



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA VLIVU VÝROBNÍ TECHNOLOGIE NA UŽITNÉ VLASTNOSTI ČÁSTI REDUKČNÍHO VENTILU

ANALYSIS OF INFLUENCE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY ON UTILITY PROPERTIES OF A REDUCING VALVE
PART

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Novotný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Michal Novotný
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	Ing. Jan Řiháček, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

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:

Analýza vlivu výrobní technologie na užité vlastnosti části redukčního ventilu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Současným trendem je implementace 3D tiskových metod kovů do výrobních procesů. 3D tisk tak lze uplatnit v mnoha odvětvích. Jedním z nich je i energetika, resp. výroba obtokových, redukčních a jiných typů ventilů. Uvedený způsob zhotovení dílců poskytuje možnosti, jak zlepšit jejich užité vlastnosti i jak se v konečném důsledku bránit erozi redukčních prvků pod nápořem tlaku a teploty páry. Smyslem práce je tak kompletní analýza a porovnání dvou přístupů výroby, a to tradiční výrobní technologie a 3D tisku.

Cíle diplomové práce:

- Popis konvenční technologie výroby redukčních prvků,
- popis aktuálních technologií 3D tisku kovů,
- popis výroby redukčních prvků touto nekonvenční technologií,
- porovnání jednotlivých typů výroby (výhody a nevýhody obou řešení, překážky při výrobě apod.),
- testování hotových prvků vyrobených oběma technologiemi (kapacitní testy, odolnost proti erozi),
- vyhodnocení získaných výsledků testů,
- návrhy na zlepšení a optimalizaci výroby.

Seznam doporučené literatury:

ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook volume 6: Welding, Brazing and Soldering. Materials Park, Ohio: American Society for Metals, 1993. ISBN 978-0-87170-382-8.

DANIELSEN EVJEMO, Linn, Signe MOE, Jan Tommy GRAVDAHL, Olivier ROULET-DUBONNET, Lars Tore GELLEIN a Vegard BROTAN. Additive manufacturing by robot manipulator: An overview of the state-of-the-art and proof-of-concept results. In: 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. IEEE, 2017. ISBN 978-1-5090-6505-9.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER. Additive Manufacturing Technologies. 2010. ISBN 978-1-4419-1119-3.

GROOVER, Mikell. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems. Hoboken: JOHN WILEY, 2010, 1012 s. ISBN 978-0470-467002.

KRATOCHVÍLOVÁ, Jitka. 3D tisk. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. ISBN 978-80-7414-936-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Předkládaná práce je zaměřena na porovnání aktuálně užívané technologie výroby redukčních rezistorů, tedy elektroerozivní obrábění v kombinaci s pájením na jedné straně a využití vhodné aditivní technologie na straně druhé. Kromě čistě technologických aspektů, jakými jsou jednotlivé procesy výroby nebo jejich příprava, jsou dále porovnány i ekonomické aspekty doplněné o posouzení dodacích časů hotových dílů. Analýze je podroben i environmentální dopad obou přístupů výroby. Jednotlivá porovnání jsou základem pro posouzení, zda nahrazení konvenčního přístupu výroby aditivní technologií je v tomto případě výhodné. Výsledky tohoto posouzení je možné následně využít pro budoucí aplikace uvažovaných aditivních přístupů výroby v případě podobných součástí.

Klíčová slova

Aditivní technologie, DMLS, Elektroerozivní obrábění, pájení, rezistor

ABSTRACT

The present work is focused on the comparison of the currently used technology for the production of reducing resistors, i.e. electroerosive machining in combination with soldering on one side and the use of a suitable additive technology on the other hand. In addition to the purely technological aspects, such as the individual production processes or their preparation, economic aspects are also compared, supplemented by an assessment of the delivery times of the finished parts. The analysis is carried out The environmental impact of both production approaches is also analysed. The individual comparisons form the basis for to assess whether the replacement of the conventional manufacturing approach by additive manufacturing is advantageous in this case. The results of this assessment can then be used for future applications of the considered additive manufacturing approaches for similar components.

Key words

Additive manufacturing, DMLS, Electrical discharge machinig, brazing, resistor

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVOTNÝ, Michal. *Analýza vlivu výrobní technologie na užité vlastnosti části redukčního ventilu* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140984>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Řiháček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Analýza vlivu výrobní technologie na užité vlastnosti části redukčního ventilu vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

.....
místo, datum

.....
Michal Novotný

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Janu Řiháčkovi Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Děkuji společnosti IMI CCI Czech Republic s.r.o. za možnost psát práci pod záštitou této firmy a kolegům za veškerou pomoc při její kompletaci.

OBSAH

ÚVOD	7
1 ROZBOR ANALYZOVANÉHO DÍLCE	8
1.1 Aktuální stav výroby	10
1.1.1 Elektroerozivní obrábění	11
1.1.2 Příprava disků před pájením	12
1.1.3 Pájení rezistorů	13
1.1.4 Kontrola	14
1.2 Alternativní přístup výroby atmosférického rezistoru	17
2 METODY 3D TISKU	18
2.1 Direct Energy Depositing (DED)	19
2.2 Wire Arc Additive Manufacturing	20
2.3 Plasma Metal Deposition (PDM)	21
2.4 Powder Bed Fusion (PBF)	22
2.5 Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM)	23
2.6 Zhodnocení vhodnosti a výběr optimální metody	24
3 VYUŽITÍ DMLS METODY PŘI VÝROBĚ	28
4 SROVNÁNÍ STÁVAJÍCÍ A INOVOVANÉ VÝROBY	33
4.1 Technologické hledisko	34
4.1.1 Obrobitelnost	35
4.1.2 Mechanické vlastnosti	36
4.1.3 Chemické složení	38
4.1.4 Přesnost průřezu labyrintů	39
4.2 Procesní hledisko	43
4.2.1 Průtokový koeficient	44
4.2.2 Regulace	46
4.3 Ekonomie	48
4.3.1 Výrobní náklady	49
4.3.2 Dodací lhůty	50
4.3.3 Reakce na změnu výroby	51
4.4 Ekologie	52
4.4.1 Recyklace	54
4.5 Výsledné zhodnocení a diskuse	56
ZÁVĚR	59
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	60
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	66
SEZNAM PŘÍLOH	68

ÚVOD

Energetický průmysl je jedním ze stěžejních odvětví, díky kterému může dnešní společnost fungovat. energii, obzvláště elektrickou, lze vyrábět několika různými způsoby. Jedním z nich je spalování fosilních paliv v tepelných elektrárnách. Aby tento způsob byl co možná nejúčinnější, využívá se před samotným vstupem média pohánějícího turbínu redukčních ventilů. Tyto ventily slouží k přípravě ideálních podmínek média, které vstupuje do prostoru turbíny až v momentě, kdy dosáhne ideálního tlaku a teploty. Tyto ideální podmínky jsou základním předpokladem pro dlouhodobě účinnou a bezpečnou výrobu elektrické energie v tepelných elektrárnách. [1]

Ideální podmínky spalovacích elektráren jsou charakteristické vysokými teplotami a tlaky, při jejichž kombinaci mohou vznikat určité jevy, které mohou negativně ovlivnit funkci ventilů. Aby bylo možné se těchto jevů vyvarovat, musí být dle toho uzpůsobena i výroba daných ventilů včetně jejich vnitřních součástí. Aby bylo docíleno optimální funkčnosti zmíněných zařízení, mnohdy se vyplatí kombinovat různé technologie výroby. [2]

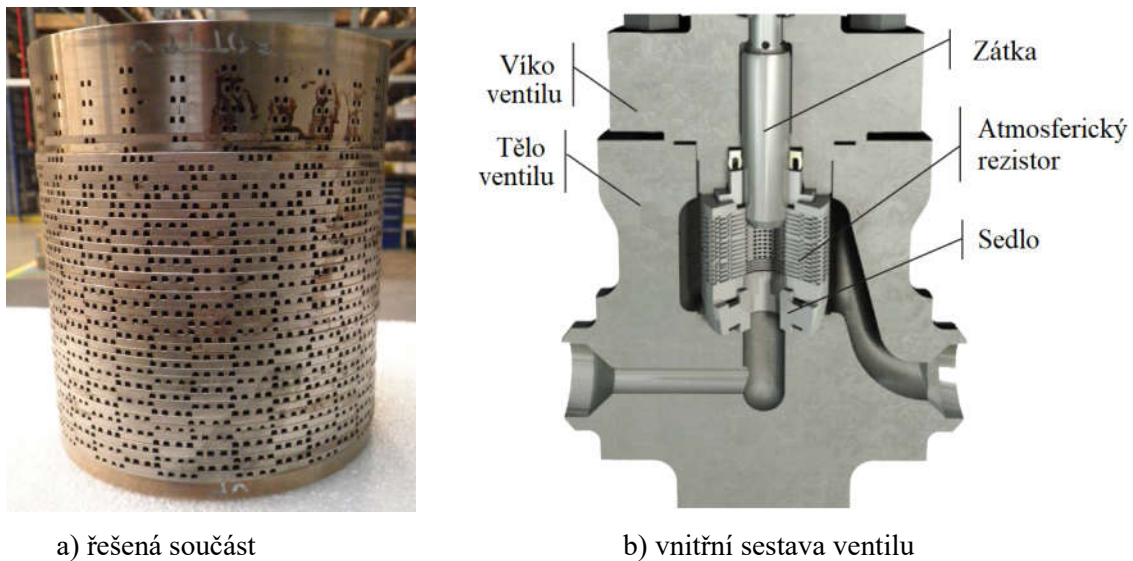
Redukční ventily (viz obr. 1) a jejich komponenty je možné vyrábět konvenčními technologiemi, jakými jsou obrábění, slévání, či tváření. Dnes je možnost tyto technologie propojovat a získat tak to nejlepší z každé metody, ať už s vidinou ideální funkčnosti zařízení, nebo jeho neekonomičtější výroby. Při propojování daných technologií je cílem dosáhnout co možná nejlepší optimalizace všech komponent. Z tohoto důvodu se v daném odvětví v poslední době dostává do povědomí konstruktérů i aditivní technologie, které vnášejí do problematiky výroby redukčních ventilů nové možnosti. [1; 3]



Obr. 1 Redukční ventily [1].

1 ROZBOR ANALYZOVANÉHO DÍLCE

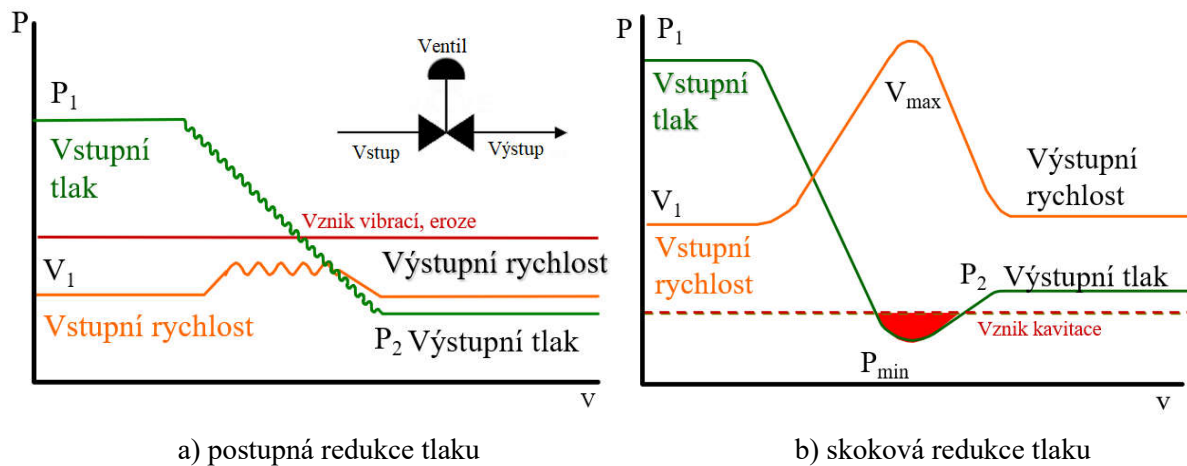
Řešenou problematikou práce je dílec redukčního ventilu zvaný atmosférický rezistor vyobrazený na obr. 2a. Rezistor slouží ke kontrole a redukcí vstupujícího tlaku a teploty média proudícího skrz něj. Schopnost kontroly a nastavování teploty a tlaku média má zásadní vliv z pohledu bezpečnosti, spolehlivosti a efektivnosti provozních podmínek tepelných elektráren. Ideálních podmínek v podobě teploty a tlaku páry je dosahováno při průchodu páry přehříváčem. Ventily řídící vstřik páry do přehříváčů jsou finálním kontrolním prvkem této oblasti sekundárního okruhu spalovacích elektráren. Tyto ventily jsou tedy kritickými komponentami zodpovědnými za jemné řízení teploty páry. Odpovídající nastavení je zajištěno škrcením průtoku redukčními prvky ventilu, tedy zasouváním zátky do atmosférického rezistoru, jak lze vidět na obr. 2b.



Obr. 2 Atmosférický rezistor a jeho uložení v redukčním ventilu.

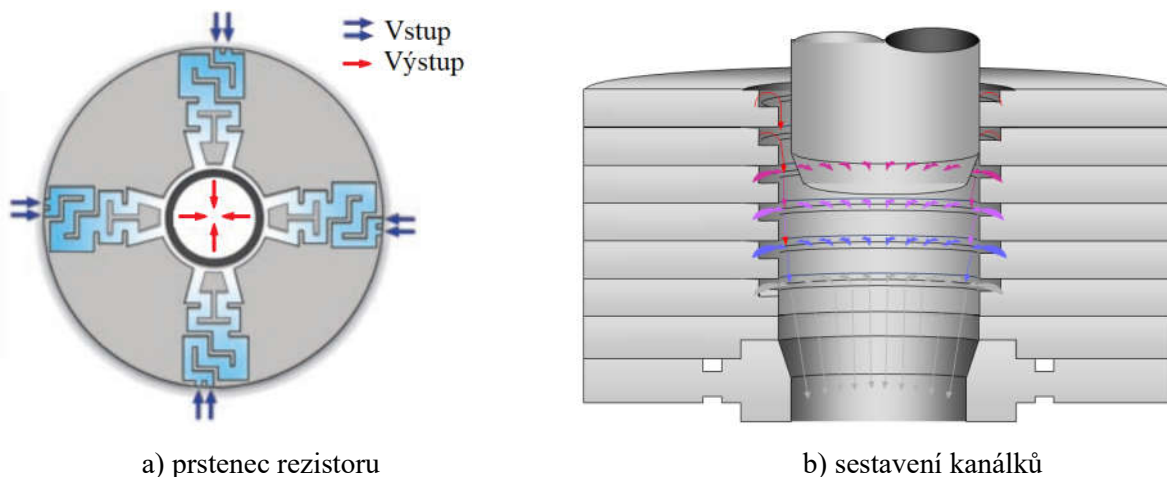
Systémem, kterým atmosférický rezistor reguluje průtok v daném případě, se nazývá DRAG® technologie. Při užití této technologie se rezistor skládá z určitého množství definovaných prstenců zajišťujících jemnou regulaci tlaku tekutiny pro zamezení vzniku kavitace a jiných nežádoucích jevů při tomto procesu. Každý prstec má na svém povrchu vyražené předem definované průchozí otvory, kdy každá sada otvorů na disku odpovídá jedné redukční fázi atmosférického rezistoru. Jednotlivé prstence jsou na sebe kladeny dle specifického pořadí tak, aby otvory na povrchu byly vzájemně průchozí a vytvářely tak kanálek (labyrint) začínající na vnějším obvodu prstence a končící na jeho vnitřním obvodu. Tento způsob regulace byl patentován v roce 1999. Díky vzniku nových technologií výroby je dnes užíváno elektroerozivní obrábění, které nahradilo ražení otvorů do prstenců. Daný přístup umožňuje vytvoření labyrintů na jednom prstenci viz obr. 3a. [1; 4; 5]

Přínos DRAG® technologie spočívá ve schopnosti postupného snižování tlaku do malých fází, což vede k mírným změnám rychlosti proudící tekutiny, viz obr. 4a. Možnost vyhnout se skokové změně rychlosti proudění výrazně snižuje nebezpečí vzniku kavitace a vibrací, což má za následek erozi redukčních částí, případně jiných částí ventilu nebo pokračujícího potrubí, viz obr. 4b. Zároveň se snižuje hluk vznikající při redukcí průtoku, což je oceněno především při funkci ventilů v osídlených oblastech, ve kterých jsou elektrárny provozovány. [3]



Obr. 4 Průběh změny tlaku a teploty při užití DRAG® a standardního řešení [1].

Při výrobě rezistoru EDM metodou jsou jednotlivé prstence s vyhloubenými kanálky na sebe kladeny dle tvaru těchto kanálků. Způsob kladení kanálků závisí na konfiguraci labyrintů prstence, které jsou odpovědné za regulaci média. Sada prstenců se stejnou konfigurací kanálků tvoří jeden redukční stupeň (*Unit*). Jednotlivé stupně se od sebe liší mírou regulace průtoku. Standardní atmosférický rezistor sestává z několika regulačních stupňů, viz obr. 3 b), kde jsou stupně reprezentovány odpovídající barvou. Červená zóna reprezentuje vysoký průtok média (nízkou regulaci) a šedá zóna reprezentuje nízký průtok (vysoký stupeň regulace průtoku).



