Special Metal Swiggin* [online]. Special Metal Swiggin [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <http://www.specialmetalswiggin.co.uk/pdfs/products/INCONEL%20alloy%20718.pdf>
- [29] MOIZ, Muhammad. *The influence of grain size on the mechanical properties of Inconel 718* [online]. Sweden, 2013 [cit. 2020-03-21].
Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-influence-of-grain-size-on-mechanical-of-718-Moiz/6323dd26d1ffe837ba6d4a1d4ce4bff74f18141f>.
Diplomová práce. Linköping University, Department of Management and Engineering (IEI). Vedoucí práce Jonas Saarimäki.
- [30] Materialdatenblatt IN 939. *SLM Solutions* [online]. Lübeck: SLM Solutions Group AG, 2019 [cit. 2020-03-31].
Dostupné z: <https://www.slm-solutions.com/en/products/accessories-consumables/slmr-metal-powder/>
- [31] *Quintus Technologies* [online]. Sweden: Quintus Technologies AB, 2020 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://quintustechnologies.com/hot-isostatic-pressing/applications/additive-manufacturing/>
- [32] Using laser cladding as additive manufacturing method. *FORCE Technology* [online]. Denmark: FORCE TECHNOLOGY, 2020 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://forcetechnology.com/en/articles/production-advantages-using-laser-cladding-as-an-additive-manufacturing-method>
- [33] DEEV, A.A., P.A. KUZNETCOV a S.N. PETROV. Anisotropy of Mechanical Properties and its Correlation with the Structure of the Stainless Steel 316L Produced by the SLM Method. *Physics Procedia*. 2016, 83, 789-796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.081>. ISSN 1875-3892. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389216301882>
- [34] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. : il. ; 30 cm. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [35] XU, Xin, Simon METEYER, Nicolas PERRY a Yaoyao ZHAO. Energy consumption model of Binder-jetting additive manufacturing processes. *International Journal of Production Research*. Taylor & Francis, 2015, 53(23), 7005-7015. DOI: 10.1080/00207543.2014.937013. ISSN 0020-7543. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.937013>
- [36] AHN, Dae-Keon, Soon-man KWON a Seok-Hee LEE. *Expression for Surface Roughness Distribution of FDM Processed Parts*. 2008, 490 s. DOI: 10.1109/ICSMA.2008.4505572. ISBN 978-89-950038-8-6.
- [37] MURALI, Aashish. *Phase and Residual Stress Analysis of Alloys 600/82 Used in Nuclear Reactor Components*. 2016. DOI: 10.13140/RG.2.2.21603.55842.

- [38] MANNAN, S., S. RODRIGUEZ a P. RODRIGUEZ. INFLUENCE OP GRAIN SIZE ON THE TENSILE AND CREEP PROPERTIES OP A TYPE 316 STAINLESS STEEL. In: *International Atomic Energy Agency* [online]. Vienna: IAEA, 1980 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/16/029/16029932.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
BJ	Binder Jetting
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EDX	Energy dispersive X-Ray
FDM	Fused Deposition Modeling
GE	General Electric
HIP	Hot Isostatic Pressuring
PEJ	Pomocná Energetická Jednotka
SEM	Scanning Electron Microscopy
SLM	Selective Laser Melting

Symbol	Jednotka	Popis
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
R_{p0,2}	[MPa]	Smluvní mez kluzu
A₅	[%]	Tažnost
Z	[%]	Kontrakce
E	[GPa]	Youngův modul pružnosti
HV	[HV10]	Tvrdość podle Vickerse
γ	-	Fáze gamma
γ'	-	Fáze gamma primární

Značení vzorků	Popis
C	Odlévaný – Casted
P	Tisknutý – Printed
ET	Elevated Temperature – Tahová zkouška za zvýšené teploty
RT	Room Temperature – Tahová zkouška za pokojové teploty
SR	Stress Rupture – Zkouška pevnosti při tečení
HIP-C	Tepelné zpracování odlévaného materiálu včetně HIP
HIP-P	Tepelné zpracování tisknutého materiálu včetně HIP
HT-C	Tepelné zpracování odlévaného materiálu (dle kap. 3.5)
HT-P	Tepelné zpracování odlévaného materiálu (dle kap. 3.5)

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Materiálový list SLM materiálu IN 939
- Příloha 2 Protokol z 3D měření aditivně vyrobeného oběžného kola turbíny
- Příloha 3 Protokoly provedené EDX analýzy (30 μm)
- Příloha 4 Protokoly provedené EDX analýzy (60 μm)

Materialdatenblatt

Material Data Sheet

Ni-Alloy IN939



Allgemeines

Die hochwarmfeste und korrosionsbeständige Legierung IN939 zählt zu den Nickelbasislegierungen. Sie enthalten zumeist Anteile von Chrom, Eisen, Niob, Molybdän sowie weiteren Legierungsbestandteilen und werden häufig als Superlegierungen bezeichnet. Die Einsatztemperaturen der Nickelbasislegierungen liegen höher als die von Stählen und zudem lassen sich diese überwiegend gut schweißen. Ihre Temperaturfestigkeit wird durch eine Mischung aus Dispersionshärtung, Ausscheidungshärtung und Mischkristallverfestigung erreicht. Nickelbasislegierungen weisen gute mechanische Kennwerte auf, wie bspw. eine hohe Zugfestigkeit und eine gute Dauerfestigkeit. IN939 lässt sich bis zu Temperaturen von circa 700 °C einsetzen. Somit eignen sich diese Legierungen optimal für die Luft- und Raumfahrttechnik sowie den Turbinenbau. Ein

General

This highly heat-resistant and corrosion resistant alloy IN939 ranks among nickel-based alloys. In most cases, these alloys contain chromium, iron, niobium, and molybdenum and other alloying elements. They are often known as superalloys. Nickel-based alloys withstand higher temperatures than steels and are also highly weldable. Their temperature resistance is achieved through a mixture of dispersion hardening, precipitation hardening, and solid solution strengthening. Nickel-based alloys exhibit good mechanical characteristic values such as high tensile strength and good endurance strength. IN939 can be used at temperatures of up to 700 °C, which makes this alloy ideally suited for

further application range of nickel-based alloys is toolmaking. Additionally, they are suitable for post-treatment such as heat treatment and mechanical post treatment.

Materialaufbau

Components made of IN939 exhibit a homogeneous, nearly non-porous texture, with mechanical characteristic values in the range of material specifications. Through subsequent processing such as heat treatment (e.g. precipitation hardening) or hot isostatic pressing (HIP), the components' properties can be adapted to meet specific requirements.

aerospace technologies and turbine production. Another field of application for nickel-based alloys is toolmaking. These alloys are also suitable for heat treatment and mechanical post treatment.

Material Structure

SLM®-processed components out of IN939 exhibit a homogeneous, nearly non-porous texture, with mechanical characteristic values in the range of material specifications. Through subsequent processing such as heat treatment (e.g. precipitation hardening) or hot isostatic pressing (HIP), the components' properties can be adapted to meet specific requirements.

Materialdatenblatt

Material Data Sheet

Ni-Alloy IN939



Physikalische und chemische Eigenschaften Physical and Chemical Properties

Massendichte ^[1] Mass density ^[1]	8,2 g/cm ³		
Schichtdicke Layer thickness	30 µm ^[2]	50 µm ^[3]	
Bauteildichte ^[4] Component density ^[4]	> 99,5%	> 99,5 %	
Theoretische Aufbaurrate je Laser ^[5] Theoretical build-up rate per laser ^[5]	9,1 cm ³ /h	16,4 cm ³ /h	
Chemische Zusammensetzung [Massenanteil in %] ^[6] Chemical composition [Mass fraction in %] ^[6]	Element	Min.	Max.
	Ni	Balance	Balance
	Cr	22,00	23,00
	Co	18,00	20,00
	Ti	3,00	4,50
	W	1,00	3,00
	Al	1,00	3,00
	Ta	1,00	1,80
	Nb	0,50	1,50
	Mn		0,50
	Si		0,50
	C		0,15
	Zr		0,10
Partikelgröße ^[6] Particle size ^[6]	10 – 45 µm		
Partikelform ^[7] Particle shape ^[7]	Sphärisch Spherical		

Materialdatenblatt

Material Data Sheet

Ni-Alloy IN939



Mechanische Kennwerte Mechanical Data

Wie gebaut As-built	Schichtdicke 30 µm ^[2] Layer thickness 30 µm ^[2]		Schichtdicke 50 µm ^[3] Layer thickness 50 µm ^[3]	
	M	SD	M	SD
M: Mittelwert M: Mean SD: Standardabweichung SD: Standard deviation				

Zugprüfung^[8]

Tensile test^[8]

Zugfestigkeit Tensile strength	R _m [MPa]	1009	35	928	72
Dehngrenze Offset yield strength	R _{p0,2} [MPa]	735	41	633	33
Bruchdehnung Elongation at break	A [%]	30	5	23	10
Brucheinschnürung Reduction of area	Z [%]	45	7	28	9
Elastizitätsmodul Young's modulus	E [GPa]	177	8	156	12

Härteprüfung^[9]

Hardness test^[9]

Härte nach Vickers Vickers hardness	HV10	302	3	305	7
--	------	-----	---	-----	---

Rauheitsmessung^[10]

Roughness measurement^[10]

Mittenrauwert Roughness average	Ra [µm]	6	1	7	1
Gemittelte Rautiefe Mean roughness depth	Rz [µm]	42	6	48	7

Materialdatenblatt

Material Data Sheet

Ni-Alloy IN939



Mechanische Kennwerte Mechanical Data

Schichtdicke 30 μm ^[2] Layer thickness 30 μm ^[2]	Wärmebehandelt ^[11] Heat-treated ^[11]		Wärmebehandelt + HIP ^[12] Heat-treated + HIP ^[12]	
	M	SD	M	SD
M: Mittelwert M: Mean SD: Standardabweichung SD: Standard deviation				

Zugprüfung^[8] Tensile test^[8]

Zugfestigkeit Tensile strength	R _m [MPa]	1247	76	1348	57
Dehngrenze Offset yield strength	R _{p0,2} [MPa]	749	21	957	18
Bruchdehnung Elongation at break	A [%]	13	5	11	5
Brucheinschnürung Reduction of area	Z [%]	12	3	12	2
Elastizitätsmodul Young's modulus	E [GPa]	201	3	156	6

Härteprüfung^[9] Hardness test^[9]

Härte nach Vickers Vickers hardness	HV10	-	-	-	-
--	------	---	---	---	---

Rauheitsmessung^[10] Roughness measurement^[10]

Mittenrauwert Roughness average	Ra [μm]	-	-	-	-
Gemittelte Rautiefe Mean roughness depth	Rz [μm]	-	-	-	-

Materialdatenblatt

Material Data Sheet

Ni-Alloy IN939



Die Eigenschaften und mechanischen Kennwerte gelten für von SLM Solutions geprüftes und vertriebenes Pulver, das mittels der Original-Parameter von SLM Solutions auf den Maschinen von SLM Solutions gemäß der jeweils gültigen Bedienungsanleitung (inklusive Installationsbedingungen und Wartung) verarbeitet wurde. Die Bestimmung der Bauteileigenschaften erfolgt gemäß angegebener Vorgehensweisen. Weitere Details zu den von SLM Solutions verwendeten Vorgehensweisen sind auf Anfrage erhältlich.