Obr. 3 Skladba EDM atmosférického rezistoru.

Zařízení musí zvládat tlaky a teploty vyhovující americké statní normě ANSI B16. V praxi provozních podmínek to znamená teploty okolo 260 °C a tlaky pohybující se do 420 barů [6]. V závislosti na teplotní a tlakové hladině se volí odlišné materiály pro výrobu řešeného rezistoru, a to ze tří alternativ:

- austenitická korozivzdorná ocel (ČSN 17 349 / DIN 1.4404 / AISI 316L),
- martenzitická korozivzdorná ocel (ČSN 17 021 / DIN 1.4006 / AISI 410),
- chrom-niklová superslitina (DIN 2.4668 / N07718).

Pro účely této práce bude porovnán atmosférický rezistor současně vyráběný tzv. EDM metodou (elektroerozivního obrábění doplněného pájením plechů) a jinou metodou. Ta vzejde z rozboru alternativních možností. Pro obě metody bude jako základní materiál použita chrom-niklová superslitina. Současný stav výroby bude popsán níže.

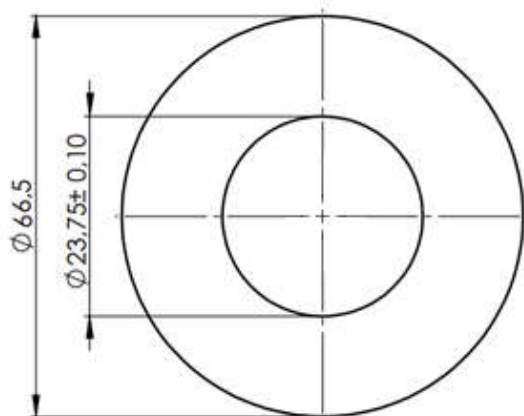
1.1 Aktuální stav výroby

Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole, v současné době se pro výrobu prstenců atmosférického rezistoru využívá technologie elektroerozivního obrábění v kombinaci s pájením. Samotný proces výroby rezistoru se kromě erodování a pájení jednotlivých prstenců skládá z několika dílčích kroků dle schématu, na obr. 5. Každý z těchto kroků je nezbytný pro následné sestavení rezistoru. Především pak pro zajištění přesnosti hotového redukčního prvku, což je nutné pro bezpečné a dlouhodobé fungování celého ventilu. Jednotlivé kroky budou v práci popsány níže a doplněny o podrobnější popis technologie využití při specifické výrobě řešeného dílce.



Obr. 5 Schéma postupu operací při výrobě EDM atmosférického rezistoru.

Polotovarem pro výrobu EDM disků pro atmosférický rezistor je laserem řezaný plech tvaru prstence. Jak vnější, tak vnitřní průměr prstence jsou řezány na hotové rozměry dle obr. 6. Vnější průměr se řeže bez následného opracování, tedy s drsností $R_a = 3,2 \mu\text{m}$, která je definovaná přesností zařízení. Vnitřní průměry se řežou s tolerancí $\pm 0,1 \text{ mm}$, a to z důvodu následného obrobení po spájení disků k sobě. Plechy jsou voleny ve standardizovaných válcovaných tloušťkách a jim odpovídajícím mechanickým vlastnostem. Tloušťka plechu je volena dle výšky budoucího kanálku, který je erodován do poloviny jeho hloubky.



a) rozměry prstence



b) reálný prstec

Obr. 6 Rozměry pro řezaný plech prstence.

1.1.1 Elektroerozivní obrábění

Elektroerozivní obrábění je proces obrábění elektricky vodivých materiálů s využitím kontrolovaných výbojů. K výbojům dochází mezi nástrojem (elektrodou) a obrobkem (katodou), který je v průběhu obrábění kompletně ponořen v dielektriku. Elektroerozivní obrábění můžeme rozdělit dle typu výsledných obrobků a tvarů, řezání drátkem, děrování a hloubení. Právě hloubení je aktuální způsob výroby „labyrintů“ v jednotlivých prstencích. [7]

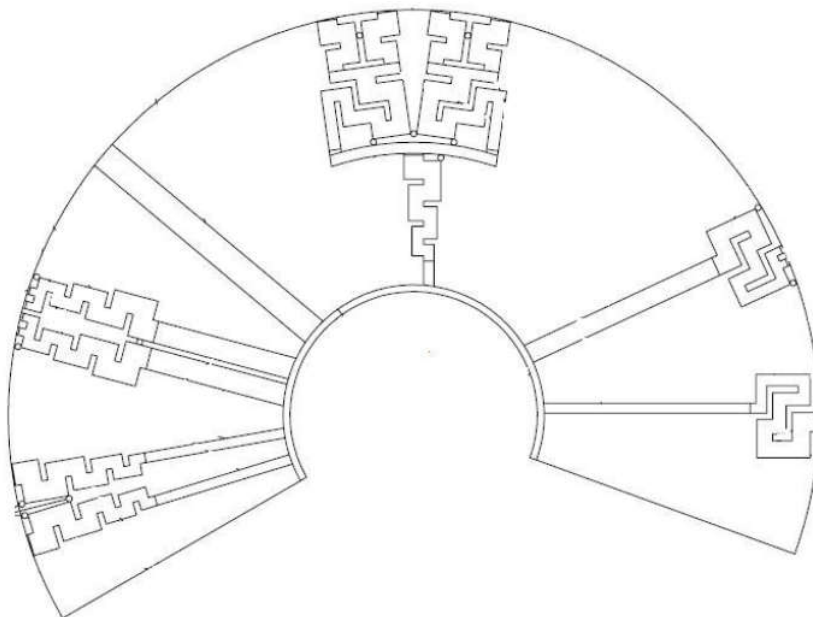


a) elektroda

b) proces hloubení

Obr. 7 Elektroda a nástin procesu elektroerozivního obrábění.

Metoda navržená pro vytvoření mělkých dutin s komplexními tvary, se nazývá hloubení. Ta je hojně využívaná pro tvorbu razníků nejrůznějších tvarů případně forem pro vstřikování plastů. Základem této technologie je výroba elektrody v požadovaném tvaru budoucí dutiny tzv. pozitiv, viz obr. 7a, na kterém je elektroda pro výrobu kanálků. Tato elektroda je následně pomalu nořena do obrobku (obr. 7b) kde díky výbojům při dodržení předepsané vzdálenosti dochází k vyjiskřování povrchu obrobku a vzniku dutiny dle tvarů elektrody, které jsou předem navrženy dle požadovaných procesních parametrů, viz obr. 8.



Obr. 8 Detail různé konfigurace kanálku.

Přítomností proudícího dielektrika dochází k odplavování erodovaných částic povrchu obrobku. Tímto typem elektroerozivního obrábění jsou tvořeny labyrinty v jednotlivých discích, které po následném spájení tvoří atmosférický rezistor. Pro elektroerozivní obrábění prstenců byl použit stroj Gromax P46+E100A a proces hloubení probíhal za následujících parametrů:

- hloubka erodování: $0,5 \cdot t_{\text{plech}} (\pm 0,05 \text{ mm})$,
- materiál elektrody: Cu,
- rychlost řezu: $4\text{--}6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,
- intenzita proudu: $I = 3 \text{ A}$,
- napětí: $U = 200 \text{ V}$. [7; 8]

1.1.2 Příprava disků před pájením

Po elektroerozivním obrábění prstenců následuje praní, při kterém je dosaženo odmaštění a očištění disků od nežádoucích částic, které by mohly narušit následující procesy při výrobě samotného rezistoru a tím jej znehodnotit. Pro praní je užitá prací vana naplněná acetonem, který pohlcuje vzdušnou vlhkost a rozpouští oleje. Samotný proces praní je rozdělen do dvou fází. První je hrubé praní, které následuje po operaci hloubení a během kterého jsou disky zbaveny velkých částic zbylého materiálu a mastnoty obsažené v erodovací lázni. Praní na čisto je druhou fází praní. Ten bezprostředně přechází procesu nanášení pájky, aby se pájka dobře nanášela, především aby bylo možno pokrýt požadované plochy disku její souvislou vrstvou. Opět dochází k odstranění hrubších částic a především mastnot [9].

Odstraňování otřepů neboli broušení disků probíhá za pomoci excentrické brusky s jemným brusným papírem, případně brusným kamenem pro docílení požadovaných vlastností plochy. Povrch ploch disku se brousí z důvodu snížení drsnosti, čímž se zvyšuje velikost kontaktní plochy mezi jednotlivými disky. Zároveň se upravuje disk do požadované tloušťky, aby po následném složení všech disků byla dosažena požadovaná výška rezistoru.

Disky se tryskají v pískovacím boxu, znázorněném na obr. 9a, kde získávají výsledný matný povrch. Tryská se směsí SiC po obou povřích disku, tedy jak na hladkých povřích, tak ve vyhloubených labyrintech. Vnější průměr disku se netryská. Tryskání je zásadní úkon v procesu výroby disku při kterém dochází k odstranění nečistot a ještě vyššímu zjemnění povrchových nerovností, který musí předcházet následnému nanášení pájky. Obr. 9b znázorňuje optický rozdíl znatelný na disku s otryskanou a neotryskanou částí plochy.



a) tryskáč box



b) zčásti tryskaný prstence

Obr. 9 Tryskání prstenců.

Disky užívané pro sestavu EDM rezistoru musí splňovat podmínku rovinnosti, a to s maximální hodnotou 0,1 mm pro disky s průměrem do 102 mm (4“), případně 0,15 mm pro disky s průměrem větším než 102 mm. Rovinnost se měří pomocí úchylkoměru, případně spárových měrek. Tato podmínka je nutná pro dodržení požadované výšky kompletního rezistoru, pro který je v redukčním ventilu obroběný prostor a závisí na něm i tolerance ostatních vnitřních dílců ventilu. Rovnají se pouze erodované disky, koncové disky se nerovnají. Samotný proces rovnání lze provádět třemi způsoby v závislosti na průměru a míře deformace daného disku. Pro rovnání jsou využity tři přístupy, dle velikosti odchylky od požadované rovinnosti.

- **Rovnění lisem** – využíváno především pro disky s minimální odchylkou od požadované tolerance rovinnosti. Pro daný proces je nutné použít odpovídajících přípravků vhodných pro rovnání disku s daným vnějším průměrem (deska, talíř, trn).
- **Rovnění přes hranu** – pokud je rovnání disku pomocí lisu nedostatečné, využívá se tzv. rovnání přes hranu. Disk se při tomto procesu ohýbá lidskou silou přes hranu pracovní desky stolu pro docílení požadované tolerance rovinnosti.
- **Rovnění poklepem** – tento typ rovnání se provádí pomocí gumové či plastové paličky, kdy se jejím poklepem na disk položený na gumovou podložku dosáhne „propružení“ disku. Následně je disk položen na ocelovou desku a poklepem po celém obvodu disku se dorovná.

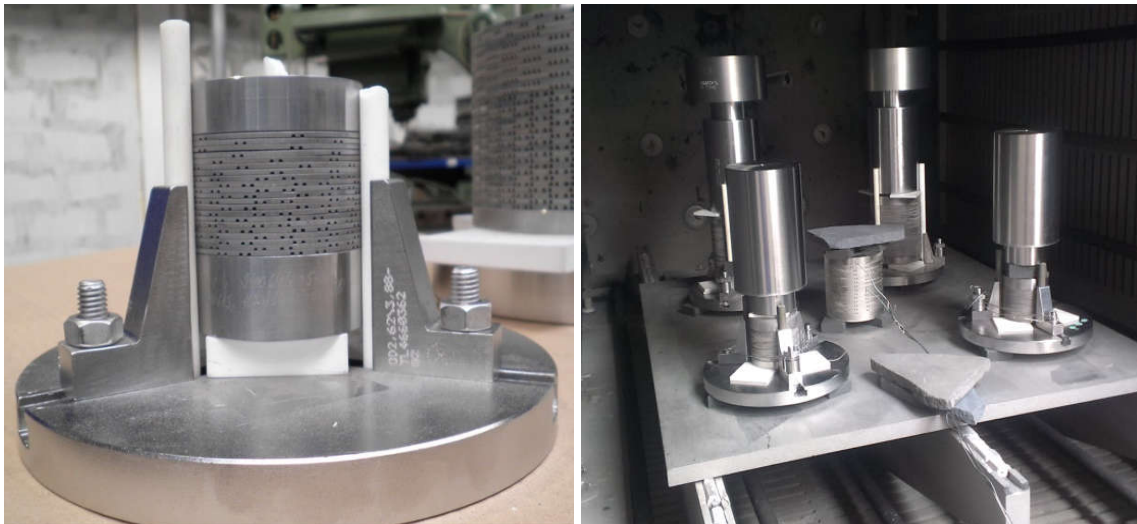
1.1.3 Pájení rezistorů

Aby se jednotlivé disky proti sobě nemohli pootáčet jsou spájeny. Případné pootáčení by mohlo mít za následek ovlivnění funkčnosti a výsledných vlastností rezistoru. Pájení začíná srovnáním disků do pořadníku dle předepsaného pořadí, v jakém jsou jednotlivé redukční stupně zaneseny ve výkresové dokumentaci daného rezistoru (příloha 1). Ukon srovnání disků dle předložené dokumentace je zásadní pro odpovídající stupeň redukce průtoku při určité změně polohy zátky ventilu. Pokud by souslednost rovnaných disků neodpovídala vyhotovenému návrhu, redukční schopnost rezistoru by byla změněna. To by mohlo mít za následek výraznější cyklování ventilu při škrcení průtoku z důvodu neodpovídající vyžadované regulace.

Po srovnání následuje příprava pájky a distribučního zařízení současně s nanášecím zařízením. Do zásobníků nanášecího zařízení je sypána pájka, volená na základě materiálu pájeného rezistoru. V případě rezistorů vyrobených z materiálu Inconel 718 je použita pájka typu Nicrobraz EXP1307 Brazing alloy. Druhá nádržka nanášecího zařízení obsahuje pájecí cement Nicrobraz Cement 520, který má v daném případě funkci pojiva. Směs se aplikuje nástřikem pomocí nanášecí pistole v odpovídajícím poměru vždy na stranu disku, na které nejsou redukční kanálky. [10]

Množství směsi na disku musí být optimální. Pokud by směs v porovnání s ideálně naneseným množstvím bylo málo, kupříkladu by prosvítala místa nepokrytá pájkou, mohlo by při namáhání dojít k oddělení disků, tedy rozlomení rezistoru. Naopak pokud je nanesené směsi příliš mnoho, může dojít k zatečení a zároveň ucpaní kanálků, čímž se daný labyrint znehodnotí a stane se nefunkčním. Takový rezistor dále neprojde kontrolou. Po nanesení směsi se disky nechají několik minut oschnout, aby je bylo možno následně naskládat dle výkresu na přepravní trn, na kterém jsou přemístěny k zprostředkovateli pájení.

Komplet disků založený na přepravním trnu je převezen k vakuové peci, kde bude probíhat pájení. Samotnému pájení předchází však několik nezbytných kroků. Prvním krokem je desorpce pece, která zpravidla probíhá 24 hodin. Krom pece tímto procesem prochází i přípravky nutné pro správné založení disků, aby výsledné rozměry spájeného rezistoru odpovídaly výkresové dokumentaci s dodržáním tolerovaných rozměrů. Desorpce je proces, při kterém se molekuly plynu či kapaliny uvolňují z povrchu materiálu. Přípravky pro správné založení disků před spájením jsou keramické tyčinky a destičky společně se základovou deskou. Základová deska se případně doplňuje trnem používaným pro rezistory s vnějším rozměrem větším, než je možné upnout na desce z vnější strany. Disky se mohou dotýkat pouze keramických přípravků, jako je zvyčasně na obr. 10a, a to z důvodu zamezení případného spojení s kovovými částmi základové desky případně trnu. Narovnané disky, které jsou zároveň proti sobě pootočený dle výkresové dokumentace jsou následně vloženy do vakuové pece. V peci je komplet disků zatížen závažím (obr. 10b), a to z důvodu eliminace vzniku nárůstu výšky kompletu, což by mohlo mít za následek problémy při finální montáži rezistoru do vnitřní části ventilu. Pec je následně nastavena na požadovaný průběh teplot a dob výdrže na daných teplotách s ohledem na pájený materiál. Proces pájení je zaznamenáván a následně je vykreslen graf průběhu teplot v závislosti na čase, tato osa je doplněna i o hodnotami vakua, viz příloha 2. Při přebírce spájených rezistorů od dodavatele je přiložen i pájecí protokol. [11]



a) založený rezistor s přípravky

b) zatížené rezistory v peci

Obr. 10 Skladba rezistorů před pájením.

1.1.4 Kontrola

Po dokončení všech procesů od přípravy materiálu prstenců po kompletaci a pájení rezistoru musí dílec před uvedením do provozu projít kontrolou. Jednotlivé kroky kontroly jsou bezpodmínečně nutné pro dodržení odpovídající kondice rezistoru před uvedením do provozu jako redukčního prvku. Kompletní kontrola se skládá z několika kroků, jejichž výsledky jsou následně zaznamenávány do kontrolního protokolu, viz příloha 3.

- **Kontrola poklepem** – spájený rezistor je uložen na dřevěné prismsy tak, aby na prismsách ležely pouze koncové desky a pomocí úderů kladiva přes hliníkový plech se kontroluje správnost spájení. Rezistor, který se nerozломí, nepukne nebo nejeví jiné známky poškození, vyhovuje.

- **Kontrola spájených spojů** – kontrola každého pájeného spoje po celém obvodu rezistoru. Kontrola se provádí vizuálně. Všechny spoje musí být spájeny a nesmí být viditelná žádná mezera. Kontrolu je možné ověřit s použitím párových měrek o šířce 0,05 mm.
- **Kontrola prosvícením** – rezistor je umístěn do temné komory, kde se pomocí válcové lampy umístěné ve vnitřním průměru rezistor prosvítí. Přes tloušťku stěny nesmí být vidět žádné průchozí světlo. Tato kontrola se neprovádí pro rezistory s disky s přímými kanálky, které jsou kompletně průchozí.
- **Kontrola kolmosti** – kolmost rezistoru po spájení je kontrolována přiložením úhelníku k vnějšímu průměru rezistoru. Maximální odchylka je počítána z výšky rezistoru:
 - na každých 25 mm výšky rezistoru je maximální povolená odchylka 0,25mm,
 - pro výšku rezistoru nad 250 mm odpovídá odchylka v maximu 2,5 mm.
- **Kontrola počtu disků** – kontrola počtu disků v rezistoru dle *Pájecího výkresu* (příloha 1).
- **Kontrola výšky disků** – kontrolu výšky disků po spájení je provedena opět dle *Pájecího výkresu* (příloha 1). Výška disků musí být v uvedeném limitu.
- **Kontrola protokolu o tvrdosti** – dodavatel pájení musí při předání rezistoru dodat i protokol o měření tvrdosti. Tvrdost musí být měřena na spájených discích a následně na koncových discích
- **Kontrola průchodnosti kanálků** – kontrola je prováděna vizuálně na vnitřním a vnějším povrchu rezistoru. Neprůchodný kanálek/průchod je takový, který je blokován z více jak 50 % pájkou, viz obr. 11. Není povoleno žádné ucpání kanálků na vnitřním a vnějším průměru rezistoru. Ucpané kanálky je nutné pročistit.



Obr. 11 Neprůchozí kanálky.

- **Kontrola obkročnosti kanálků** – optická kontrola vstupních/výstupních otvorů na vnějším průměru rezistoru. Otvory mezi sousedními disky musí být pootočený o odpovídající mezery mezi kanálky, viz obr. 12. Toto pravidlo platí pro jeden stupeň disků, tzn. disky označené jedním písmenem. Obkročnost mezi jednotlivými stupni disků se nekontroluje.



Obr.12 Znárodnění pravidelné obkročnosti kanálků.

- **Kontrola OD portů** – OD porty jsou otvory na vnějším průměru disků, kterými vstupuje nebo vystupuje médium. Každý stupeň disků (*Unit*) má stejná výrobní čísla disků, stejnou konfiguraci vyhloubených kanálků a stejný počet otvorů na vnějším průměru disku. Kontrola OD portů spočívá v optické kontrole počtu otvorů na vnějším průměru spájeného rezistoru. Kontroluje se vždy počet otvorů na vnějším průměru jednoho disku z jednoho stupně.

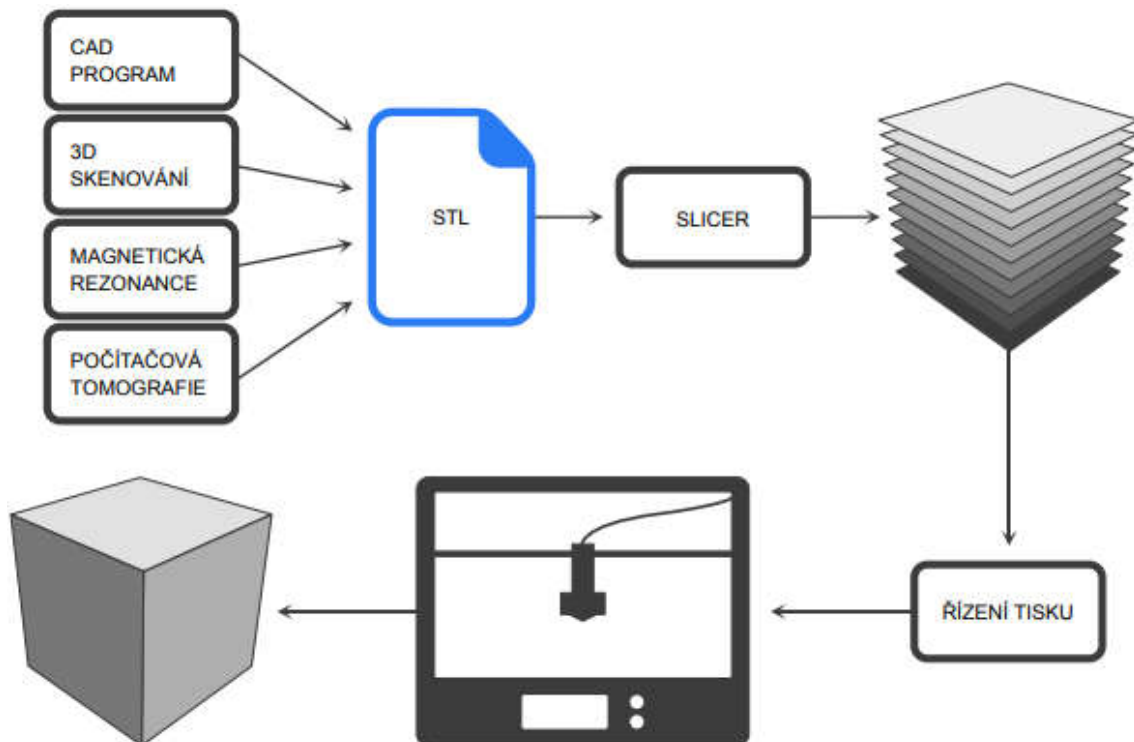
Zkompletovaný rezistor, který prošel všemi nutnými procedurami a zároveň kontrolami, jimiž byl prohlášen za shodný je finálně obroben. Obráběny jsou čelní části rezistoru, tedy čelo, které je přitlačováno víkem a z druhé strany čelo, které tlačí sedlo do těla ventilu. Nakonec je obroben vnitřní průměr, ve kterém pojíždí zátka škrtkící průtok. Tento proces je uskutečněn pomocí elektroerozivního obrábění drátkovou metodou. Je to z důvodu tvorby třísek velmi malých rozměrů, které lze při vniknutí do prostorů labyrintů vyplavit pomocí čistící lázně. Konečným procesem je PVD povlakování ke zvýšení tvrdosti.

Výše popsáný způsob výroby je z pohledu funkčnosti pro standardní aplikace ve všech směrech dostačující. Standardní aplikací se rozumí schopnost redukovat vlastnosti média v rozsazích dle potřeb zákazníka. Problém však nastává, pokud jsou požadovány rozdílné hodnoty oproti standardizovaným, případně je vyžadována jemnější regulace. V takových případech toto řešení selhává a při jeho aplikaci dochází k cyklování ventilu, čímž rostou náklady na provoz celého okruhu. Z tohoto důvodu je snaha najít alternativní přístup výroby, díky kterému by bylo možné tento problém vyřešit.

1.2 Alternativní přístup výroby atmosférického rezistoru

Jak bylo zmíněno v předešlé části, aktuální způsob výroby je zcela vyhovující, ovšem pro standardizované řady produktů. Vzhledem ke stále vyšším nárokům na přesnost regulace, díky které lze rychleji reagovat na změny procesních parametrů, se toto řešení stává nevyhovujícím. Z toho důvodu bylo nutné zamýšlet se nad novým řešením, které by těmto požadavkům bylo schopné vyhovět. Krom toho musí mít inovovaný způsob výroby minimální vliv na cenu, případně dodací lhůty daných komponent. V ideálním případě by alternativní řešení mělo náklady minimalizovat, dokonce zvýšit rychlost reakce na případné změny. Z důvodu náročnosti a komplexnosti vnitřní stavby rezistoru, především konfigurace kanálků, byly jako alternativní přístupy vyřazeny konvenční metody obrábění. Například výroba kanálků tradičním frézováním je velmi neefektivní. Bylo tedy nutné zvážit alternativy v podobě nekonvenčních technologií, které budou schopny vytvořit požadované tvary. Ideálně se pro dílce s členitou vnitřní stavbou hodí aditivní technologie výroby neboli 3D tisk. Umožňují totiž konstruktérům vytvářet rychleji a lépe prototypy, které mohou ve výsledku vycházet ekonomicky výhodněji a z pohledu konvenčního obrábění nejsou konstruktéři limitováni některými výrobními procesy, kde konvenční obrábění limity má. Charakter procesu, ve kterém dílce pracují, umožňuje využít pouze kovové materiály. Nutností tedy bylo zvážení pouze metod pracujících s tiskem kovů. Jednotlivé možné metody budou popsány dále. Následně bude vybrána odpovídající metoda pro potřebnou aplikaci, která bude detailněji popsána. [12; 13]

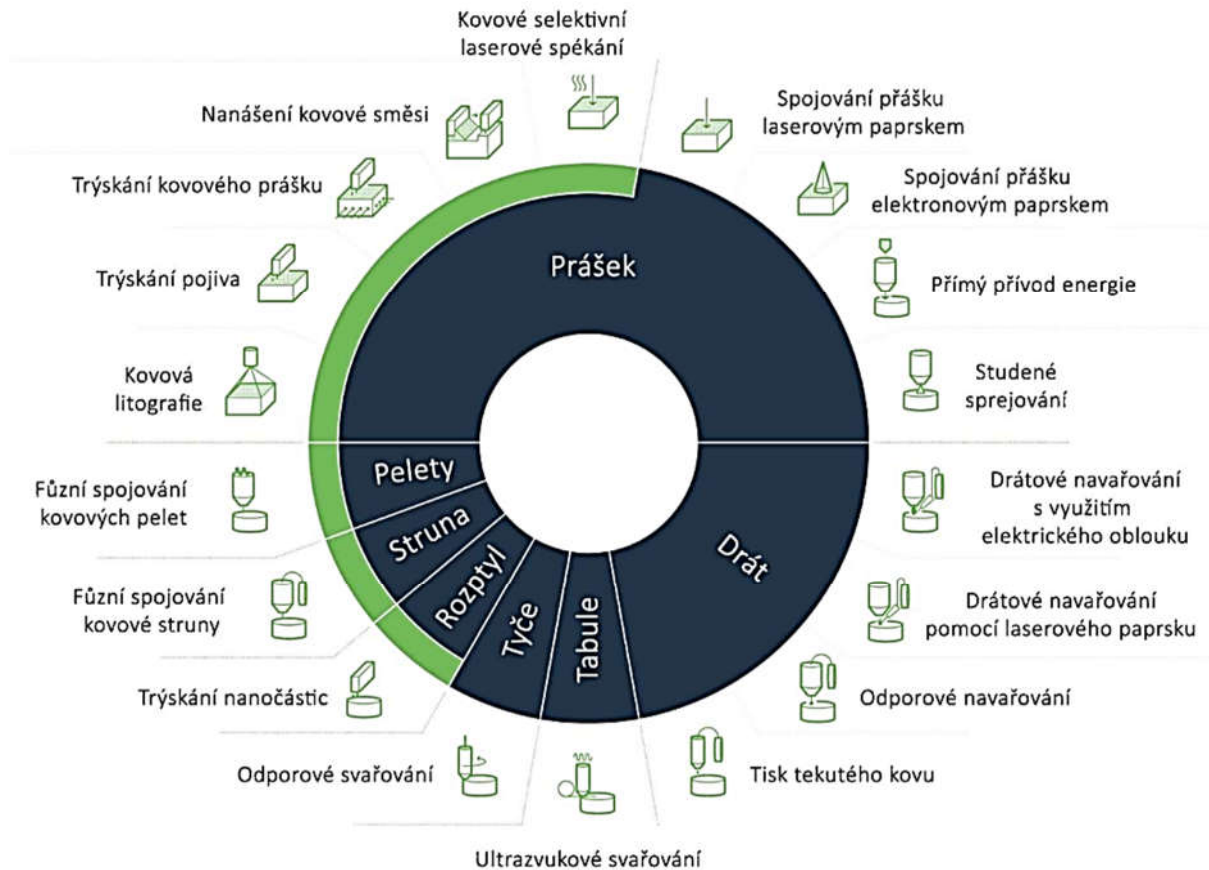
Aditivní technologie v sobě zahrnuje několik dílčích kroků, které vedou od virtuálního CAD modelu budoucí fyzické součásti, viz obr. 14. Různé produkty v různých fázích vývoje vyžadují rozdílné způsoby využití aditivních technologií v odpovídajících fázích cyklu výroby součásti. Aditivní technologie je zastřešující pojem pro několik specifických technik založených převážně na vrstvení struktur materiálu. Některé aditivní metody jsou vhodnější pro prototypové aplikace, jiné pro reálné funkční součásti. [12; 14]



Obr. 14 Schéma procesu tvorby dílce aditivní technologií [15].

2 METODY 3D TISKU

Tisk pevných polotovarů je i přes svou krátkou historii poměrně rozšířenou technologií, které se využívá v čím dál vyšší míře. Díky tomu stále přibývá metod, které se dají dělit do několika kategorií. Pro tuto práci je zvoleno rozdělení dle formy polotovaru, použitého pro tisk kovů, viz obr. 15. Obrázek popisuje i rozsah zastoupení technologií tisku kovů v závislosti na volbě polotovaru.



Obr. 15 Schéma rozdělení 3D tisku kovů [16].

Z důvodů omezení parametrů analyzovaného dílce jako je materiál, rozměrová přesnost a dostupnost technologií na českém trhu jsou z bližšího rozboru vyřazeny metody, jejichž polotovar je na bázi tabulí, tyčí, rozptylu částic a pelet. Zároveň nejsou uvažovány metody založené na nanášení vrstev na již hotové dílce, případně trýskání. Pro další rozbor tedy budou popsány jenom metody s práškovými polotovary a těmi na bázi drátu, případně strun. Popis se bude skládat z principu, na kterém je tisk danou technologií založen. Bude rozebrána přesnost a možnosti volby materiálů, které lze metodou tisknout. Dále budou rozebrány jednotlivé výhody a nevýhody technologii ve vztahu k analyzovanému atmosférickému rezistoru. Nakonec bude vybrána technologie, která svými parametry vyhovuje požadavkům co možná nejideálněji. Metoda bude podrobně popsána včetně parametrů, které ji charakterizují. Budou rozebrány následující metody zúženého výběru:

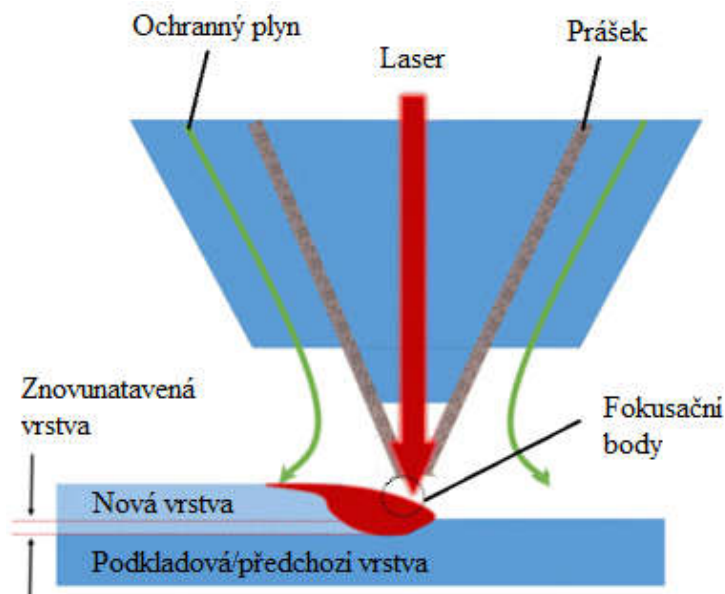
- spojování prášku laserovým paprskem (*Direct Energy Depositing*),
- tavení drátu elektrickým obloukem (*Wire Arc Additive Manufacturing*),
- tavení drátu, nebo prášku plazmou (*Plasma Metal Deposition*),
- tavení v práškové loži (*Powder Bed Fusion*),
- fúzní spojování kovové struny (*Atomic Diffusion Additive Manufacturing*).

2.1 Direct Energy Depositing (DED)

Metody spadající do kategorie DED se vyznačují koncentrovaným zdroje energie a toku přídavného materiálu, které se protínají ve společném ohnisku. To vše obvykle za přítomnosti inertního ochranného plynu. Hustota energie generovaná v určitém bodě roztaví v tomto bodě polotovar a jeho okolí, čímž vznikne tavenina. Tavenina se opakovaně vrství na sebe, viz obr. 16, dokud dílec nedosáhne požadovaného tvaru. Existují různé typy systémů a jejich dělení, dle níže uvedeného výčtu.