Die Angaben entsprechen unserem Kenntnis- und Erfahrungsstand zum Zeitpunkt der Veröffentlichung und bilden für sich allein keine ausreichende Grundlage für eine Bauteilauslegung. Bestimmte Eigenschaften von Produkten oder Bauteilen oder die Eignung von Produkten oder Bauteilen für spezifische Anwendungen werden nicht garantiert. Der Hersteller von Produkten oder Bauteilen ist für die qualifizierte Überprüfung der Eigenschaften und der Eignung für konkrete Anwendungen verantwortlich. Der Hersteller von Produkten oder Bauteilen ist verantwortlich für die Wahrung möglicher Schutzrechte Dritter sowie bestehender Gesetze und Bestimmungen.

The properties and mechanical characteristics apply to powder that is tested and sold by SLM Solutions, and that has been pro-cessed on SLM Solutions machines using the original SLM Solutions parameters in compliance with the applicable operating instructions (including installation conditions and maintenance). The part properties are determined based on specified procedures. More details about the procedures used by SLM Solutions are available upon request.

The specifications correspond to the most recent knowledge and experience available to us at the time of publication and do not form a sufficient basis for component design on their own. Certain properties of products or parts or the suitability of products or parts for specific applications are not guaranteed. The manufacturer of the products or parts is responsible for the qualified verification of the properties and their suitability for specific applications. The manufacturer of the products or parts is responsible for protecting any third-party proprietary rights as well as existing laws and regulations.

DEUTSCHLAND ■ **ÖSTERREICH** ■ **FRANKREICH** ■ **ITALIEN** ■ **USA** ■ **SINGAPUR** ■ **RUSSLAND** ■ **INDIEN** ■ **CHINA**

SLM Solutions Group AG | Estlandring 4 | 23560 Lübeck | Deutschland
Fon +49 451 4060-3000 | Fax +49 451 4060-3250 | www.slm-solutions.com



SLM® und SLM Solutions sind eingetragene Marken der SLM Solutions Group AG.

Materialdatenblatt

Material Data Sheet

Ni-Alloy IN939



- [1] **Materialdichte variiert im Rahmen der möglichen Variationen der chemischen Zusammensetzung.**
Material density varies within the range of possible chemical composition variations.
- [2] **Materialdatei: Inc_SLM_BP2.1_30_Stripes-US_T200_S09-02_V4101**
Material data file: Inc_SLM_BP2.1_30_Stripes-US_T200_S09-02_V4101
- [3] **Materialdatei: Inc_SLM_BP2.1_50_Stripes-US_T0_S32-04_V4101**
Material data file: Inc_SLM_BP2.1_50_Stripes-US_T0_S32-04_V4101
- [4] **Optische Dichtebestimmung mittels Lichtmikroskopie.**
Optical density determination by light microscopy.
- [5] **Theoretische Aufbaurrate je Laser = Schichtdicke x Scangeschwindigkeit x Spurbstand.**
Theoretical build-up rate for each laser = layer thickness x scan speed x track distance.
- [6] **Bzgl. pulverförmigen Ausgangsmaterials.**
With respect to powder material.
- [7] **Gemäß DIN EN ISO 3252:2001.**
According to DIN EN ISO 3252:2001.
- [8] **Zugprüfung gemäß DIN EN ISO 6892-1:2017 B (DIN 50125:2016 – B6x30); Ausrichtung: 0°, 90°; Wärmebehandlung: keine; Prüfmaschine: Zwick 1484; Lastbereich: 200 kN; Prüfgeschwindigkeit 0,008 1/s; Prüftemperatur: Raumtemperatur; Prüflabor: EWIS GmbH/EADS. Die Proben sind vor dem Zugversuch abgedreht worden.**
Tensile test according to DIN EN ISO 6892-1:2017 B (DIN 50125:2016 – B6x30); orientation: 0°, 90°; heat treatment: none; testing machine: Zwick 1484; load range: 200 kN; testing speed: 0,008 1/s; testing temperature: room temperature; test laboratory: EWIS GmbH/EADS. Test samples were turned before tensile test.
- [9] **Härteprüfung gemäß DIN EN ISO 6507-1:2018.**
Hardness testing according to DIN EN ISO 6507-1:2018.
- [10] **Rauheitsmessung gemäß DIN EN ISO 4288:1998; $\lambda_c = 2,5$ mm.**
Roughness measurement according to DIN EN ISO 4288:1998; $\lambda_c = 2,5$ mm.
- [11] **Wärmebehandlung: 1107 °C/2 h + cool 3 °C/min to 899 °C + 913 °C/8 h + 982 °C/6 h + 802 °C/4 h**
Heat treatment: 1107 °C/2 h + cool 3 °C/min to 899 °C + 913 °C/8 h + 982 °C/6 h + 802 °C/4 h
- [12] **Wärmebehandlung: 1107 °C/2 h + cool 3 °C/min to 899 °C + 913 °C/8 h + 982 °C/6 h + 802 °C/4 h + HIP**
Heat treatment: 1107 °C/2 h + cool 3 °C/min to 899 °C + 913 °C/8 h + 982 °C/6 h + 802 °C/4 h + HIP

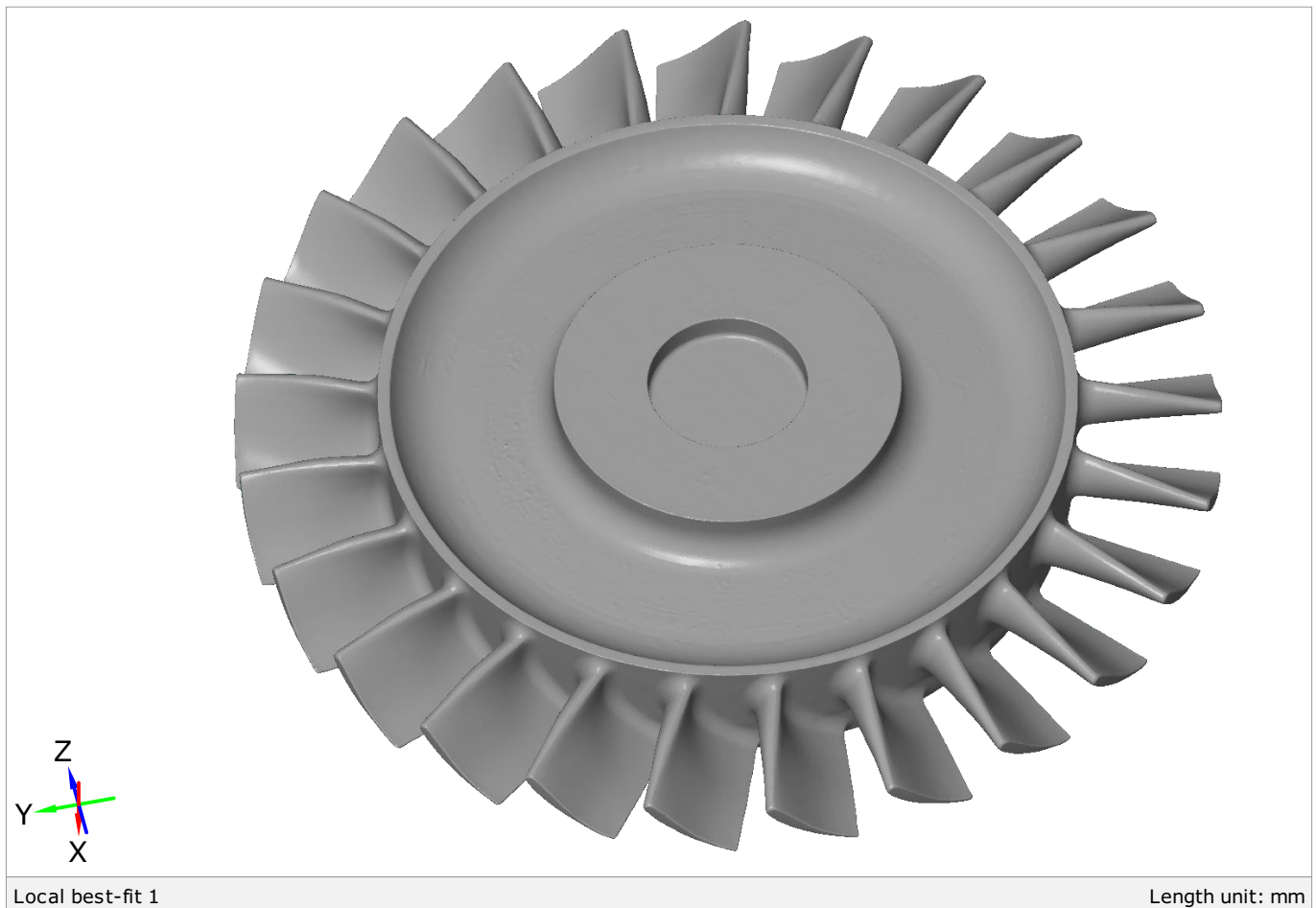
DEUTSCHLAND ■ ÖSTERREICH ■ FRANKREICH ■ ITALIEN ■ USA ■ SINGAPUR ■ RUSSLAND ■ INDIEN ■ CHINA

SLM Solutions Group AG | Estlandring 4 | 23560 Lübeck | Deutschland
Fon +49 451 4060-3000 | Fax +49 451 4060-3250 | www.slm-solutions.com



SLM® und SLM Solutions
sind eingetragene Marken
der SLM Solutions Group AG.

Kolo turbíny



Inspector: Lukáš Marvan

Company: PBS Velká Bíteš

Department: DPL

Location: Velká Bíteš

Date: 25.10.2019

Project: Oběžné kolo turbíny

Part:

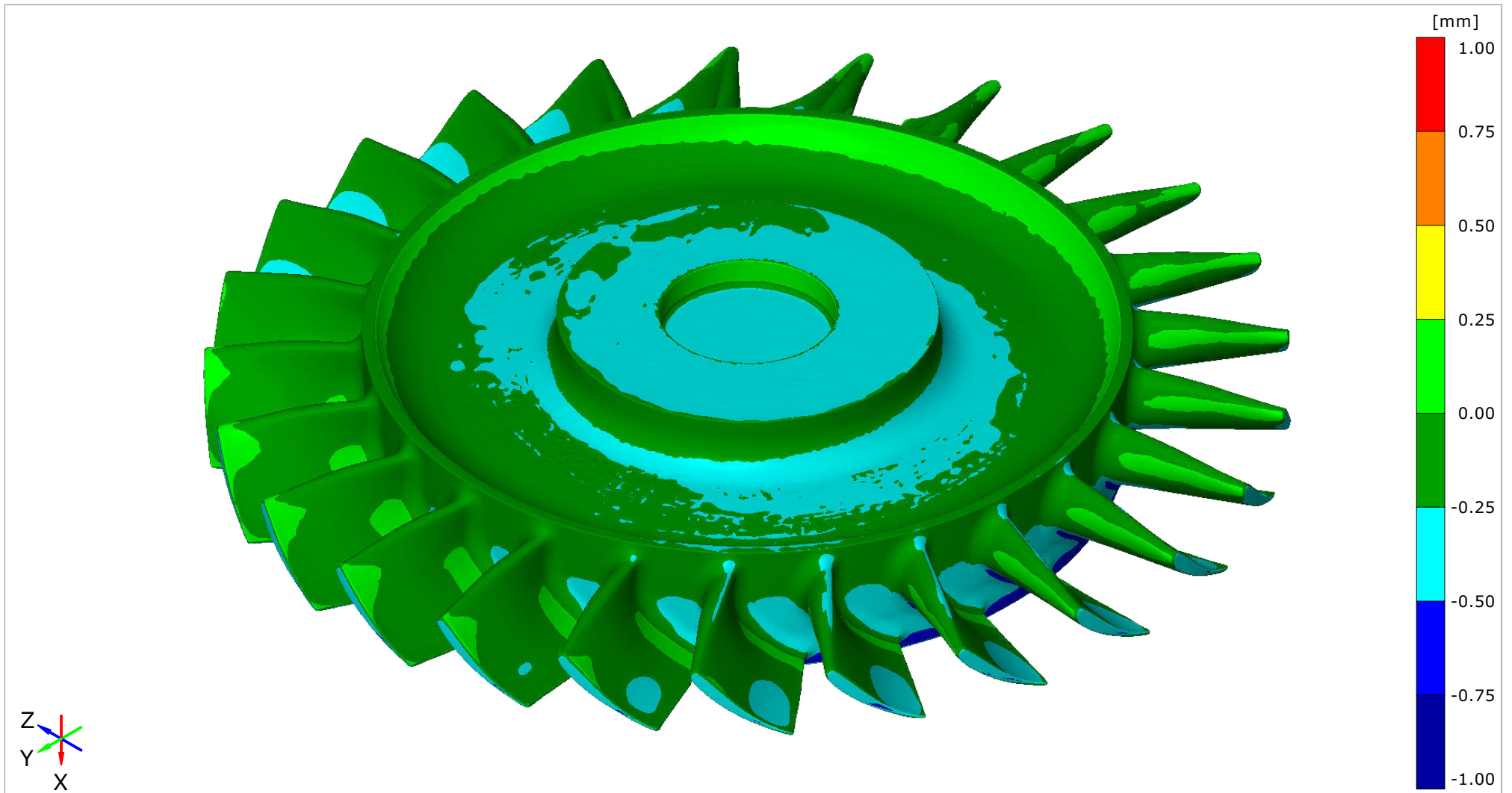
Part no.:

Version: Casting

Charge no.:

System: ATOS Professional

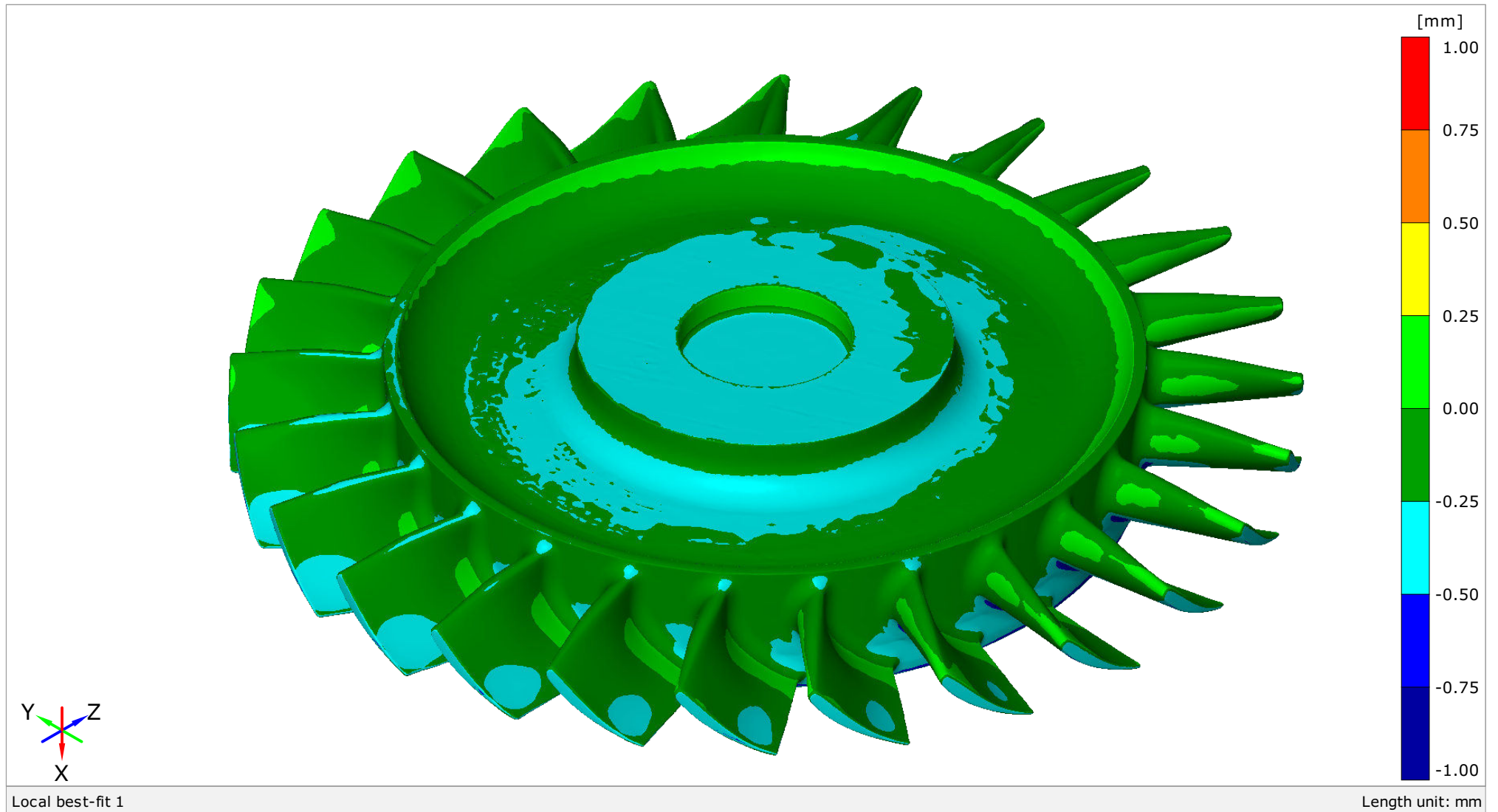
Color map of deviations from CAD model



Local best-fit 1

Length unit: mm

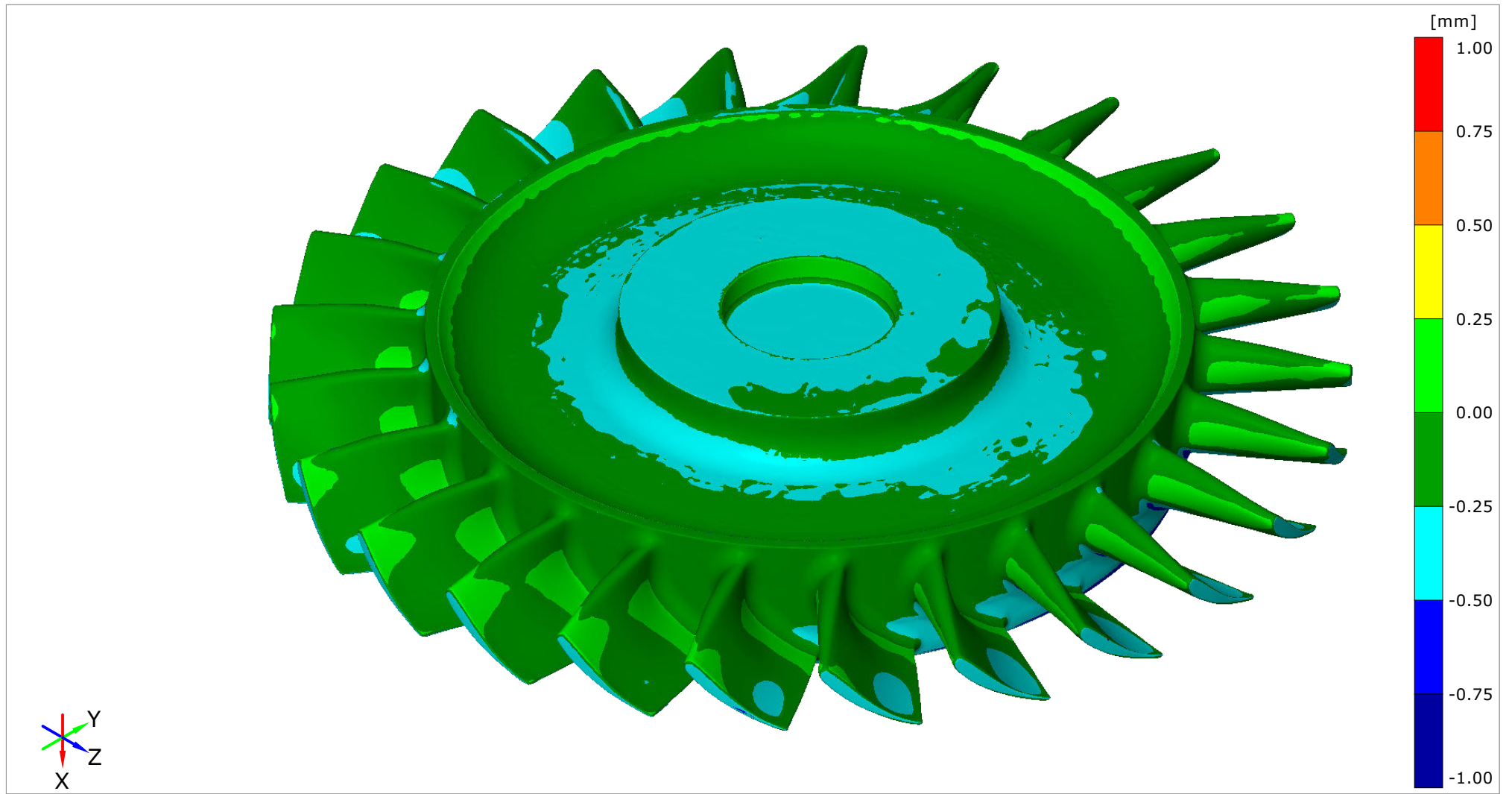
Color map of deviations from CAD model



Local best-fit 1

Length unit: mm

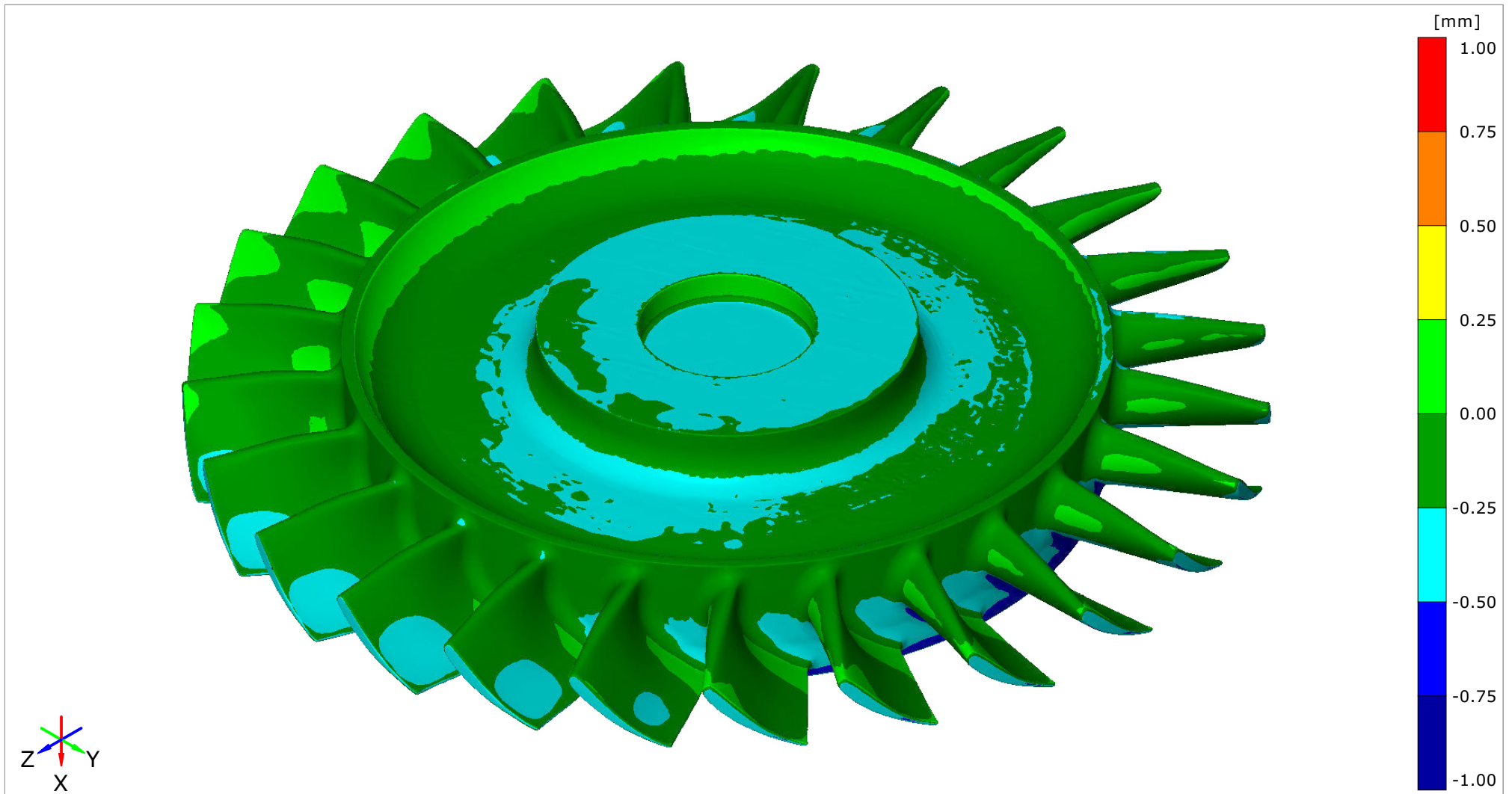
Color map of deviations from CAD model



Local best-fit 1

Length unit: mm

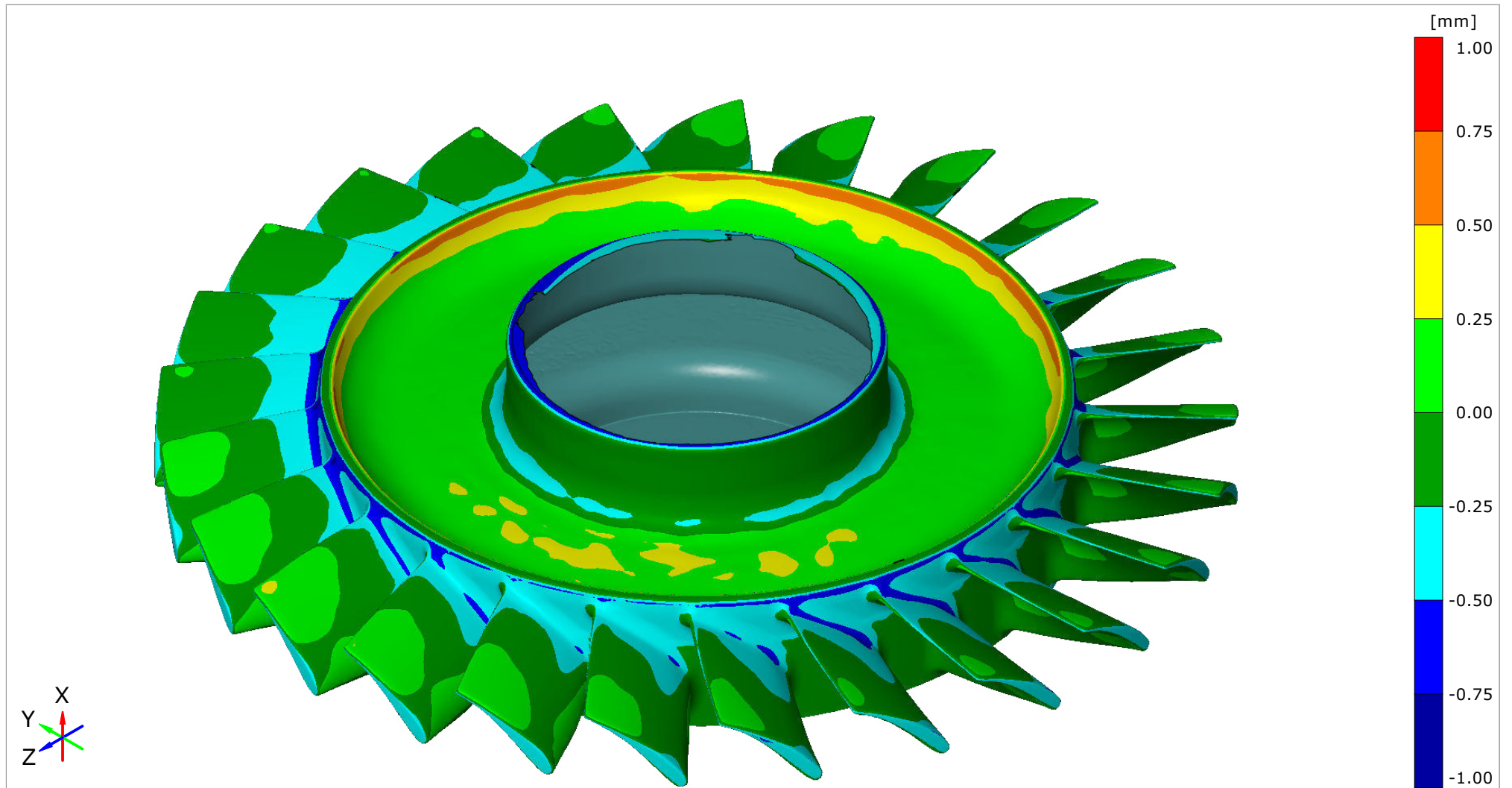
Color map of deviations from CAD model



Local best-fit 1

Length unit: mm

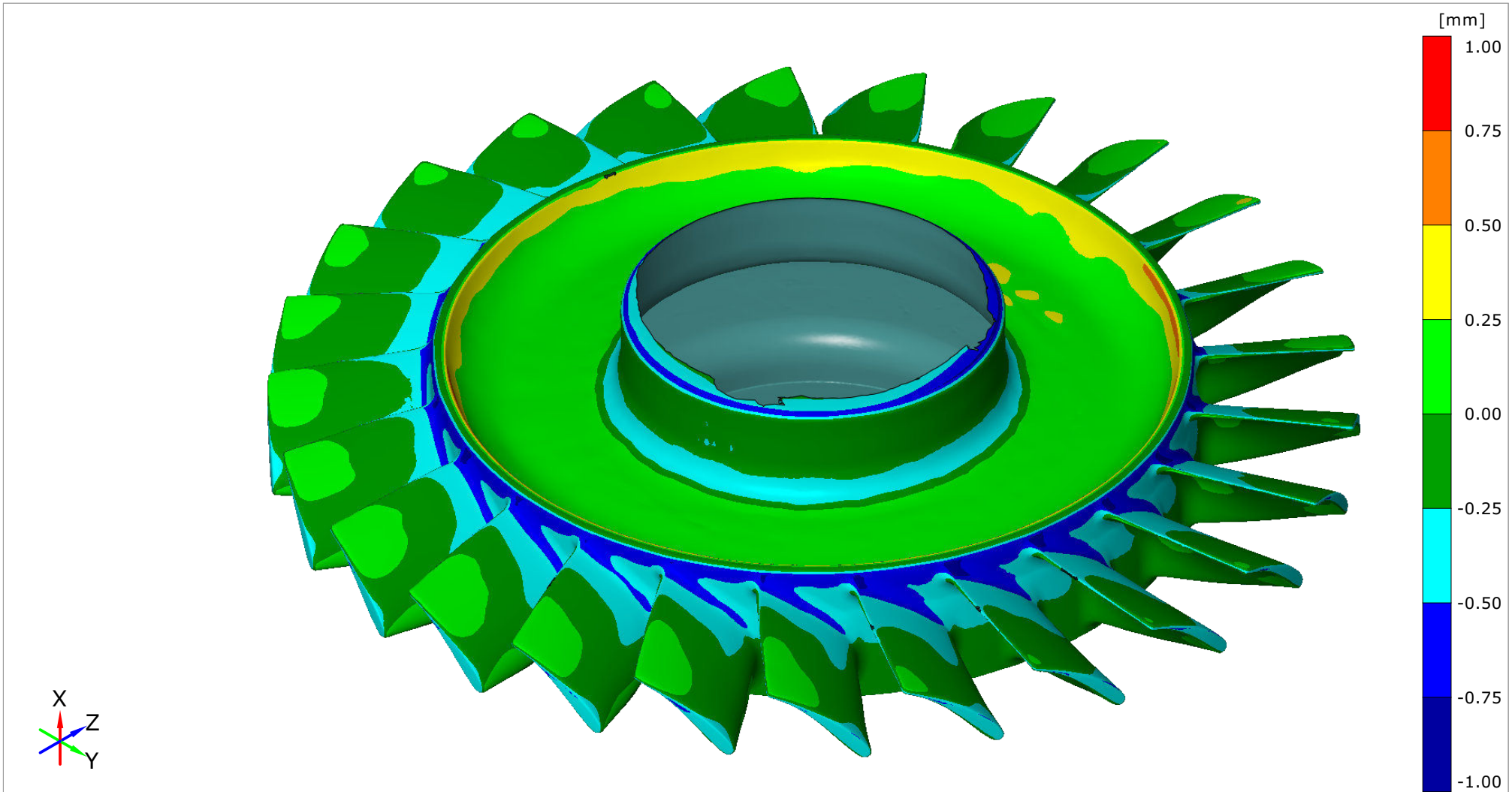
Color map of deviations from CAD model



Local best-fit 1

Length unit: mm

Color map of deviations from CAD model