- Dle přídavného materiálu na:
 - DED na bázi práškového polotovaru,
 - DED na bázi drátové technologie.
- Dle typu zdroje energie na:
 - DED na bázi taveniny:
 - DED založené na laseru,
 - DED založené na elektronovém paprsku,
 - DED založené na plazmatu,
 - DED založené na elektrické oblouku,
 - DED na bázi kinetické energie. [17]

Nejčastěji využívanou metodou jsou systém DED na bázi prášku pro finální dílce z kovového materiálu, přičemž byl jako zdrojem tepla využit laserový paprsek. Procesy DED na bázi drátu poskytují nižší rozlišení ve srovnání s procesy na bázi prášku s laserovým paprskem, ale disponují vyšší rychlostí depozice a možností vytvářet větší struktury. [17]



Obr. 16 Schéma průběhu natavování vrstvy prášku laserem metodou DED [18].

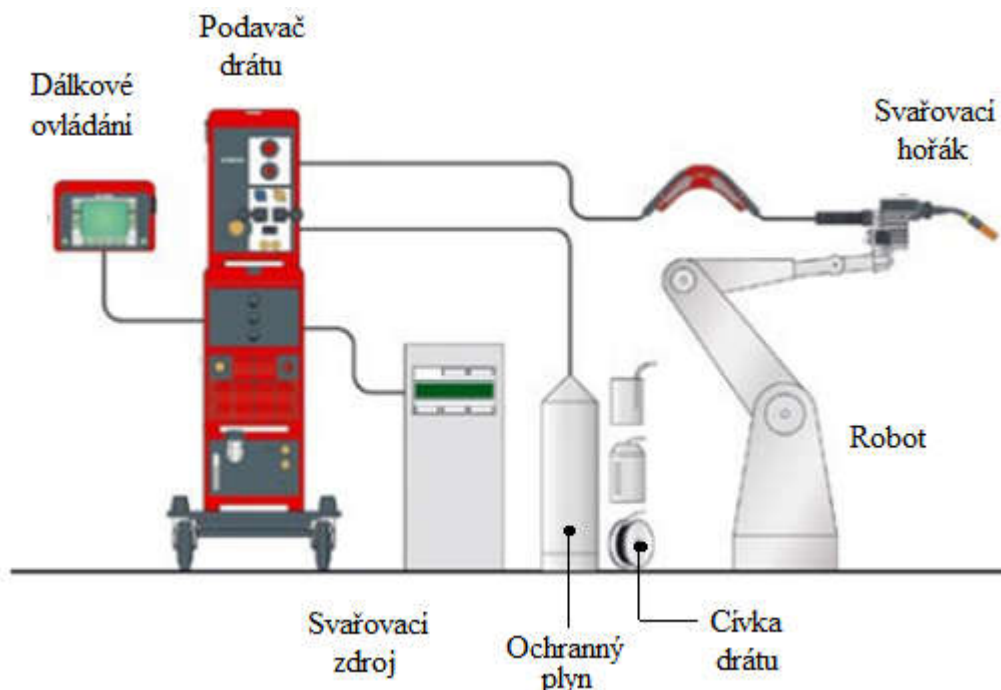
Díky polotovaru v podobě prášku a tavení laserem je možné tuto technologii využít pro výrobu dílců ze slitin. DED je charakteristická vysokou rychlostí výroby složitých dílů, což je její velkou výhodou. Při velké rychlosti výrobního procesu společně se složitými chemickými a fyzikálními reakcemi s nepřetržitým teplotním cyklem však dochází k následnému vzniku velkých zbytkových napětí. Ta jsou následně odpovědná za nerovnoměrné deformace s následnými odchylkami tvaru a přesnosti dílce a jakost povrchu. Přesnost se pohybuje v hodnotách přesahujících 1 mm. [17; 18]

2.2 Wire Arc Additive Manufacturing

Aditivní technologie výroby kovových dílců založená na využití drátěného oblouku. Proces WAAM využívá obloukové svařování k roztavení drátu a vytvoření trojrozměrného (3D) objektu pomocí mechanismu vrstvení jednotlivých vrstev na sebe. WAAM se dále dělí na několik dalších metod, které se od sebe odlišují použitým způsobem tavení drátu a ochrannou atmosférou:

- Metal Inert Gas (MIT),
- Cold Metal Transfer (CMT),
- Wolfram Inert Gas (TIG), atd. [19; 20]

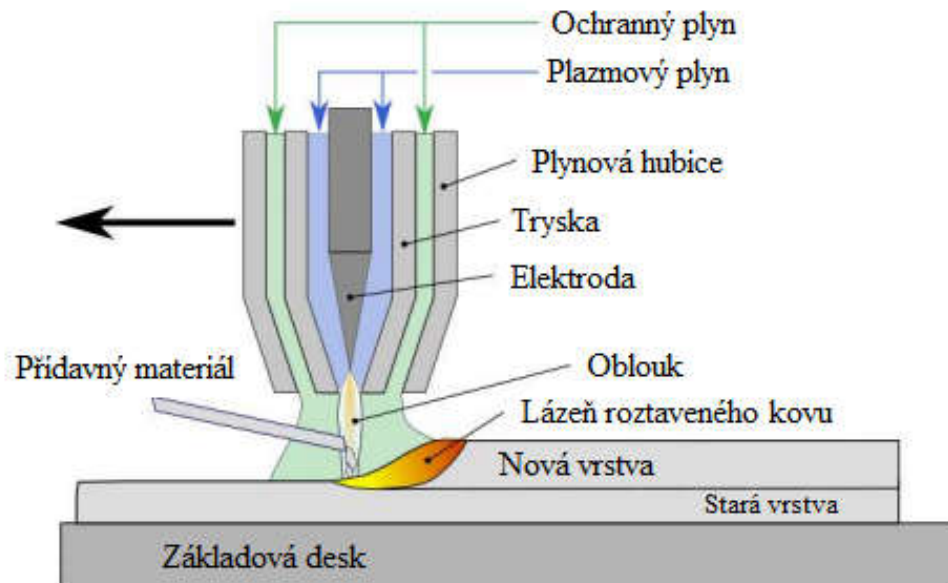
Metody založené na principu WAAM mají relativně nízký příkon v porovnání s ostatními metodami 3D tisku kovů, což je výhodou z pohledu snížení vstupních nákladů na proces tisku. Díky nízkému příkonu je možné touto metodou dosáhnout vynikající kvality naneseného kovu. To platí jak pro různé oceli, tak pro hliník, ale i titan. Nevýhodou při využití WAAM je vysoká míra zbytkového napětí v jednotlivých nanesených vrstvách, což může následně vést k deformacím. Tento jev se musí vzít v potaz při samotném návrhu trajektorií stavby dílce, aby se tento vliv minimalizoval v maximální míře. Metoda je velice vhodná alternativa pro výrobu složitých a rozměrných dílců z hliníku. Výroba rozměrnějších dílců je možná díky robotizovanému pracovišti, které se při využití metody WAAM často aplikuje, viz obr. 17. Popisovaná metoda je charakteristická vysokou pórovitostí, kdy se střední hodnota pórovitosti pohybuje v hodnotách do 50-100 μm . To může mít značný vliv na snížení únavových charakteristik. Vzhledem k využití drátu jako přídavného materiálu je možné vytvářet dílce z široké palety materiálů, v závislosti na jejich finální aplikaci. [19; 20]



Obr. 17 Schéma robotizovaného pracoviště WAAM [19].

2.3 Plasma Metal Deposition (PDM)

Metoda z počátku využívaná pro nanášení kovů z důvodu zvýšení odolnosti vůči vnějším vlivům působící na základní materiál. Svým principem se blíží metodám zmíněných v předešlých podkapitolách. Rozdílem je způsob tavení přídavného materiálu. Materiál se opět taví koncentrovaným působením zdroje tepla s vysokou hustotou, kterým je v případě PDM plazma, viz obr. 18. Polotovary používanými k výrobě touto metodou jsou buď prášky, nebo dráty požadovaných materiálů. To umožňuje vytvářet i dílce z různých slitin. Proces stavby 3D dílce probíhá vrstvením jednotlivých vrstev na sebe, kdy jednotlivé nanesené vrstvy lze od sebe snadno rozeznat (viz. obr. 19). [21; 22; 23]



Obr. 18 Schéma procesu tavení vrstvy metodou PMD [24].

Přesnost vrstvy je dána její výškou, která se pohybuje v rozmezí od 1 do 5 mm. Výhodou metody je možnost využití smíchání několika prášku dohromady, čímž je možné docílit lokální úpravy vlastností přídavné vrstvy a přizpůsobit ji tak provoznímu zatížení. PMD metoda je vhodná pro aplikace, které vyžadují minimální tepelné zatížení jednotlivých vrstev pokládáných na sebe. Zároveň je zaručena spolehlivá a reprodukovatelná kvalita vrstvy. Tloušťku vrstvy je možné redukovat při snížení svařovacího výkonu, rychlosti posuvu a malého množství vstupujícího přídavného materiálu (několik gramů prášku, nebo milimetrů drátu za minutu). [22; 23; 24]



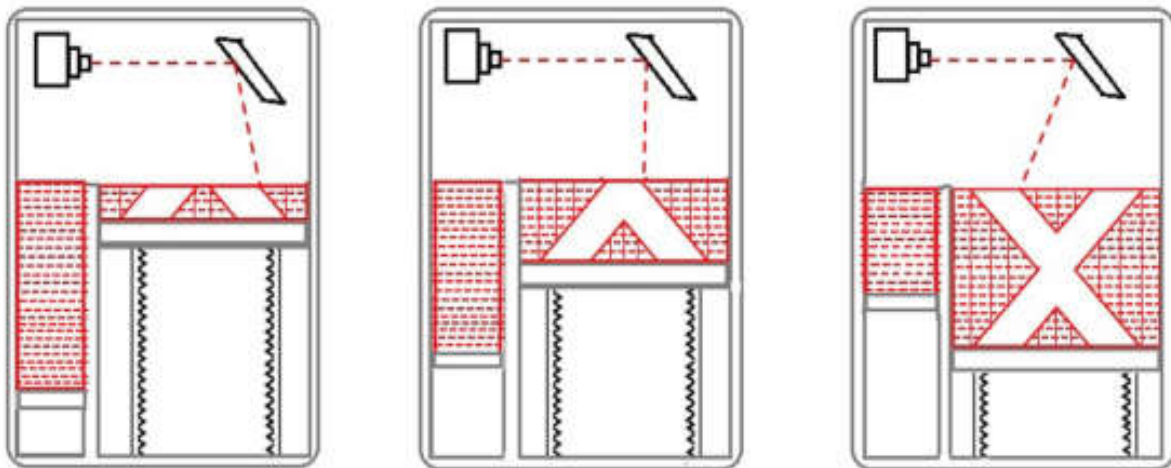
Obr. 19 Charakteristický dílce vyrobený metodou PMD [24].

2.4 Powder Bed Fusion (PBF)

Metoda založená na vrstvení prášku. Souprava protiběžných válečků vyrovnává prášek po celé ploše stavby, a to o tloušťce přibližně 0,1 milimetru. Díl jsou stavěny v izolované komoře, která je vyplněna plynem nebo vakuem, což zabraňuje především oxidaci a degradaci materiálu. Schéma procesu je znázorněno na obr. 20. Vyšší teplota v okolí vyráběné součásti je zajištěna pomocí infračerveného nebo odporového ohřívacího zařízení umístěného nad konstrukční plošinou. A podobný infračervený ohříváč je umístěn nad podávací kazetou pro předehřátí prášku před jeho rozprostřením na konstrukční plochu. Udržování zvýšené teploty na těchto dvou místech (nad stavěcí plošinou i nad ní) a v místě předehřevu znamená výrazné snížení potřebného výkonu tepelného zdroje. Stejně tak se snižuje i deformace dílů v důsledku nestejnomyerného rozpinání a smršťování. Po dokončení žádoucí vrstvy je zdroj tepla odkloněn a jeho pohyb je ukončen. Schopnost usměrnění pomocí zrcadel umožňuje tepelné natavení vrstvy práškového materiálu do požadovaného tvaru. Prášek v okolí je jen minimálně ovlivněn díky velmi dobré kontrolovatelnosti zdroje tepla. Jakmile je vytvořena kompletní vrstva, sestavovací stůl je snížen o výšku rovnající se tloušťce vrstvy. Opakování celého procesu trvá, dokud není dokončena výroba kompletní součásti. Aby bylo možné odstranit finální součást, je obvykle nutné ji určitou dobu nechat chladnout. Fúze v práškovém loži má v současnosti tři podskupiny technologií:

- selektivní laserové spékání (SLS/DMLS),
- selektivní laserové tavení (SLM),
- tavení elektronovým svazkem (EBM). [25; 26]

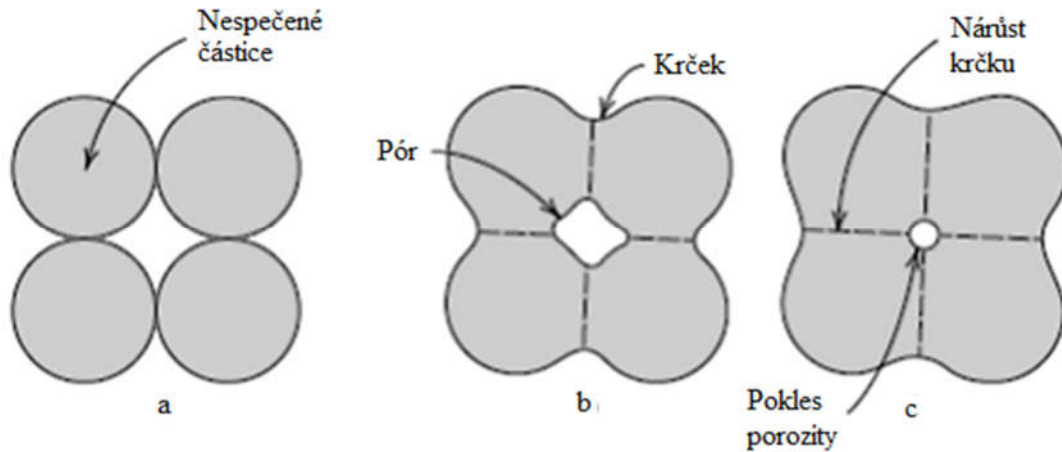
Technologie se liší typem materiálů, které využívají a množstvím světla využívaného k přenosu energie do práškového lože. Ve všech případech se objekty vytvářejí vrstvu po vrstvě za využití tepelné energie, která je výsledkem kombinace zvýšené teploty v komoře a použití světelného zdroje. Všechny využívají jako výchozí materiál prášky. Jednou z bezprostředních výhod je, že umožňují výrobu převyšlých a/nebo složitých struktur bez nutnosti použití sekundárního podpůrného materiálu, protože volné částice prášku uvnitř lůžka fungují jako podpora a udržují integritu objektu během tisku. [25; 26]



Obr. 20 Schéma principu tisku dílce metodami PBD [27].

SLS/DMLS a SLM metody – mají velice podobný princip produkce a obě se používají především pro výrobu kovových dílců. Jejich hlavním rozdílem je způsob spojování částic prášku. SLS metoda neroztavuje prášek, ale využívá laseru, aby částice zahřála na požadovanou teplotu nutnou ke spojení částic na molekulární úrovni (obr. 21 stav b). SLM metody částice zahřívá až do úplného roztavení (obr. 21 stav c). Z tohoto rozdílu vyplývá i schopnost

produkovat díly s homogenní strukturou (slitiny) v případě SLS metody, zatímco SLM metoda je schopna vyprodukovat pouze dílce jednovrstvkových materiálů. Rozdíl v natavení částic při určité intenzitě je k vidění na obr. 21. Výhodou metody SLS oproti SLM je absence nutnosti podpor. Ačkoli SLM se vyznačuje schopností samonosnosti prášku, který nebyl spečen, existuje zde určité riziko deformace vlivem zbytkových napětí vznikajících při tavení. [25]



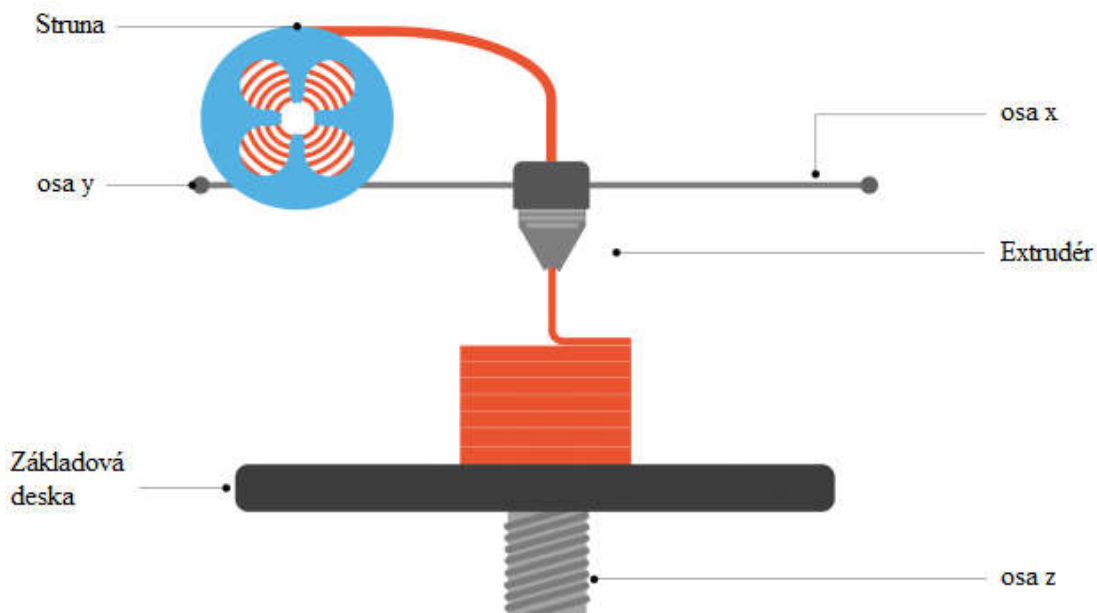
Obr. 21 Změny částic v závislosti na míře natavení [25].

EBM metoda – kovové dílce, jsou na rozdíl od ostatních metod s práškovou lóží tvořeny pomocí zdroje tepla ve formě elektronového svazku. Vysokoenergetický paprsek, nebo elektrony jsou využity k vyvolání fúze mezi částicemi materiálu kovového prášku. Soustředěný svazek elektronů prochází tenkou vrstvou prášku a způsobuje lokální tavení a tuhnutí na určité ploše průřezu, kde je následně vytvořen tuhý předmět. Obecně je v porovnání s metodami SLM a SLS tato metoda rychlejší, co se výroby dílců týče, díky vyšší energii tepelného zdroje. Na druhou stranu je tato metoda méně přesná, právě z důvodu vysoké intenzity zdroje a velké tloušťky tavené vrstvy. Důležitými aspekty výroby jsou nutnost dosažení vakua v komoře, ve které dochází k tisku a zároveň možnost výroby pouze vodivých materiálů. [25, 26]

Výše zmíněné metody se vyznačují především schopností tisku pevných, funkčních dílců s komplexními a poměrně přesnými rozměry pohybujícími se v řádech desetin milimetrů. Náklady na výrobu dílců jsou poměrně vysoké, což je dáno vysokými nároky na odebíranou energii pro zdroj tepla a vysokými pořizovacími náklady na tiskárnu a prášek. Omezením při využití technologií PBF je stavební prostor pro tisk dílců, který se pohybuje v řádech stovek milimetrů. To činí metody vhodnější především pro malé dílce. [26]

2.5 Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM)

Metoda založená na podobném principu, jako původní metody 3D tisku využívající k vytvoření souvislé vrstvy extrudér. Přes něj je tlačena polotovár ve formě struny. Strunou je myšlen kovový prášek uzavřený v termoplastické polymeru, který funguje jako pojivo pro kovové částice. Struna je uložena v kazetě nad extrudérem a je postupně odvíjena, viz obr. 22. V jednoduchém vyhřívaném extrudéru termoplast měkne, díky čemuž lze snáze vytlačit přes trysku usměrňující položení vrstvy materiálu dle předem určené trajektorie na konstrukční vrstvu. Podpory jsou keramické a jsou nanášeny sekundárním extrudérem. Po kompletním tisku je dílec nutné promýt, aby se odstranilo pojivo – termoplast. Následuje operace spékání, kdy je díl vložen do pece, v níž je zahříván. Dosahuje se tak zhutnění materiálu, který následně získává kovové mechanické vlastnosti. Ty jsou závislé na procesu tisku a následného spékání. Při spékání dochází k odtavení posledních zbytků termoplastu a vzniká dílec s 99,7 % podílem požadovaného kovu. [28; 29; 30; 31]



Obr. 22 Schéma výroby dílce metodou ADAM [31].

Z popisu procesu je zřejmé, že metoda nevyužívá tvorby struktury po vrstvách tavením a následným tuhnutím malých oblastí jako v předešlých dvou popsaných metodách. Jedná se o rovnoměrné spékání z vnějších ploch směrem dovnitř dílce, což má za následek vznik odlišných mechanických vlastností. Metoda ADAM se vyznačuje vysokou opakovatelností procesu. Tato skutečnost je velmi důležitá v kontextu budoucí produkce většího množství totožných dílců, bez nutnosti případné korekce trajektorie tisku, případně úpravy ohniska. To činí tuto metodu výhodnější v porovnání s PDF metodami. Zároveň je dosaženo vysoké přesnosti dílců stejně jako velmi nízké drsnosti povrchu. Vyrobene dílce se vyznačují podobnými vlastnostmi jako odlitky, nebo výkovky ze stejných materiálů. Možnosti tisku z pohledu rozměrů jsou omezené na malé dílce z důvodu velikosti komor o rozměrech v nízkých řádech stovek milimetrů v závislosti na použité tiskárně. [28; 29; 30].

2.6 Zhodnocení vhodnosti a výběr optimální metody

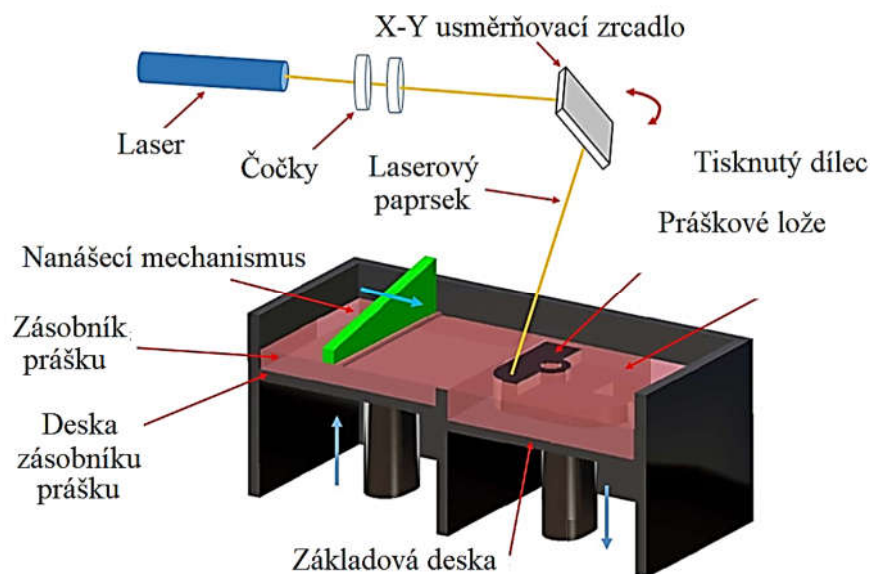
Při bližším porovnání jednotlivých 3D metod tisku kovů z pohledu vhodnosti využití pro výrobu atmosférického rezistoru byla vybrána jedna metoda. Postup eliminace byl následující. Nejprve byly vyřazeny metody DED, WAAM a PMD které nevyhovují požadavkům z pohledu přesnosti tisku vnitřní struktury kanálek. Při porovnání dalších nutných parametrů byla vyřazena metoda SLM, která je schopna vytvářet dílce pouze z homogenních materiálů. Vzhledem k nutnosti tisku atmosférického rezistoru z materiálu Inconel 718 je metoda nevyhovující. Ze zbylých tří metod byla následně vyřazena EBM. Metoda sice odpovídá požadavku výroby heterogenních dílců s odpovídající přesností, ale z důvodu vysokých výrobních nákladů v porovnání s metodami DMLS a ADAM, nebyla dále posuzována. Z finálního výběru dvou posledních metod byla vybrána metoda DMLS. Atmosférické rezistory jsou velmi často dodávány jako díly na dodatečném trhu, tzv. *Aftermarket*. Z tohoto důvodu je nutná rychlá reakce na zákaznický požadavek. Zákazník je v energetickém průmyslu velmi často tlačěn časem plánované odstávky. Tato skutečnost činí metodu ADAM nevyhovující, a to z důvodu absence dodavatelů v regionu České republiky. Zatímco DMLS metodou jsou v tuzemsku některé firmy schopny vyrábět (stav k roku 2019). Ta byla současně využita pro výrobu požadovaného rezistoru, jehož výroba bude v dalších částech práce popsána a následně vystavena analýze a porovnání s EDM metodou výroby atmosférického rezistoru.

Jak bylo při hodnocení použitelnosti alternativních metod zmíněno, technickým podmínkám, které musí být splněny nejlépe vyhovuje metoda 3D tisku zvaná Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Metoda známá pro svou schopnost výroby velmi komplexních tvarů dílců z široké palety využitelných materiálů. Ve velkém se používá pro výrobu zařízení s nutností využít chladících kanálků atypických tvarů, jako jsou základové desky pro lící formy v případě výroby plastů, nebo frézovacích hlav, které vyžadují vysokou a specifickou míru chlazení, viz obr. 23. DMLS jako nejoptimálnější zvolená alternativní metoda výroby atmosférického rezistoru byla upřednostněna také proto, že drsnost povrchu tavené vrstvy prášku odpovídá drsnosti povrchu rezistoru vyrobeného metodou elektroerozivního hloubení kanálků a následného pájení. Tudíž tolerance ostatních vnitřních částí ventilu dodržované při užití EDM rezistorů mohou zůstat nezměněny. [13]



Obr. 23 Frézovací hlava „Kraken“ vyrobené metodou DMLS [32].

Samotné výrobě reálného kusu, stejně jako u konvenčního obrábění, předchází vytvoření digitalizovaného návrhu. Tento 3D návrh hotového dílce v podobě CAD dat je pomocí software přeložen do formátu STL a následně rozdělen na jednotlivé vrstvy. V případě DMLS metody je vrstva typicky 0,1 mm silná dle možností dosahované přesnosti touto metodou. Data jsou tedy v STL formátu reprezentována pomocí 2D obrysových vektorů odlišujících se pro každou jednotlivou výšku vrstvy výsledné tisknuté komponenty. Zmíněné dvoudimenzionální vektory představují dráhu laseru, po které bude spékán prášek. Schéma procesu, viz obr. 24. [13]

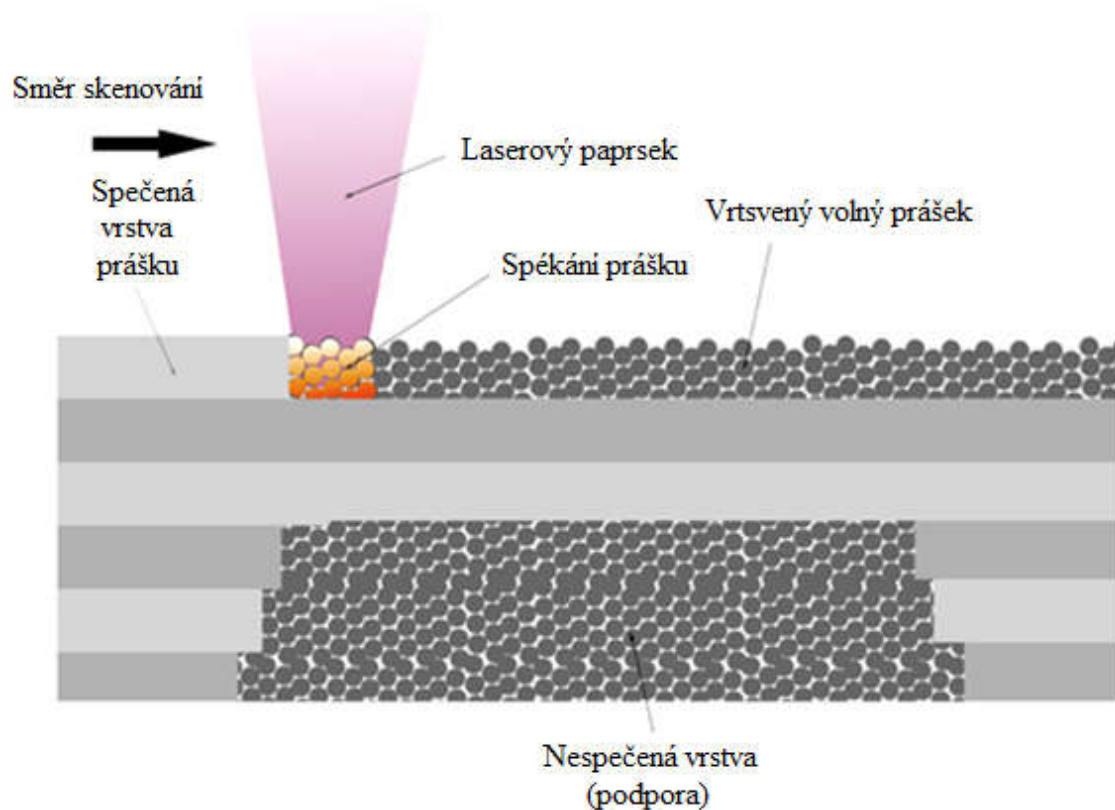


Obr. 24 Schéma DMLS metody tisku [27].

Laser používaný při výrobě metodou DMLS se skládá z podlouhlé dutiny se dvěma zrcadli na jejím konci, v níž světlo osciluje tam a zpět. Mezi zrcadly je umístěno světlo zesilující prostředí, kde dochází ke stimulované emisi. Zrcadla vedou světlo opakovaně zpět do zesilovacího média, pro další růst rozvíjejícího se svazku. Po zesílení prochází emise zrcadlem, které je částečně propustné. Výsledný paprsek je veden do snímáčího systému, kterým je v případě DMLS metody galvanický skener. Ten vede paprsek přes fokusační optiku, kde je paprsek zaostřen tak, aby bylo možné skenovat s maximální přesností, kterou daná koncepce a parametry zařízení umožňují. Dráha skenování trajektorie je vedena pomocí řídicí jednotky. [33; 34]

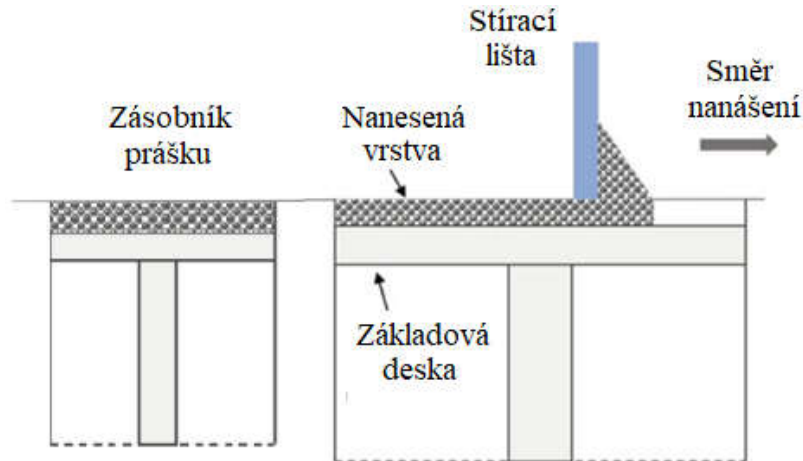
Celý proces skenování je prováděn v zabezpečené a hermeticky utěsněné komoře, která je před zahájením skenování vyplněna ochrannou atmosférou (Neon nebo Argon), jejíž přítomnost při procesu zvyšuje kvalitu povrchu výsledného dílce. Vyšší kvality tištěného dílce je dosaženo předehřevem komory, především pak základové desky. Ohřevem desky se zmírňuje teplotní gradient mezi základovou deskou a fixačními podporami, které jsou tištěny jako první z důvodu stabilizace dílce. Teplota předehřevu je volena dle tištěného materiálu a parametrů laserového paprsku. [33; 35]

Vlastnosti lasem zpracovaného materiálu jsou ovlivněny interakcí mezi laserem a materiálem. Vznik typických problémů, s kterými se práškové metody potýkají, jako jsou pórovitost, kuličkování, trhliny a zbytkové napětí mají původ právě na rozhraní této interakce. Správně zvolené podmínky pro tištěný materiál ovlivňují vznik různých vlivů při spékání, čímž ovlivňují výslednou kvalitu dílce, viz obr. 25. Příkladem může být geometrie vzniklé spékané oblasti, která má vliv na růst zrn a výslednou mikrostrukturu. Dalším příkladem mohou být zbytková napětí, které vznikají částečně z ochlazování a smršťování nové vrstvy a částečně ze zbytkových napětí, vznikajících v důsledku napětí vyvolaných deformací v pevných vrstvách předchozího tisku. [36; 37; 38]



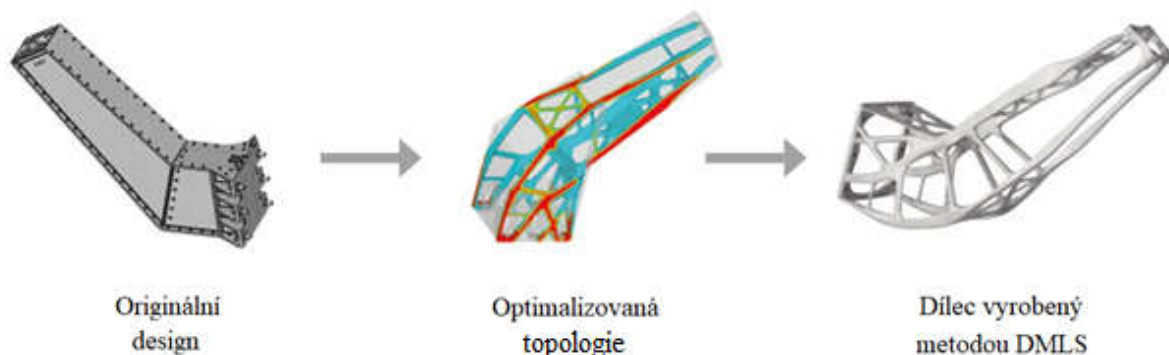
Obr. 25 Schéma tavení prášku [39].