Local best-fit 1

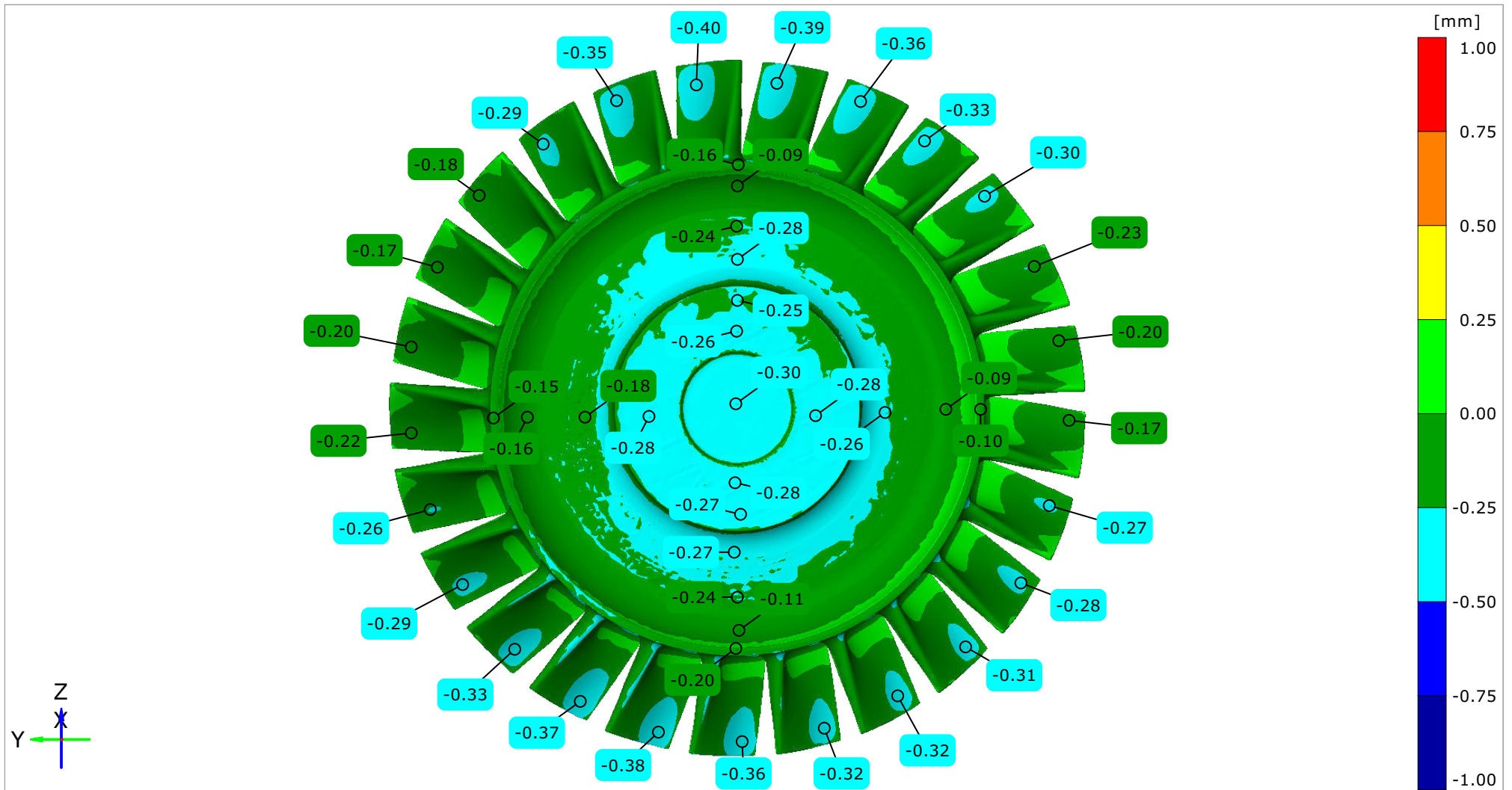
Length unit: mm

Oběžné kolo turbíny

Casting

7/12

Color map of deviations from CAD model



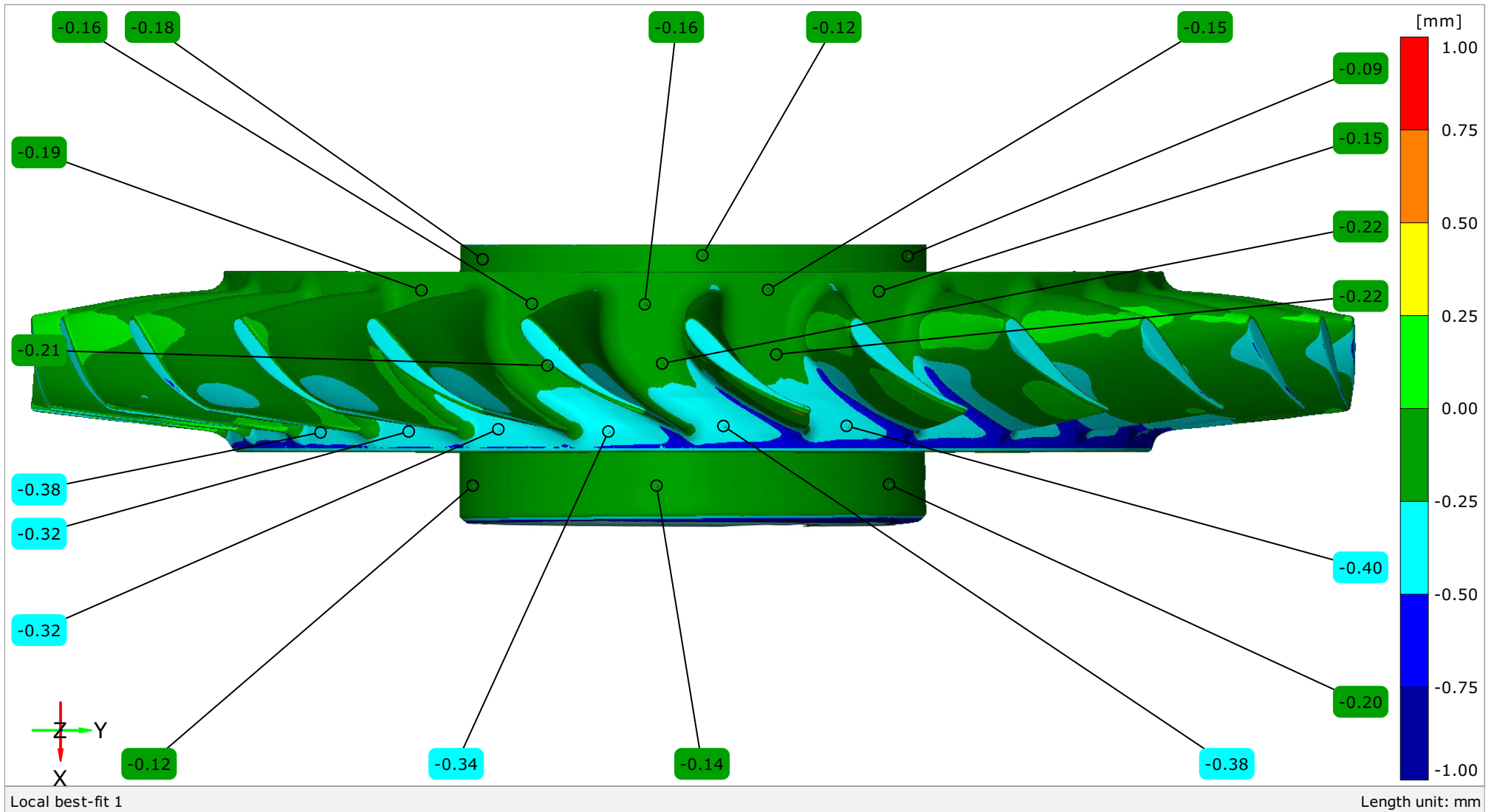
Local best-fit 1

Length unit: mm

Oběžné kolo turbíny

Casting

Color map of deviations from CAD model



Local best-fit 1

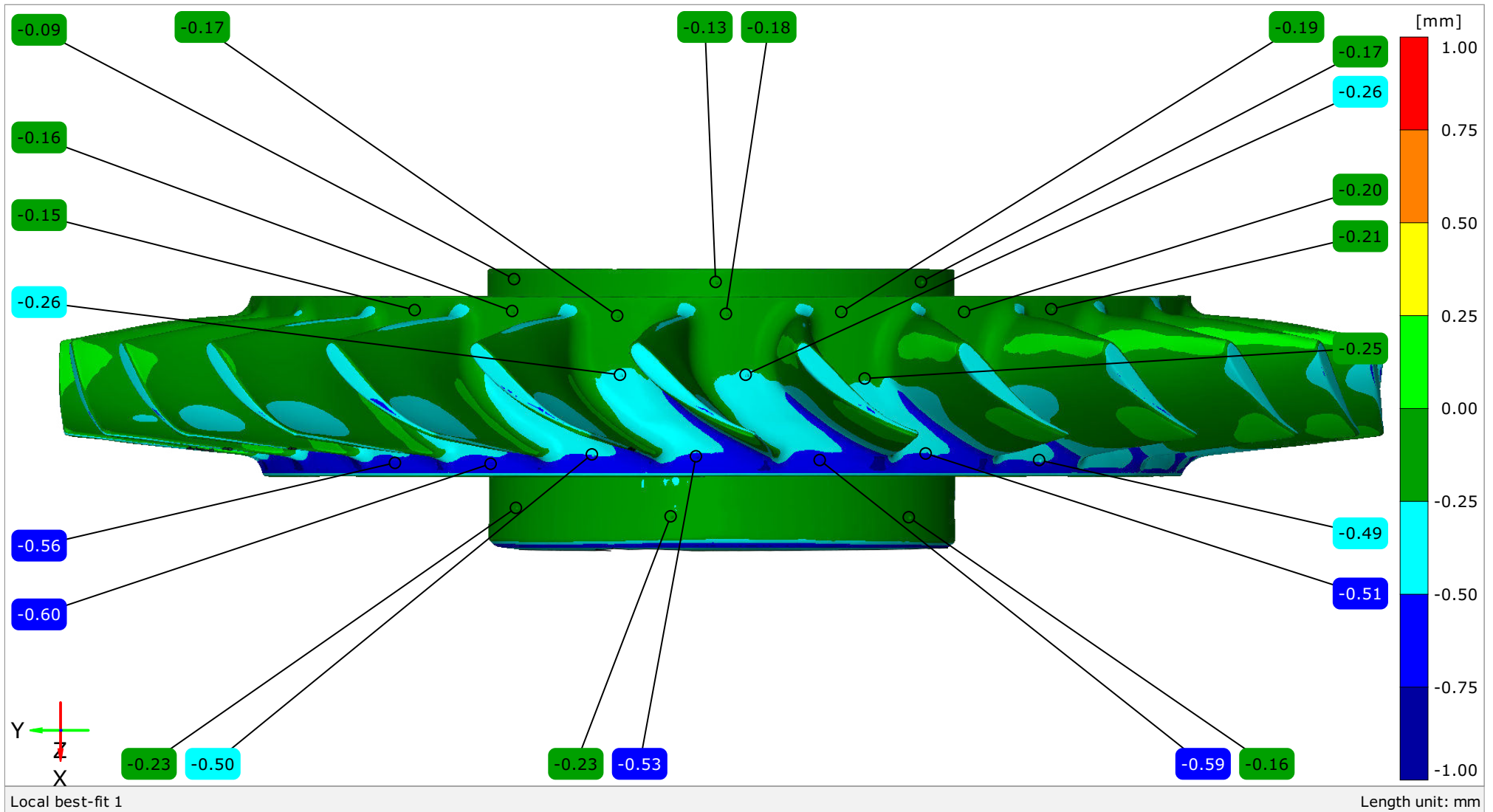
Length unit: mm

Oběžné kolo turbíny

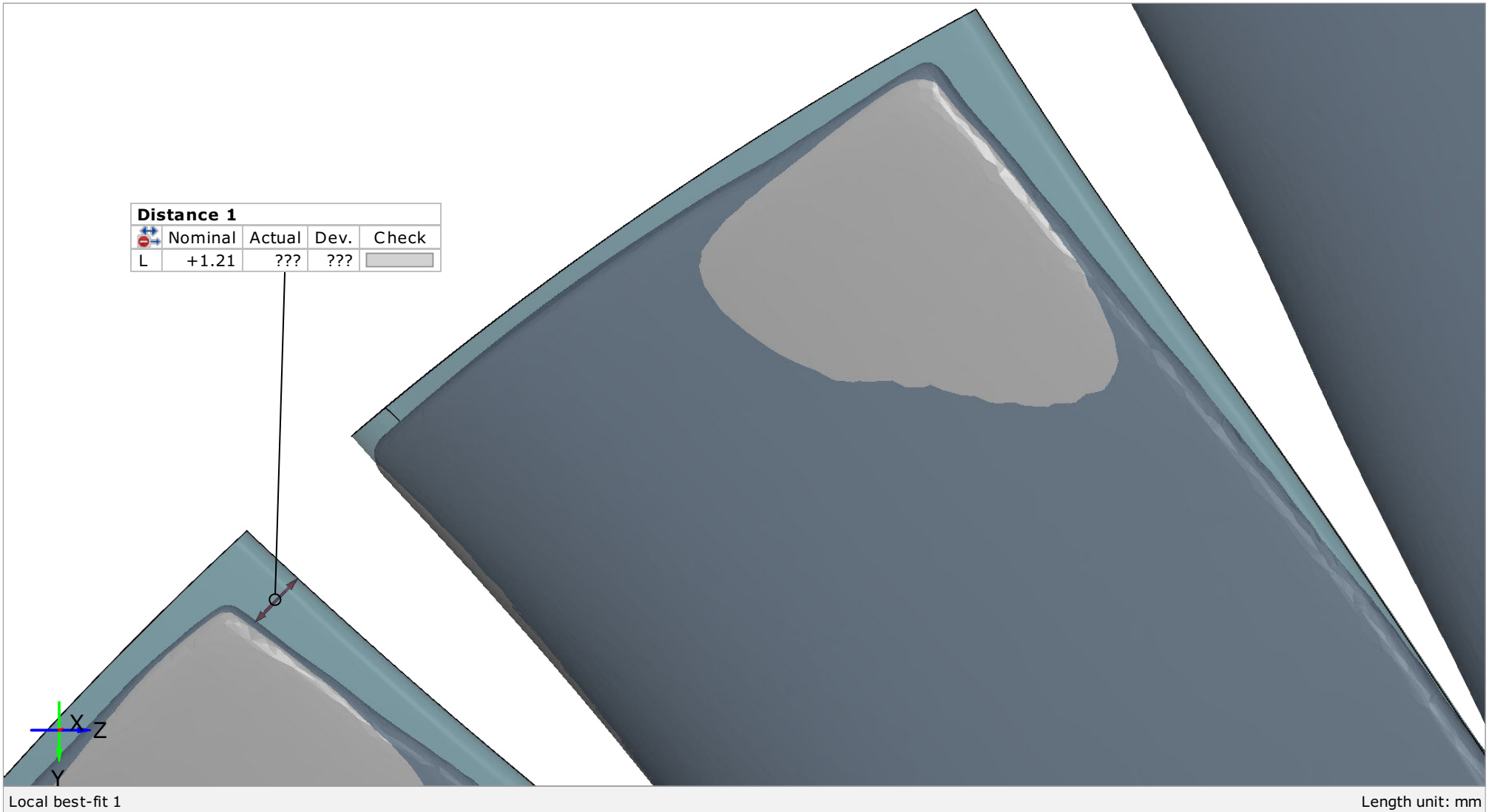
Casting

10/12

Color map of deviations from CAD model

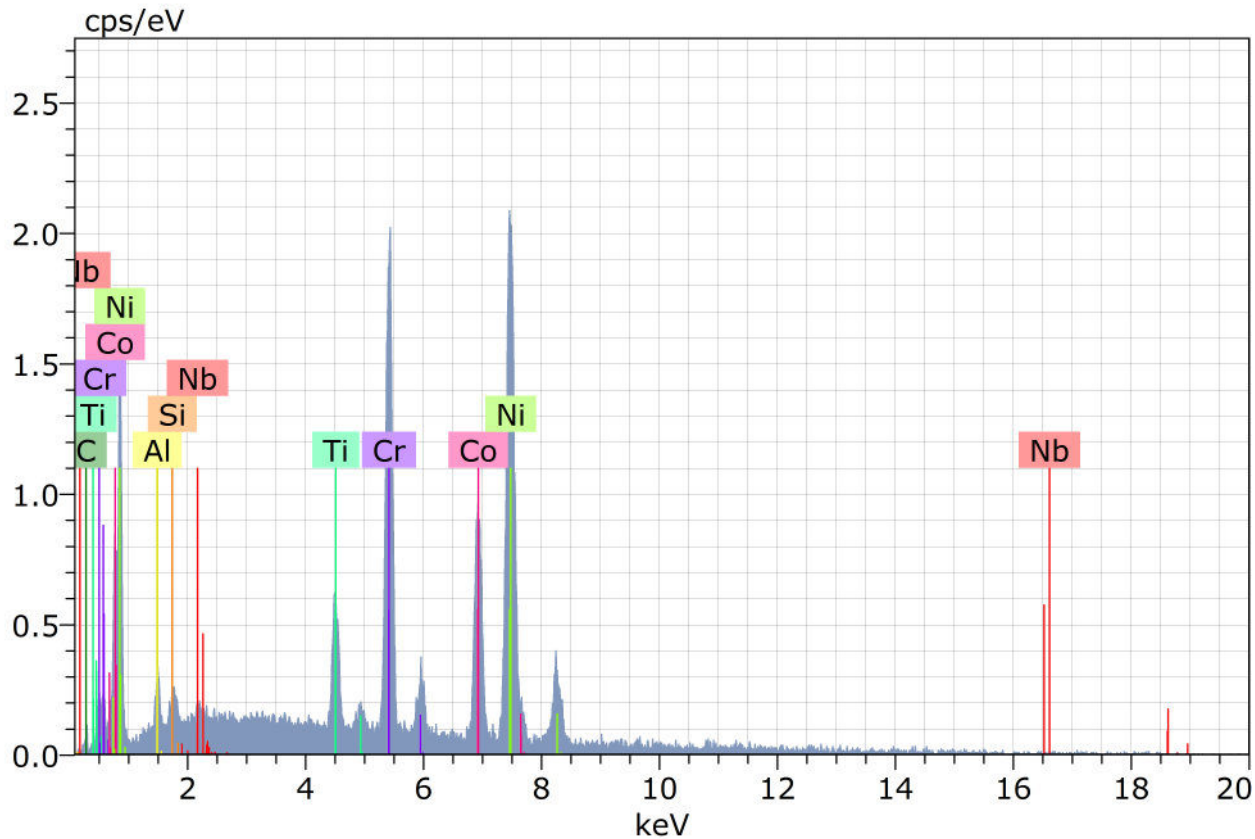


Detail lopatek



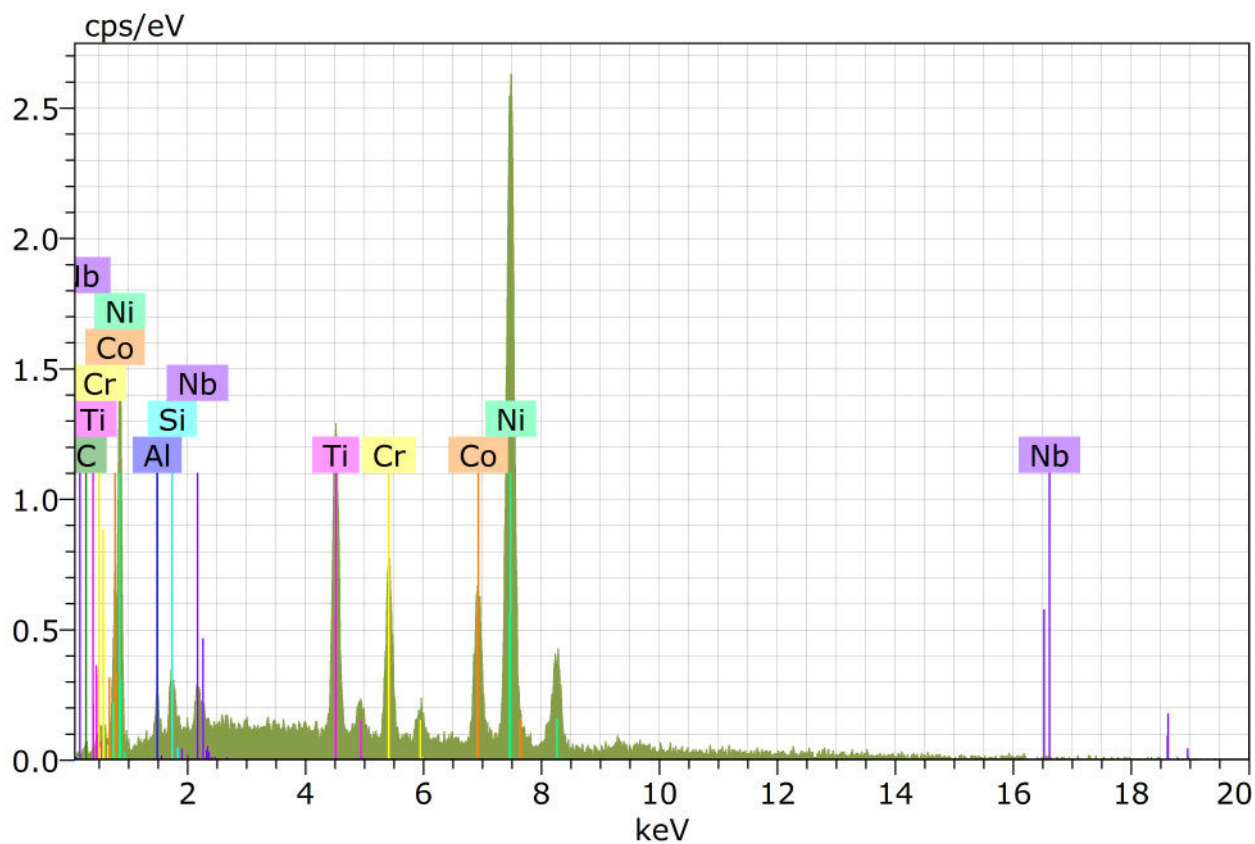
Local best-fit 1

Length unit: mm