Prášek je na základovou desku nanášen pomocí mechanismu, který je tvořen lineárním vedením a stírací lištou, které rovnoměrně rozprostírá vrstvu prášku, viz obr. 26. Prášek je distribuován pod lištu ze zásobníku, který je uložen na plošině vedle základové desky. Jakmile je jedna rozprostřená vrstva spečena, základová deska se posune o jednu výšku vrstvy níže, aby se mohla nanést další vrstva volného prášku. Cyklus spékání, klesání desky a nanášení další vrstvy se opakuje do té doby, dokud není vytištěný kompletní dílec. Po tisku je dílec očištěn od zbytkového prášku a následně je vystaven tepelnému zpracování dle typu a charakteru následující aplikace, ve které bude dílec vyrobený touto metodou 3D tisku fungovat. [25; 36]



Obr. 26 Schéma nanášení prášku [40].

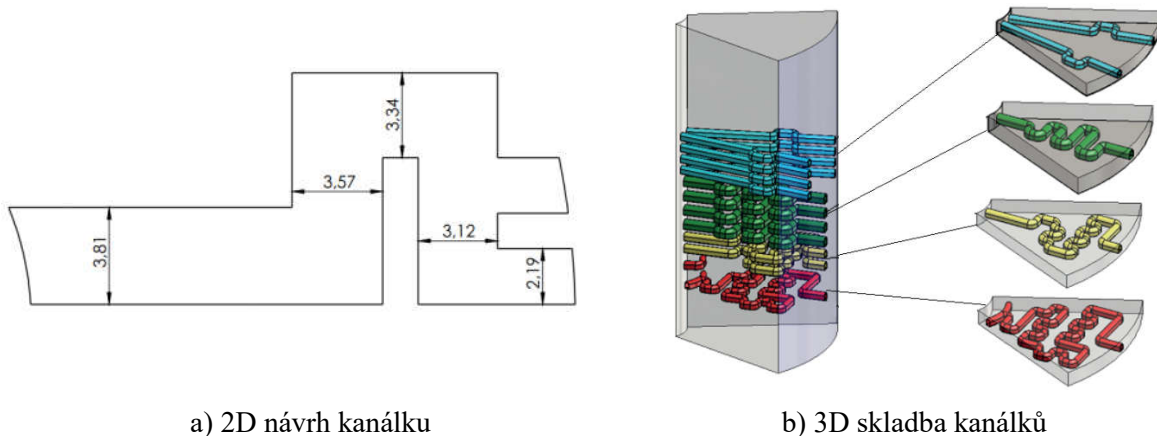
Využití 3D metody výroby kovových dílců metodou DMLS má několik výhod, které zvyšují jeho atraktivitu na trhu. Krom zkrácení výrobních časů, které jsou nutné k vytvoření kompletního dílce je snazší i finální obrábění. Tisk dílce probíhá jen s malými přídávky, což snižuje požadavky na širokou základnu obráběcích nástrojů nutných k dokončení dílce. Využití DMLS metody výroby dovoluje konstruktérům výrazně rozšířit možnosti návrhu dílce tak, aby ideálně odpovídal použité aplikaci. Dílce tak mohou mít komplexnější tvary, ale zároveň může být ušetřeno značné množství materiálu. Díky tomu lze produkovat lehčí dílce a tím tak snížit ekologickou zátěž při omezeném využití vstupního materiálu. Využitelnost DMLS metody, nekončí pouze v oblastech vstřikování plastů, či výroby nástrojů. Dílce vyrobené touto metodou se vyznačují vysokou pevností. Proto jsou čím dál častěji užívány pro letecký a automobilový průmysl, jako náhrada konvenčních metod (obr. 27), ale také v uměleckých oborech a biomedicině. [38]



Obr. 27 Schéma změny přístupu konstrukce držáku antény pro satelit při využití DMLS [41].

3 VYUŽITÍ DMLS METODY PŘI VÝROBĚ

Návrh DMLS rezistoru je z pohledu přípravy CAD dat složitější než v případě využití EDM metody. Je tomu tak z důvodu výrobních podmínek a nelineárního vztahu mezi geometrií kanálků a průtočnou oblastí. Na druhou stranu základní předpoklady pro návrh rezistoru jsou obdobné, tedy vychází se z určení počtu sektorů poskytující optimální průtočnou plochu. Na obrázku 28a je zobrazen příklad návrhu jednoho kanálku ve 2D a následná implementace do 3D rozvržení nutného pro tisk, viz obr. 28b.



a) 2D návrh kanálku

b) 3D skladba kanálků

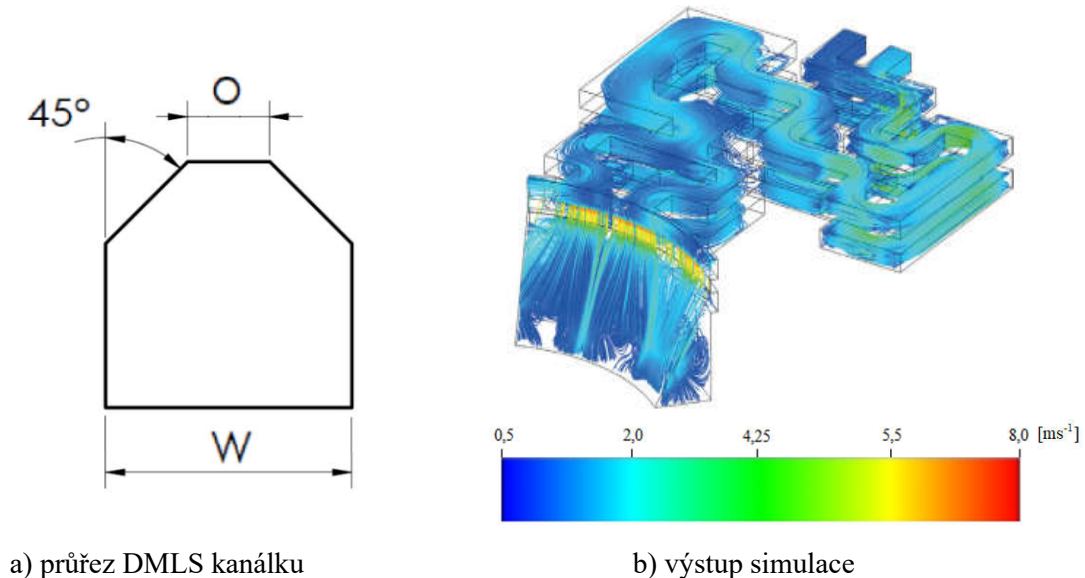
Obr. 28 2D a 3D návrh kanálků rezistoru.

Při užití DMLS metody se požadovaného počtu stupňů, které se od sebe liší mírou regulace dosahuje stanovením výšky, tloušťky vazby a maximalizací plochého přesahu. Šířka a podepřený přesah se mění a na základě toho lze určit maximální odtokovou plochu, která je dosažitelná na vnitřním průměru rezistoru. Během návrhu musí být dodrženo několik základních pravidel, aby bylo dosaženo nejvyšší kvality tištěného kanálku:

- minimální tloušťka stěny: 0,8 mm,
- minimální tloušťka kanálku 0,5 mm (w),
- maximální převis stropní plochy kanálku: 0,5 mm (o),
- minimální boční převis: 45°,
- průměrná procesní tolerance: $\pm 0,04$ mm.

Výše zmíněné podmínkou jsou vymezeny z důvodu zajištěním odpovídající funkčnosti rezistoru, případně uskutečnitelnosti výroby z hlediska technologických procesů při tisku. Před samotným zahájením výroby rezistorů pomocí metody DMLS muselo být vyřešeno několik zásadních problémů. Jednou z problematických částí byl příčný průřez kanálků. Při využití DMLS metody není možno tisknout plochy pod úhlem menším, než je 45°. Je tomu tak z důvodu nedostatečné podpory podkladového nespečeného materiálu. Horní plocha kanálku s absencí podpory by se následně „zbortila“, což by mělo za následek snížení průtočné kapacity kanálku, případně kompletní neprůchodnost kanálku. Daná skutečnost by mohla vést k nesplnění stanovených podmínek a rezistor by tak byl vyřazen jako neshodný. Proto bylo nutné příčný průřez oproti EDM metodě modifikovat. Řešením bylo nevržení příčného průřezu ve tvaru šestistěnného polygonu, viz obr. 29a s rohy v horní části zkosnými pod úhlem 45° přecházejících v kolmou plochu vůči boční stěně kanálku.

Kromě dodržení tvarových zákonitostí při návrhu konfigurace kanálků je nutné kontrolovat odpovídající schopnost regulace daných konfigurací. Ta by se v důsledku změny průřezu kanálku oproti původnímu řešení změnila. Proto byly kanálky s polygonálním průřezem vystaveny simulaci využívající k výpočtu změn v průběhu proudění metodu konečných objemů. Pro simulaci byl využit software *SOLIDWORKS Flow simulation* a jeho výpočetní program pro dynamiku tekutin (CFD), využívající pro výpočty v oblasti proudění kapalin právě metodu konečných objemů. Pro zobrazení kritických míst získaných z analýzy je užito barevné vyjádření.



Obr. 29 Návrh průřezu a simulace rychlosti proudění.

Pro analýzu byly použity následující parametry:

- vstupní tlak: $p_1 = 20$ psi,
- výstupní tlak: $p_2 = 5$ psi,
- měrná hmotnost kapaliny: $\nu = 0,11 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$.

Výstupem analýzy je simulace změny rychlosti proudění média v kanálku, při částečně škrceném průtoku jednoho ze dvou kanálků. Ze simulace bylo možné vyčíst nebezpečná místa, na která poukazuje barva dle stupnice, viz obr. 29b. Z vyobrazených hodnot lze usuzovat, že nejvyšší rychlosti je dosaženo při opuštění média kanálku. V těchto místech dochází k vysokému namáhání povrchu zátky. To při překročení bezpečných hodnot může vést ke vzniku kavitace a vytrhávání materiálu právě z povrchu zátky.

Tištěný polotovár rezistoru je navržen s přídávkem na budoucích kontaktních plochách. Tyto přídávky jsou nutné v návaznosti na následné obrobení, pomocí kterého se dosahuje požadovaných tolerancí na daných kontaktních plochách. Prvními kontaktními plochami jsou obě čela, kde jedno dosedá na sedlo ventilu a druhé je v kontaktu s víkem, které rezistor přitlačuje k sedlu. Tiskem se dosahuje přídávku o velikosti 1-1,5 mm na kontaktní plochu. Poslední kontaktní plochou je vnitřní průměr rezistoru, ve kterém pojíždí zátka, čímž dochází k otevírání a uzavírání průtoku média skrz rezistor. Zde je vytvořen přídavek o velikosti 0,5 mm. Rezistor po tisku vypadá ze všech stran vizuálně stejně. Aby obsluha zodpovědná za obrobení kontaktní ploch měla snazší orientaci, jakou plochu obrábět odpovídající způsobem, je vnější průměr rezistoru na straně kontaktu se sedlem opatřen výrobním číslem, případně jiným symbolem, viz obr. 31b.

Pro tisk bude použita tiskárna firmy EOS, která nese označení EOS M 290, viz obr. 30. Byla vybrána z důvodu odpovídajících parametrů pro tisk daných velikostí rezistorů. Pro tisk atmosférického rezistoru byl využit standardizovaný materiál, který nese obchodní označení firmy EOS, která jej vyrábí – EOS *NickelAlloy IN718*, a jenž je ekvivalentem materiálu chromniklové superlistiny Inconel 718. Parametry stroje jsou následující:

- objem komory: 250 x 250 x 325 mm,
- typ laseru: Yb fiber laser;
- optická přesnost: F-theta čočka,
- rychlost tisku: přes 7 ms^{-1} ,
- průměr zaostření: $100 \text{ }\mu\text{m}$,
- příkon: 32 A / 400 V,
- spotřeba energie: max. 8,5 kW / průměrně 2,4 kW
- způsob výroby využívaného prášku: atmosférické rozprašování.



Obr. 28 DMLS tiskárna EOS M 290 [41].

Samotný tisk analyzovaného rezistoru bude probíhat za následujících parametrů:

- výkon laseru: 250 W,
- rychlost tisku: $3,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,
- typ skenování: paralelní,
- doba tisku: 1 h 28 min,
- velikost částic prášku: 20-50 μm .

Parametry jsou nastaveny pro vytvoření optimální drsnosti a struktury materiálu. Požadovaná drsnost není vysoká, proto je možné využít rychlejšího tisku. Na druhou stranu je vyžadováno nízká zbytková napětí, což omezuje možnost využití vysoké intenzity laseru. Spirálový způsob skenování byl použit z důvodu přítomnosti vnitřního otvoru, který není třeba skenovat. Spirálové skenování je charakteristické svým vysokým přehřátím uprostřed dílce, což v případě tisku atmosférického rezistoru odpadá.

Po tisku a zchlazení je dílec vyňat z komory, aby mohl být následně očištěn od přebytečného volného prášku. To probíhá pomocí plně automatizovaného zařízení pro odstranění zbytkového materiálu, viz obr. 31a. Zařízení automaticky odstraní přebytečný volný prášek, který zůstává uvnitř kanálek po předešlém tisku. Celý proces probíhá v uzavřeném pracovním prostoru, aby se eliminoval únik prášku do ovzduší. Čistící zařízení je schopné automaticky provést ověření průchodnosti kanálek. To však u kanálek tak malých průřezů, jako jsou v rezistoru není vždy dokonalé. Dodatečně se tedy kanálky čistí tlakovým vzduchem případně čištěním pomocí ponoření do kapaliny a působením ultrazvukových vln. Po očištění dochází k odříznutí fixační podpory a následnému broušení povrchu, na kterých byla podpora natištěna. Výsledek surového vyčištěného rezistoru lze vidět na obr. 31b. [42]



a) strásací zařízení



b) rezistor

Obr. 31 Zařízení pro odstranění zbytkového materiálu a vytištěný DMLS rezistor [42].

Po očištění, odstranění podpor a kontrole průchodnosti kanálek je dílec tepelně zpracováván z důvodu snížení vnitřního pnutí. To je důležité jak z pohledu snížení náchylnosti dílce k deformacím, tak ke zjemnění vnitřní mikrostruktury. Tepelné zpracování budoucího atmosférického rezistoru probíhá ve dvou krocích. [42]

1. Výdrž na teplotě 980 °C s následným ochlazením v ochranné atmosféře.
2. Stárnutí při teplotě 720 °C po dobu 8 hodin, postupné ochlazení na 620 °C trvajícím 2 hodiny, a nakonec výdrž na teplotě 620 °C po dobu 8 hodin. Vše probíhá v ochranné atmosféře.

Testování materiálu probíhá na vytisknutých vzorcích. Vzorky pro výrobní zkoušky musí být vytištěny společně s díly a musí reálně odrážet vlastnosti skutečného dílu, a to jak z hlediska srovnatelné tloušťky stěny, tak z hlediska shodných stavebních parametrů a reakce na tepelné dodatečné zpracování. Zkoušky se tedy provádějí až po konečném tepelném zpracování. Provádí se tahová zkouška a kontrola průchodnosti kanálek.

Tahová zkouška probíhá za standardizovaných podmínek dle EN ISO 6892-1, tedy zkoušky tahem za pokojové teploty. Zkouška se provádí přímo u dodavatele tištěného materiálu, který dokládá výsledky této zkoušky. Výsledky zkoušky jsou při převzetí od dodavatele porovnány s předepsanými hodnotami (příloha 4). Porovnávají se výsledky pevnosti v tahu, smluví pevnosti v tahu a prodloužení. [43]

Další testy jsou dle zvýšených nároků stran zákazníka doplněny. Jedná se o zkoušky tvrdosti, kapalinové penetrační zkoušky, a tahové zkoušky v jiných směrech než ve směru nárůstu tištěného materiálu (osy z). Tyto zkoušky podléhají normám ISO 15156 a ISO 9712. Případně jsou tyto testy doplněny o rozbor materiálu dílce pomocí spektrometrů tzv. *Positive Material Indication* (PMI).

Kontrola průchodnosti kanálků probíhá u dodavatele tištěného dílce. Principem testu je ověření, zda žádný z kanálků není zanesený a neprůchozí. To by mělo za následek odchylky od požadovaných funkčních parametrů rezistoru. Kontrola probíhá pomocí tlakové vody, která je z jedné strany přiváděna do otvoru, ve kterém bude pojíždět zátka. Druhá strana daného otvoru je zaslepena. Tlaková voda má tedy možnost unikat pouze kanálky, kterými pod tlakem stříká ven, čímž se dá snadno kontrolovat jejich průchodnost.

Obdobný způsob kontroly se provádí i po obrobení a dodání dílu, je-li to z pohledu zákaznických specifikací třeba. Rezistor je během tohoto testu ponořen do vody. Do vnitřního průměru rezistoru je vháněn vzduch a kontrolují se vycházející bublinky z otvorů na jeho vnějším průměru.

Rezistor je po dodání obráběn, kdy se odstraňují přídatky na funkčních plochách. Obrábí se obě čela, tj. strana sedla a víka, které jsou obráběny standardním procesem soustružení dle následujících parametrů:

- řezný nástroj: VBD CNGA 120408,
- řezná rychlost: $v_c = 160 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,
- posuv: $f = 0,25 \text{ mm}$.