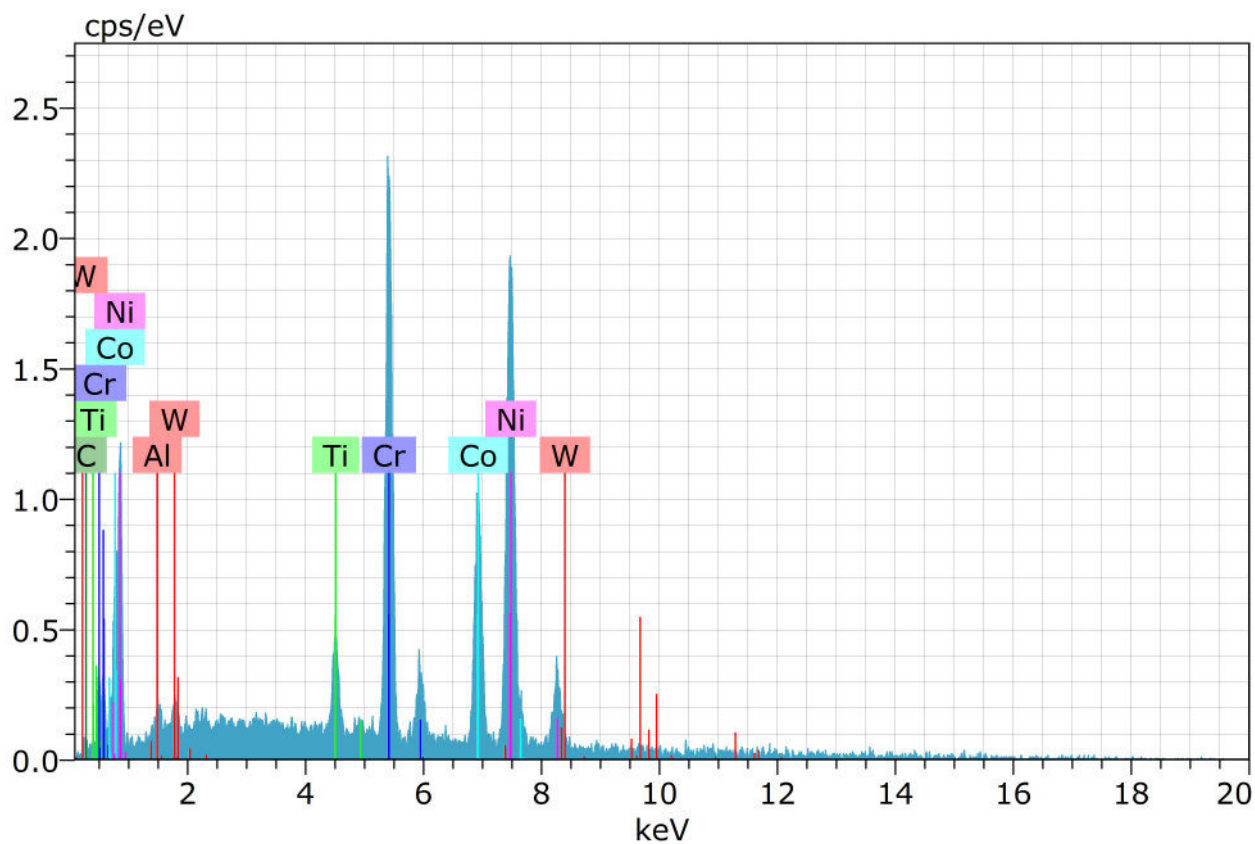
Spectrum: 40

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
C	6	K-series	1.66	1.83	7.87	0.96
Al	13	K-series	1.77	1.95	3.75	0.17
Si	14	K-series	0.70	0.78	1.43	0.09
Ti	22	K-series	4.30	4.74	5.12	0.20
Cr	24	K-series	17.52	19.32	19.22	0.56
Co	27	K-series	17.08	18.84	16.53	0.60
Ni	28	K-series	47.05	51.90	45.73	1.42
Nb	41	L-series	0.58	0.64	0.36	0.09
Total:			90.67	100.00	100.00	



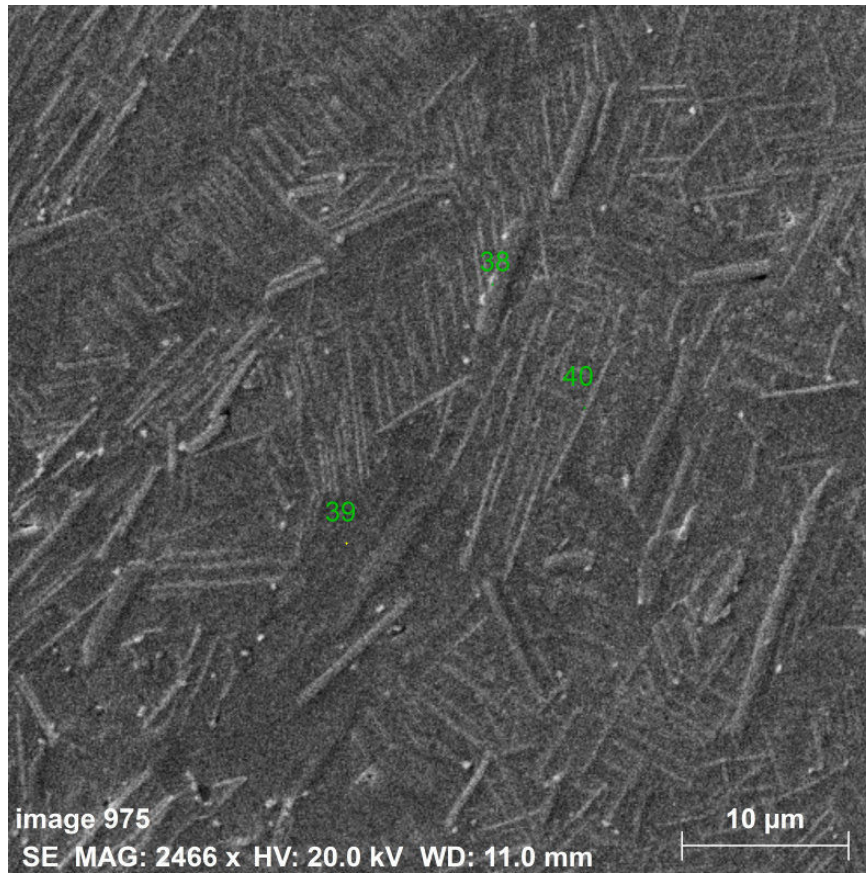
Spectrum: 38

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
C	6	K-series	1.39	1.57	6.81	0.92
Al	13	K-series	1.52	1.72	3.33	0.17
Si	14	K-series	1.42	1.60	2.97	0.13
Ti	22	K-series	10.11	11.40	12.44	0.37
Cr	24	K-series	6.66	7.52	7.55	0.27
Co	27	K-series	10.64	12.00	10.63	0.42
Ni	28	K-series	54.67	61.68	54.86	1.63
Nb	41	L-series	2.23	2.51	1.41	0.18
Total:			88.64	100.00	100.00	

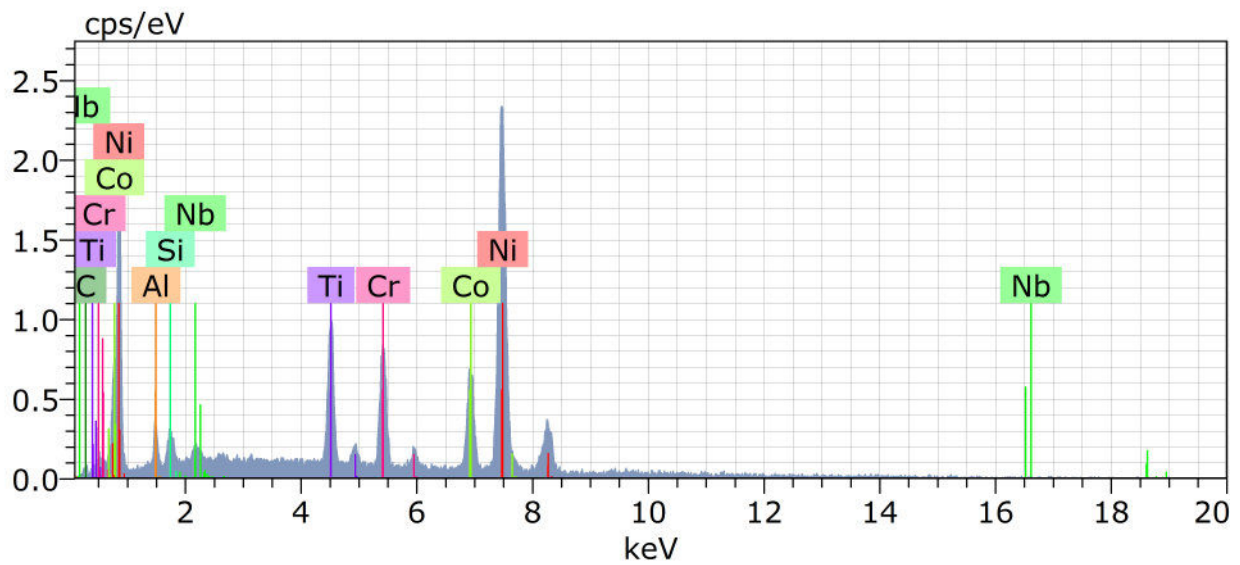


Spectrum: 39

El	AN	Series	unn. [wt.%]	C norm. [wt.%]	Atom. [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
C	6	K-series	0.95	1.18	5.27	0.76
Al	13	K-series	0.49	0.60	1.21	0.09
Ti	22	K-series	2.81	3.49	3.92	0.16
Cr	24	K-series	19.58	24.28	25.15	0.64
Co	27	K-series	17.56	21.78	19.90	0.64
Ni	28	K-series	39.11	48.51	44.51	1.23
W	74	L-series	0.13	0.16	0.05	0.07
Total:			80.61	100.00	100.00	