Soustružení předchází utěsnění otvorů na vnitřním i vnějším obvodu, aby nedošlo k zanesení kanálků třískami vzniklými při odběru vrstvy materiálu. Následně se obrábí vnitřní otvor rezistoru. V tomto otvoru pojíždí zátka, která uzavírá kanálky a následně kompletní průtok v případě potřeby. Obrábí se elektroerozivní drátkovou metodou, při níž vznikají jen malé třísky, které lze následně z kanálků snadno vyplavit při následném očištění. Současně se tato technologie snadno vyrovná s přerušovaným řezem, ke kterému dochází při obrábění vnitřní plochy, kde jsou výstupní otvory kanálků. Vyznačuje se i vysokou přesností, důležitou k dosažení vhodné regulace, případně kompletnímu uzavření průtoku s následným minimálním průsakem. Rezistor je řezán při těchto parametrech:

- nástroj: mosazný drát (0,25 mm),
- rychlost řezu: $0,6 - 0,7 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (hrubování); $1 - 1,2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (šlichtování),
- intenzita proudu: $I = 3,5 \text{ A}$,
- napětí: $U = 30 \text{ V}$.

Při řezání elektroerozivní metodou je nutné využít přípravky, které ustaví rezistor, čímž ho stabilizuje. Tento krok je důležitý pro dosažení požadované přesnosti. Pokud by byl proveden nesprávně, může dojít k nepřesnému řezu, například nedodržení kruhovitosti, nebo by nebyl řez veden kolmo k obrobeným čelům. Tím by se polotovar znehodnotil a musel by být vyroben nový.

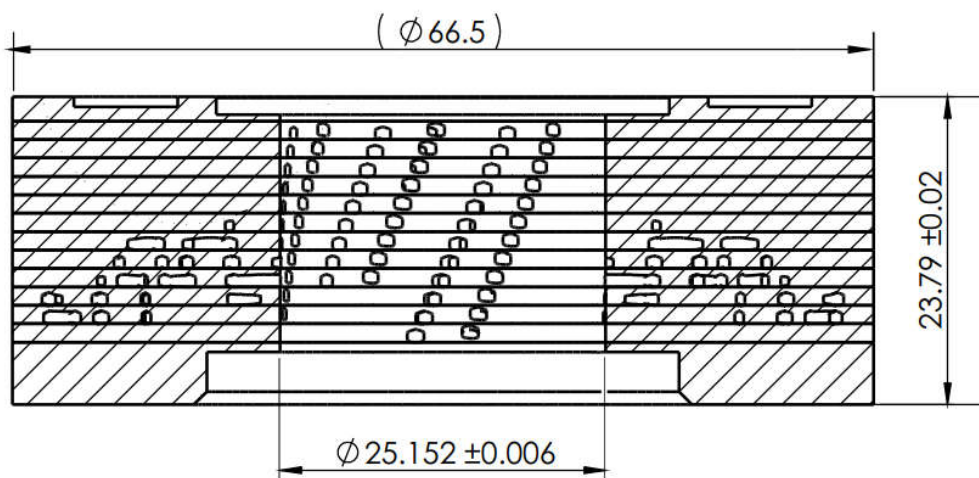
Výsledný obrobený rezistor, musí být dobře očištěn, z důvodu následného nanášení PVD povlaku. Nanesení povlaku má za účel zvýšení tvrdosti a otěruvzdornosti dílce. Povlakování je zásadní pro následnou dlouhodobou funkčnost rezistoru. [46]

4 SROVNÁNÍ STÁVAJÍCÍ A INOVOVANÉ VÝROBY

Následující odstavce práce jsou zaměřeny na porovnání obou přístupů výroby atmosférického rezistoru. Jednotlivé části analýzy se budou dotýkat maximálního množství relevantních a zároveň porovnatelných vlastností. Jak jednotlivých kroků výroby, tak výsledných vlastností dílce. Analýza bude rozdělena do několika základních kroků dle charakteru porovnávané kategorie. Jednotlivé kategorie jsou rozčleněny do čtyř základních hledisek a jejich dílčích podkapitol:

- technologické:
 - obrobiteľnosť,
 - mechanické vlastnosti,
 - chemické složení,
 - přesnost průřezů labyrintů,
- procesní:
 - průtokový koeficient,
 - regulace,
- ekonomické:
 - výrobní náklady,
 - dodací lhůty
 - reakce na změnu výroby,
- ekologické:
 - odpad,
 - recyklace.

Závěr analýzy bude věnován vyhodnocení jednotlivých porovnávaných kategorií, z čehož budou následně zvýrazněny výhody či nevýhody obou metod výroby atmosférického rezistoru. Pro porovnání části kritérií byly použity dva souhlasné dílce, přičemž jeden vyroben metodou elektroerozivního obrábění a pájení prstenců plechu a druhý metodou tisku zvanou *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS). Samozřejmostí je jejich rozdílnost z pohledu návrh. Oba testované dílce jsou uvažovány z materiálu niklové superslitiny Inconel 718, respektive jeho ekvivalentem v podobě prášku pro DMLS zvaný *EOS NickelAlloy IN718*. Materiál byl zvolen z důvodu absence jiného druhu materiálu, z kterého jsou vyráběny rezistory oběma metodami. Velikost obou dílců je brána stejná, normalizovaná pro danou aplikaci ventilu – regulace zástríku v chladicí části obtokového ventilu, viz obr. 33.

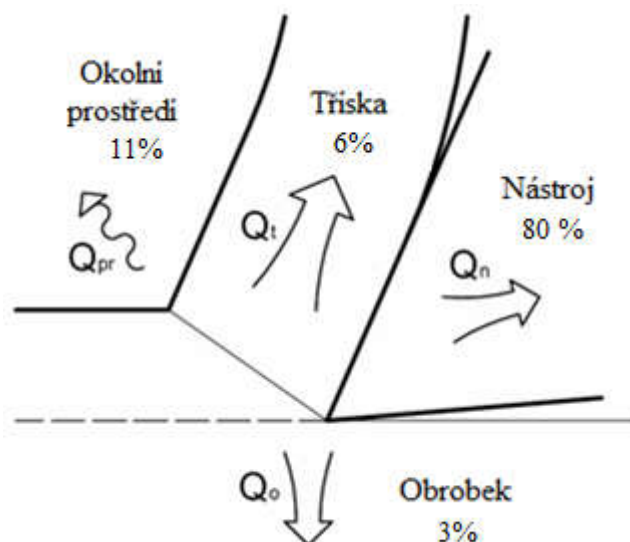


Obr. 33 Náčrt velikosti analyzovaného rezistoru.

4.1 Technologické hledisko

Materiál, z kterého jsou analyzované rezistory vyráběny – *Inconel 718 / EOS NickelAlloy IN718* je znám svou obtížnou obrobiteľnosťou. Je tomu tak dáno z niekoľkých základných dôvodů charakterizujících schopnosť materiálu být opracovávan, zejména pak třískovými metodami. Jsou to fyzikální vlastnosti, chemické složení, způsob výroby, mikrostruktura a další činitele. Pro analyzovaný materiál je přirozená vysoká chemická reaktivita, vysoká tvrdost, nízká tepelná vodivost, vysoká pevnost a houževnatost, z kterých vyplývají faktory ovlivňující jeho obrobiteľnosť. [47; 48; 49]

- Špatný odvod tepla – teplota v zóně řezu je kritickým parametrem, který přímo ovlivňuje řezné síly, životnost nástroje, rychlost opotřebení nástroje a drsnost povrchu obráběného dílce. Plastická deformace ve střižných rovinách, tření mezi třískou a čelem nástroje a tření mezi špičkou břitu nástroje a povrchem jsou hlavní zdroje tepla, které při procesu třískového obrábění vzniká. Vzhledem k tomu, že *Inconel 718* disponuje nízkou tepelnou vodivostí ($4-16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) a vysokou tepelnou kapacitou ($520 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), dochází při jeho obrábění k nízkému odvodu tepla na rozhraní tříška – nástroj (obr. 34). Jev, který je žádoucí pro třískové obrábění je nahrazen zvyšováním teploty v rovině řezu, což má za následek snížení kvality povrchu obrobku. Při pozorování obrábění materiálu byl zjištěn přesun tepla do nástroje v hodnotách pohybujících se okolo 80 %. [48; 49]
- Vysoká reaktivita – slitiny na bázi niklu jsou tímto jevem charakteristické. Prakticky všechny obráběcí materiály reagují s obráběným materiálem při zvýšených provozních teplotách. Důsledkem této charakteristické vlastnosti niklových slitin je tendence třísek navařovat se na řeznou hranu nástroje, kde následně vzniká nárůstek. To vede k opotřebení nástroje ve formě rozšiřování žlábků utvařeče třísky a odlamování hran. Následkem tohoto opotřebení je zvýšená drsnost povrchu obráběného dílce společně s jeho sníženou přesností obroběných ploch. [48; 49]
- Vysoká tvrdost a pevnost – vlastnost niklových slitin, kterými se zachovávají i při vysokých teplotách a pro kterou jsou vyhledávané do náročných podmínek je z hlediska obrábění nevýhodná. Tvrdost a pevnost si slitiny zachovávají i při vysokých teplotách, čímž jsou pro řezné nástroje o to náročnější na opracování. To vede ke zvýšenému opotřebení a nadměrnému zkrácení životnosti nástroje. [48; 49]



Obr. 34 Tepelná bilance obrábění [50].

4.1.1 Obrobitelnost

V předchozím odstavcích byly popsány negativní vlivy na třískové obrábění zvoleného materiálu. Vlivy vychází z přirozených vlastností slitiny. Díky daným negativním vlivům je při třískové obrábění niklových slitin možná jen omezená velikost hloubky řezu. Úprava otáček při obrábění nemá v důsledku nízké změny obrobitelnosti slitiny Inconelu 718, při zvýšených teplotách výrazný vliv. To stejné platí i pro tvorbu třísek, které se při změnách parametrů obrábění tvoří v totožných tvarech a to elementárních. Zmíněné omezení a negativní vlivy je v případě obrábění atmosférických rezistorů možné sledovat při soustružení. Tím jsou obráběny čela na stranách kontaktu se sedlem, respektive s víkem. Parametry platí pro obě metody výroby rezistorů z tohoto materiálu. [47]

Podobné negativní vlivy lze sledovat při obrábění vnitřního průměru. Pro obrobení vnitřního průměru bylo používáno broušení, a to z důvodu vysoké požadované přesnosti rozměrů. Platí pro něj velice podobné negativní vlivy jako pro soustružení, kdy dochází k velkému opotřebenění nástroje. Součást musí být během obrábění velice dobře chlazená, aby se předešlo degradaci i povrchu i nástroje v maximální možné míře. Proto se často celý dílec topí v chladicí kapalině. Postupem času bylo broušení nahrazeno vhodnější nekonvenční metodou. [53]

Elektroerozivní drátkové obrábění je alternativou pro obrábění pevných materiálů s nízkou tepelnou vodivostí díky bezkontaktnímu mechanismu úběru. V našem případě pro obrábění vnitřního průměru rezistoru. Výhodou metody při obrábění atmosférických rezistorů je vznik pouze malých třísek, které lze z prostoru kanálek snadno vyplavit. [51; 52]

Jednotlivé vlastnosti materiálu a následné vlivy na možnosti obrábění jsou pro metodu elektroerozivně vyrobeného rezistoru stejně jako metodou DMLS prakticky společné. Vlastnosti použité slitiny je možné ovlivnit přísadami, které mohou působit pozitivně z pohledu usnadnění procesu obrábění, ovšem jen v omezené míře. Na druhou stranu tento zásah do chemického složení může negativně ovlivnit požadované vlastnosti slitiny. Možností, jak usnadnit obrábění Inconelu 718 je úprava jeho mikrostruktury při procesu výroby polotovaru. Pro EDM metodu je to válcování plechů, pro DMLS je to samotný tisk dílce.

Válcování, což je proces výroby plechů použitých pro výrobu atmosférických rezistorů metodou EDM produkuje plechy standardizovaných tlouštěk a vlastností. Mají charakteristické chemické složení, mechanické vlastnosti a standardizovaný způsob válcování. Úprava těchto vlastností je v rámci dodávky již vypálených plechů možná pomocí dodatečného tepelného zpracování. To může mít z pohledu například žihání pozitivní vliv na mikrostrukturu. Možnosti zlepšení obrobitelnosti jsou v tomto případě však velmi omezené. [54]

Možností, jakými by bylo možné upravit vlastnosti plechu ze superlitiny tak, aby byla zajištěna jeho snazší obrobitelnost, případně zlepšení jiných vlastností je úprava procesu válcování. Bylo vydáno několik studií, které se zabývaly právě změnami těchto vlastností válcovaných niklových slitin při užití různých procesů. Příkladem mohou být následující metody:

- kryoválcování a následné žihání [54],
- rozdělení rychlosti válcování [55],
- hluboké válcování za studena [56],
- dvoustupňové válcování za studena [57].

Všechny výše zmíněné speciální metody vykazují větší, či menší vliv na výsledné mechanické vlastnosti válcovaných plechů. Některé se také vyznačují zjemněním mikrostruktury, což může mít přímý vliv na zlepšení obrobitelnosti. Metody však vyžadují speciální zařízení, případně speciální podmínky válcování. To znamená výrazné zvýšení nákladů na samotnou výrobu plechu, což dané metody v našem případě činí nevyužitelné.

Procesu tisku DMLS metodou, je založen na vstupních parametrech, které jsou vzájemně regulovatelné. Parametry, které lze měnit a vzájemně jejich regulace kombinovat vedou k úpravě mikrostruktury případně změně mechanických, tepelných, únavových a jiných vlastností. Při znalosti odpovídajících poměrů vstupů je možné velice snadno vytisknout materiál o ideálních dosažitelných vlastnostech pro danou aplikaci. Uvažované měnitelné parametry, které jsou v našem případě využitelné pro zlepšení obrobitelnosti jsou konkrétně výkon laseru, rychlost skenování a tloušťka vrstvy. Společně parametry tvoří určitou objemovou hustotu energie, která má přímý vliv na následnou velikost vynaložené řezné síly nástroje na oddělování materiálu při soustružení. V podstatě platí, čím nižší je objemová hustota energie, tím nižší je řezná síla nutná pro obrábění. Při znalosti odpovídajících poměrů vstupních parametrů je technolog obsluhující tiskárnu schopný přímo ovlivňovat obrobitelnost při zachování požadovaných mechanických vlastností pro unikátní dílec. [58]

4.1.2 Mechanické vlastnosti

V rámci klasifikace funkčnosti atmosférických rezistorů byly materiály použité pro jejich výrobu vystaveny mechanické zkoušce tahem, respektive zkoušce byly vystaveny pouze vzorky polotovarů obou posuzovaných metod. Testování probíhá z důvodu ověření požadovaných hodnot, předepsaných pro odpovídající funkčnost dílce. Testované vzorky vyrobené DMLS metodou byly tištěny ve dvou variantách. Byly vytisknuty 3 vzorky vertikálně a následně i horizontálně. Tahová zkouška byla provedena pomocí hydraulického zkušebního stroje ZD40.



a) surové vytištěné vzorky

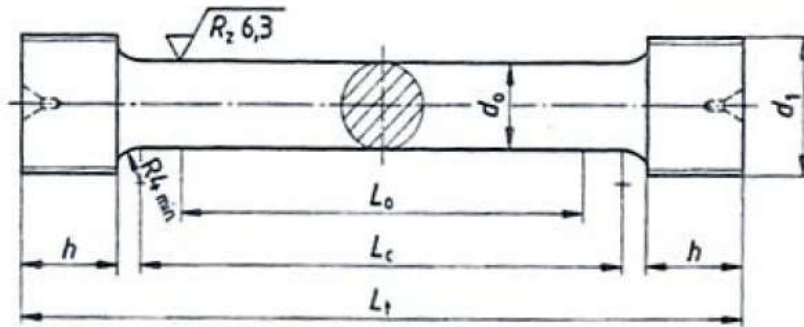


b) obrobené vzorky

Obr. 35 Vytištěné surové a obrobené vzorky pro tahovou zkoušku.

Nejprve byly vytištěny tyčinky o průměru 10 mm z materiálu EOS NickelAlloy IN718, viz obr. 35a. Následně byly obrobeny (obr. 35b), aby odpovídaly rozměrům dle EN ISO 6892-1:2009, viz obr. 36, doplněné o hodnoty, viz tab. 1. Do stejných rozměrů byly obrobeny i vzorky materiálu použitého pro rezistory vyrobené metodou EDM, polotovarem byla kulatina z daného testovaného materiálu Inconel 718. [43]

Dále byly vzorky vytištěny v případě DMLS a následně obrobeny v obou případech dle požadavků EN ISO 6508-1. Rozměry obrobění odpovídají předpokladům pro zkoušky tvrdosti metodou dle Rockwella – vtlačování diamantového kužele. V případě DMLS metody byly tištěny opět tři vzorky vertikálně a tři vzorky horizontálně. [43]



Obr. 36 Rozměrový předpis vzorku pro tahovou zkoušku dle DIN 50125 B [43].