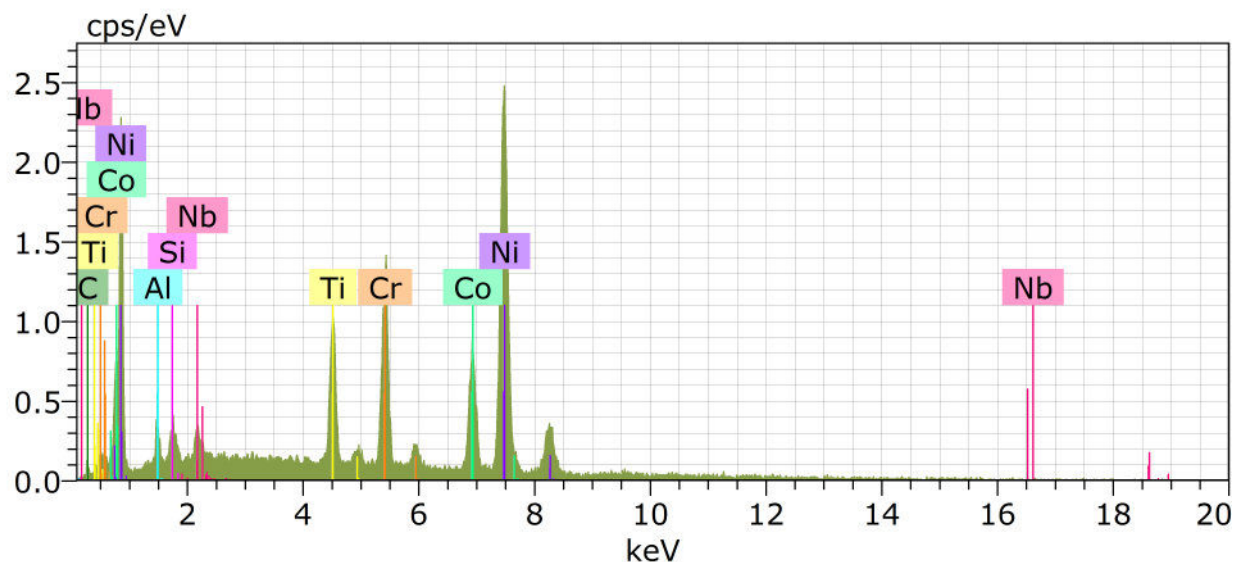


Příloha 4



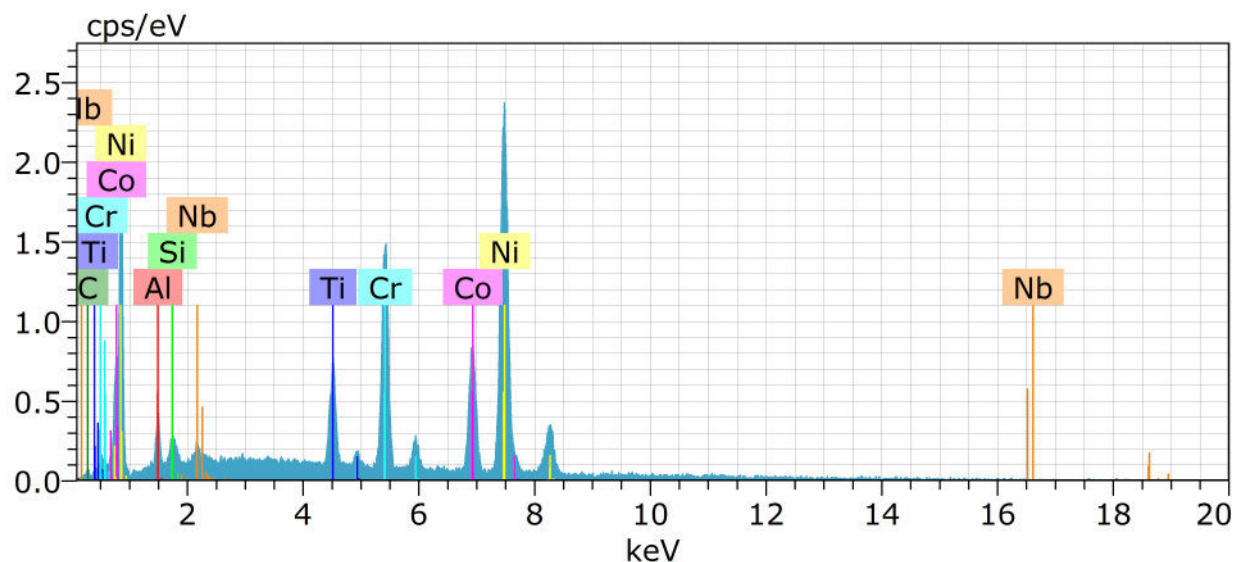
41 Date:5/28/2020 8:07:33 PM HV:20.0kV Puls th.:2.20kcps

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
C	6	K-series	1.64	1.86	7.94	0.85
Al	13	K-series	2.17	2.46	4.68	0.18
Si	14	K-series	1.30	1.47	2.70	0.11
Ti	22	K-series	8.11	9.19	9.85	0.30
Cr	24	K-series	8.30	9.40	9.29	0.30
Co	27	K-series	12.01	13.60	11.85	0.42
Ni	28	K-series	53.18	60.22	52.70	1.54
Nb	41	L-series	1.59	1.80	0.99	0.13
Total:			88.30	100.00	100.00	



40 Date:5/28/2020 8:04:08 PM HV:20.0kV Puls th.:2.45kcps

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
C	6	K-series	1.93	2.24	9.57	0.89
Al	13	K-series	1.41	1.65	3.13	0.13
Si	14	K-series	1.06	1.24	2.25	0.10
Ti	22	K-series	7.15	8.34	8.92	0.26
Cr	24	K-series	11.05	12.88	12.69	0.37
Co	27	K-series	12.84	14.97	13.01	0.44
Ni	28	K-series	48.25	56.26	49.09	1.40
Nb	41	L-series	2.08	2.42	1.33	0.14
Total:			85.77	100.00	100.00	



39 Date:5/28/2020 8:01:49 PM HV:20.0kV Puls th.:2.28kcps

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
C	6	K-series	1.50	1.64	7.10	0.75
Al	13	K-series	2.02	2.21	4.26	0.16
Si	14	K-series	0.77	0.83	1.55	0.08
Ti	22	K-series	5.29	5.77	6.28	0.21
Cr	24	K-series	14.12	15.39	15.42	0.45
Co	27	K-series	15.49	16.89	14.92	0.51
Ni	28	K-series	51.59	56.25	49.91	1.48
Nb	41	L-series	0.93	1.02	0.57	0.09
Total:			91.72	100.00	100.00	

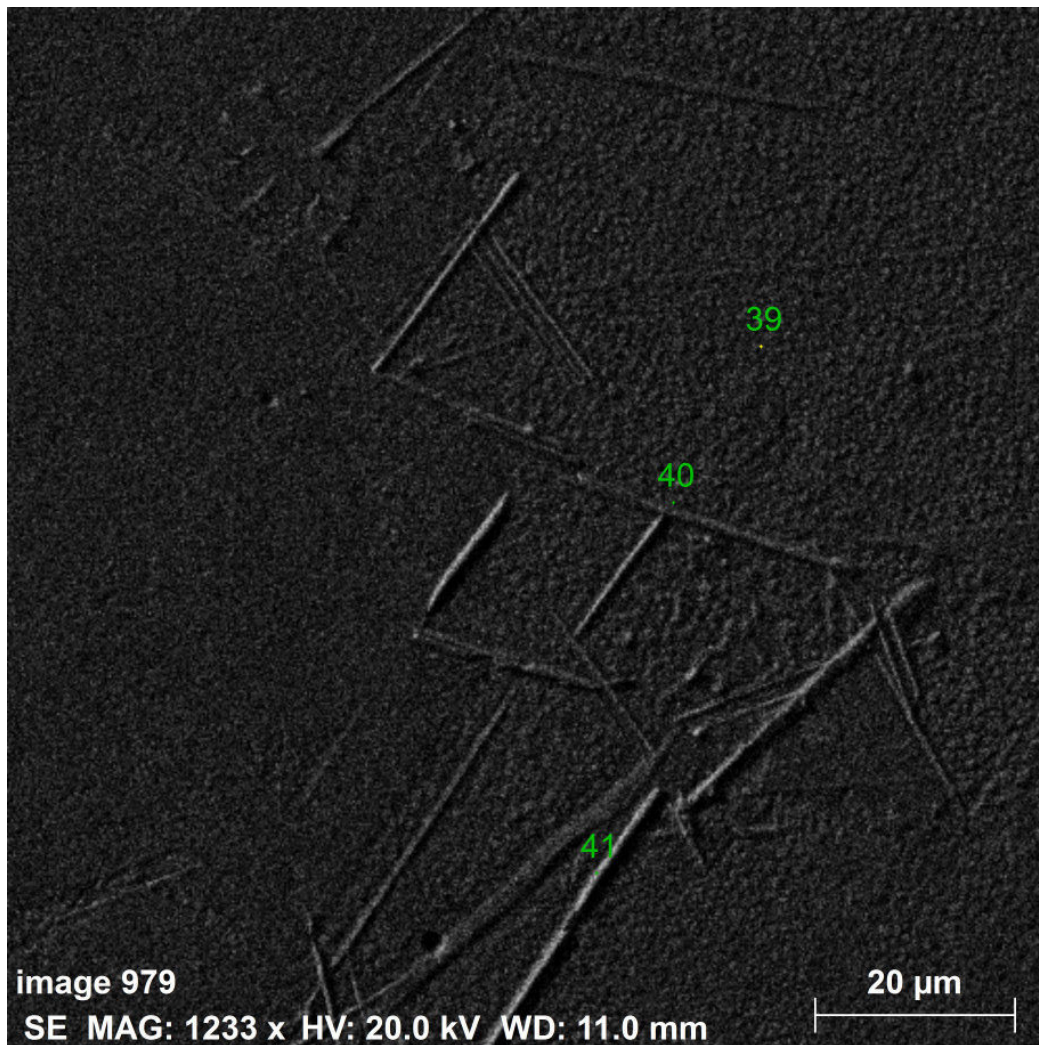


image 979
Date:5/28/2020 8:01:16 PM
Image size:500 x 500
Mag:1233.15243301852x
HV:20.0kV