Tab. 1 Rozměry vzorku pro tahovou zkoušku dle DIN 50125 B [43].

d_0	L_0	d_L	h (min.)	L_c (min.)	L_t (min.)
5	25	M8	7	60	90

Výsledky testů jednotlivých zkoušek byly zaznamenány do kvalifikačních protokolů a následně porovnávány dle předepsaných hodnot. Testováním byly stanoveny hodnoty meze kluzu, smluvní meze kluzu, tažnost a tvrdost pro obě metody výroby a následně byly zaneseny do tabulky 2 pro porovnání.

Tab. 2 Hodnoty získané z tahové zkoušky

Vlastnost	Jednotky	Požadavek DMLS	Hodnoty DMLS		Požadavek EDM	Hodnoty EDM
			Vertikálně	Horizontálně		
Smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$	MPa	≥ 1034	1198	1298	≥ 725	883
Mez kluzu R_m	MPa	≥ 1276	1425	1513	≥ 1035	1224
Tažnost A_{25}	%	≥ 12	22,1	18,1	≥ 30	28,6
Tvrdost	HRC	≥ 44	48,2	48,2	-	36

Všechny testované hodnoty jsou v souladu s požadovanými intervaly krom tvrdosti pro EDM metodu. V případě následné kontroly by tento výsledek nebyl průchozí. Z pohledu dodatečného PVD povlakování, kterým se tvrdost povrchu výrazně zvýší, však tento nedostatek nemá zásadnější vliv na pozdější funkci rezistoru.

4.1.3 Chemické složení

Vnitřní skladba polotovarů je v závislosti na jejich aplikovaném využití jednou z nejzásadnějších vlastností materiálu. Dle složení a množství jednotlivých prvků v materiálu je vhodnější na různé aplikace. V případě ventilů do energetického průmyslu pracujícího s párou se jedná především o pevnost, odolnost proti únavě a velice dobrou odolnost proti oxidaci. Inconel 718, který je použit na výrobu analyzovaných atmosférických rezistorů je označován jako chrom-niklová superslitina. To poukazuje na předpoklad zvýšeného obsahu chrómu a niklu. Při kombinaci těchto dvou prvků je od hranice 8 % Ni a 18 % Cr obsahu daná slitina považována za korozivzdornou. Vyšší obsah molybdenu ve slitině vede k vyšší odolnosti proti vysokým teplotám. V kombinaci se zvýšeným obsahem Ni a Cr se zvyšuje odolnost proti agresivní korozi. Všechny prvky se zvýšeným obsahem ve struktuře materiálu jsou zásadní pro správnou funkci atmosférického rezistoru. Výsledné dílce vyrobené metodou EDM a DMLS byly podrobeny analýze vnitřního složení materiálu (PMI) a následně byly porovnávány s požadovaným předepsaným množstvím, viz tab. 3. [59; 60]

Tab. 3 Hodnoty získané z testu chemického složení.

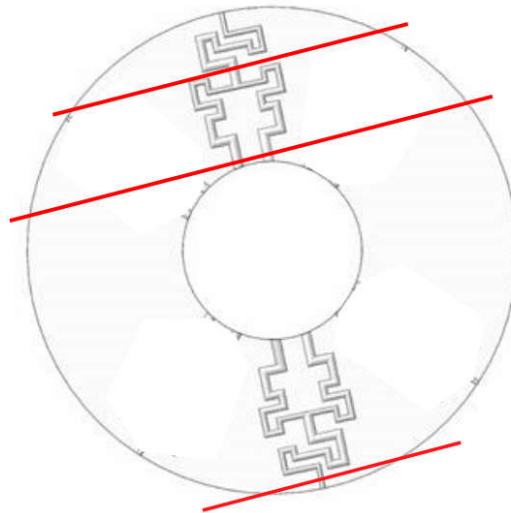
Prvek	Značka	Požadavek	Výsledek DMLS	Výsledek EDM
Uhlík	C	0 - 0,08	0,05	0,017
Hořčík	Mg	0 – 0,35	0,03	0,002
Křemík	Si	0 – 0,35	<0,01	0,06
Fosfor	P	0 – 0,015	<0,01	0,009
Síra	S	0 – 0,015	<0,005	<0,001
Chrom	Cr	17,0 – 21,0	19,3	18,25
Nikl	Ni	50,0 – 55,0	52,72	52,95
Molybden	Mo	2,8 – 3,3	3,12	2,89
Niob	Ni	4,75 – 5,5	5,04	4,97
Titan	Ti	0,65 – 1,15	1,08	0,97
Hliník	Al	0,2 – 0,8	0,56	0,47
Kobalt	Co	0 – 1,0	<0,01	0,34
Tantal	Ta	0 – 0,05	<0,01	0,01
Bór	B	0 – 0,06	<0,003	0,004
Měď	Cu	0 – 0,3	0,12	0,11

Z výsledků testu vyplývá, že hodnoty chemického složení odpovídají předepsanému rozsahu. Skutečnost platí pro oba dílce ve všech rozsazích jednotlivých procentuálních zastoupení prvků v materiálu. Předpoklad funkčnosti dílců z pohledu skladby materiálů je tedy splněn.

4.1.4 Přesnost průřezu labyrintů

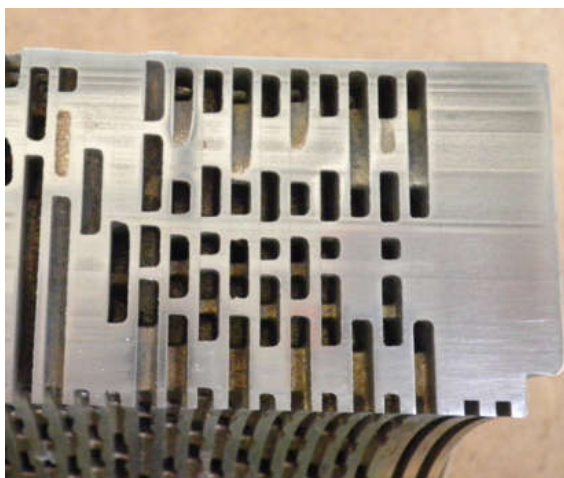
Funkčnost atmosférického rezistoru je dána jeho schopností dosáhnout požadované míry redukce v závislosti na velikosti škrcení průtoku. Aby bylo dosaženo odpovídající funkčnosti, musí vyrobený kus co možná nejideálněji kopírovat jeho digitální předlohu. Ta je navržena přesně tak aby splňovala teplotní a tlakový spád odpovídající dané aplikaci a podmínkám. Každá odchylka od předlohy se projeví při provozu. Nejčastější odchylkou je nesplnění požadovaného tvaru kanálku. Registrujeme dvě potenciální odchylky, kterými jsou odchylka od tvaru kanálku v příčném a podélném průřezu.

Pro porovnání průřezů rezistorů vyrobených oběma metodami bylo třeba dílce rozříznout a následně vybrousit. Řez a výbrus byl proveden v předem rozvržených oblastech obou testovaných rezistorů, aby bylo odhalen maximální rozsah možných průřezů kanálků. Rozložení řezů na rezistorech bylo předem definováno, aby bylo výsledné výbrusy odhalily nejkritičtější místa z pohledu průřezů dílcem, viz obr. 37, kde jsou příčné řezy kudy byl veden řez naznačeny červeně.



Obr. 37 Znárodnění příčných řezů rezistorem.

Po výbrusu a očištění, viz obr. 38a, bylo možno odečíst odchylky vzniklé při výrobě EDM metodou. Před řezáním dílu proběhla penetrační zkouška po pájení. Z rozříznutého rezistoru byl vytvořen detail několika kanálků. Jeden z nich je k vidění na obrázku 38b.



a) řez EDM rezistorem

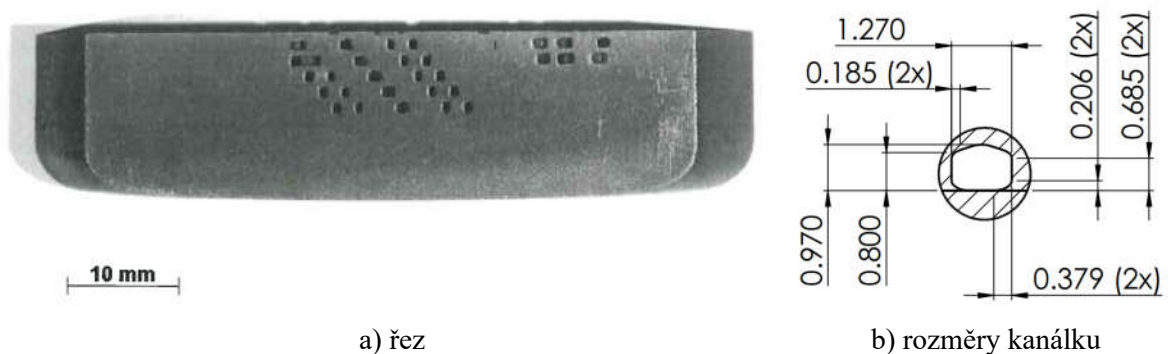


b) detail EDM kanálku

Obr. 38 Příčný výbrus EDM rezistorem a jeho detail.

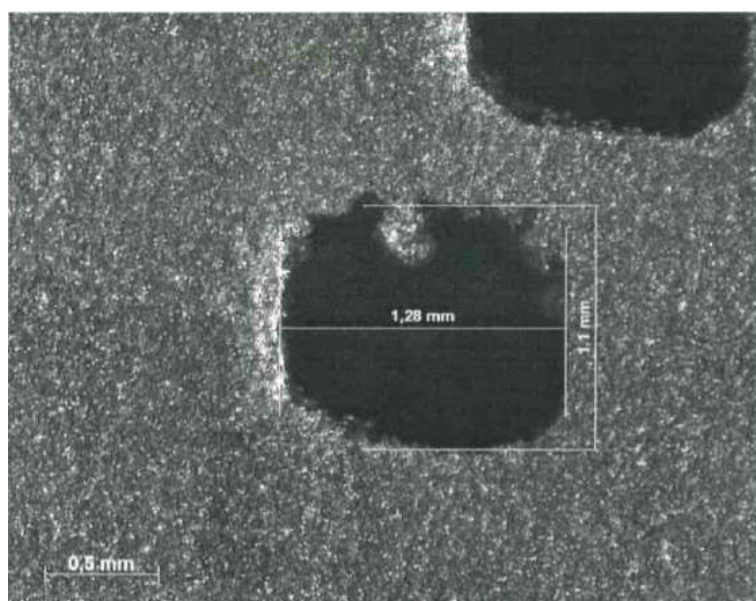
Předlohou příčného průřezu kanálku pro rezistor vyrobený elektroerozivním obráběním je průřez obdélníkového tvaru. Poměr stran se mění v závislosti na velikosti dané sekce kanálku. Při porovnávání digitální předlohy a reálného dílce vyrobeného metodou EDM byla zjištěna vysoká podobnost navrženého průřezu a průřezu reálného rezistoru. Podobnost byla jak tvarová, tak rozměrová a to u většiny kontrolovaných průřezů kanálků. Díky tomu lze předpokládat vyšší shodnost při následné kontrole dosažitelného průtokového koeficientu.

Stejně proceduře řezání a následného broušení a očištění byl vystaven i DMLS rezistor, který lze vidět na obr. 39a. Na rozdíl od EDM rezistoru není jeho průřez obdélníkový, ale z důvodu tisku je polygonální, detail návrhu průřezu kanálku DMLS rezistoru, viz obr. 39b. Důvody, proč tomu tak je byly popsány v kapitole *Návrh rezistoru vyrobeného metodou DMLS*.



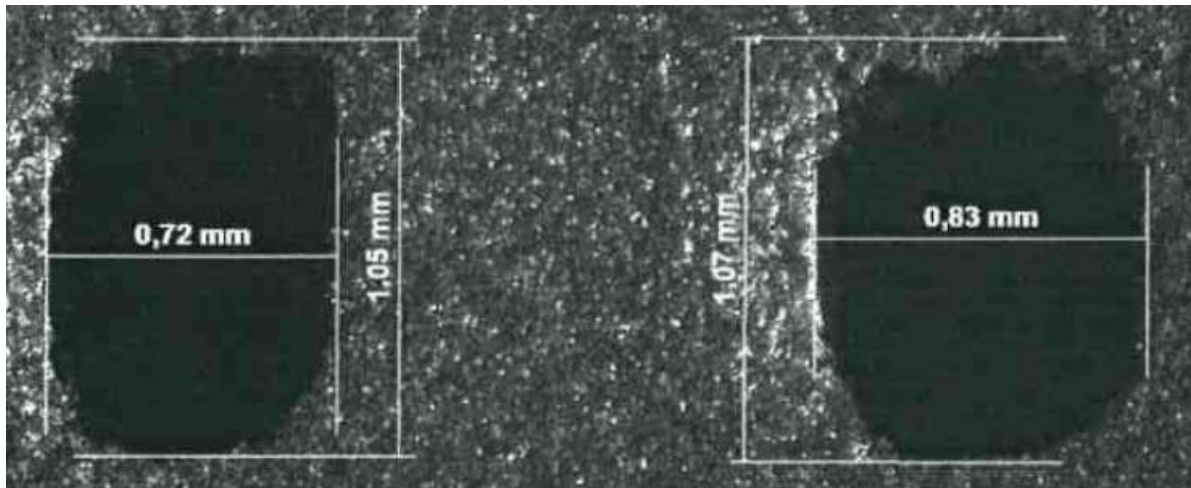
Obr. 39 Řez DMLS rezistorem a navržené rozměry kanálku

Při porovnávání průřezu v rámci předběžného návrhu a následné realizace bylo zjištěno vyšší množství neshodností oproti EDM metodě. Byla objevena neshodnost průřezu z pohledu tvarových odchylek, viz obr. 40, z kterého je patrný propal stropní částí příčného průřezu kanálku. Tento jev je při užití DMLS metody dán procesem vrstvení prášku vrstvu po vrstvě, kde spodní vrstva má jen omezenou nosnost, pokud není natavena. Projevuje se u návrhů, které disponují kritickým převisem větším, než je 45° . Tato kritická hodnota je považována za hranici mezi samonosností prášku užitého pro výrobu dílců DMLS metodou. Překračování této hodnoty není doporučované stran dodavatelů i provozovatelů této technologie a je tak vhodné se jim v maximální možné míře vyhnout. [44]



Obr. 40 Detail průřezu kanálku s převisem (DMLS)

Dalším parametrem, který nebyl v plné míře dodržen byla při porovnávání shodnosti průřezů rozměrová shodnost, viz obr. 41 (v obrázku jsou vyobrazeny dva kanálky nad sebou, pootočené o 90°). Navržené rozměry průřezu kanálku oproti reálným hodnotám z řezů v několika případech nevyhovovaly. Byly zjištěny nejenom odlišnosti z pohledu rozměrů stran, ale i obsahu průřezu, který je v našem případě podstatnější, a to z pohledu dosažení odpovídajícího průtoky média kanálkem a dosažení požadované regulace.



Obr. 41 Detail příčného výbrusu DMLS rezistoru

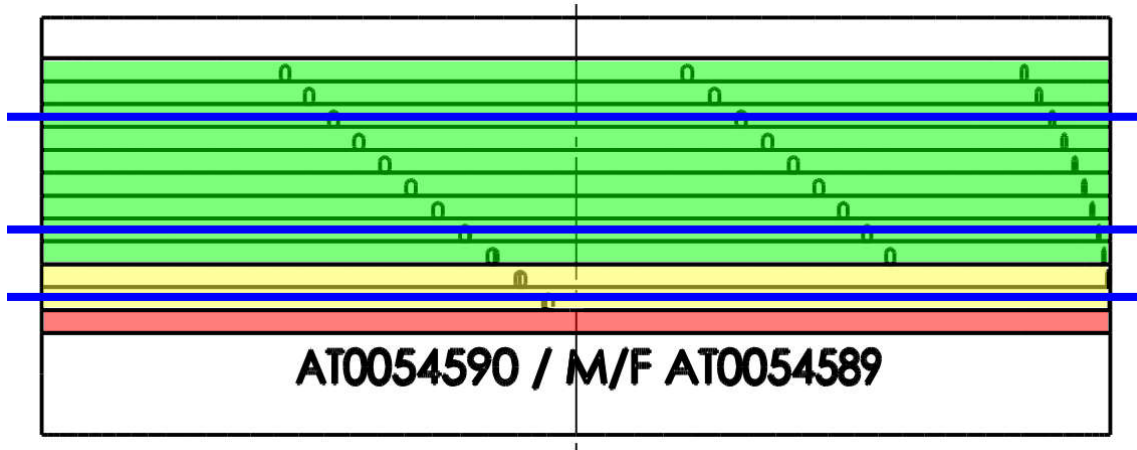
Detail výbrusu poukazuje na odchylky od požadovaných rozměrů. Největší zjištěná odchylka od požadované šířky byla 17,3 %, jak poukazuje tabulka 4. V tabulce je zahrnuta i maximální odchylka od navržené výšky kanálku, která při posouzení reálné výšky výbrusu vyšla o 25,8 % menší.

Tab. 4 Maximální zjištěné odchylky od navržených rozměrů kanálku.

	Požadované rozměry	Reálné rozměry	Odchylka
Výška kanálku	0,97 mm	0,72 mm	25,8 %
Šířka kanálku	1,27 mm	1,05 mm	17,3 %

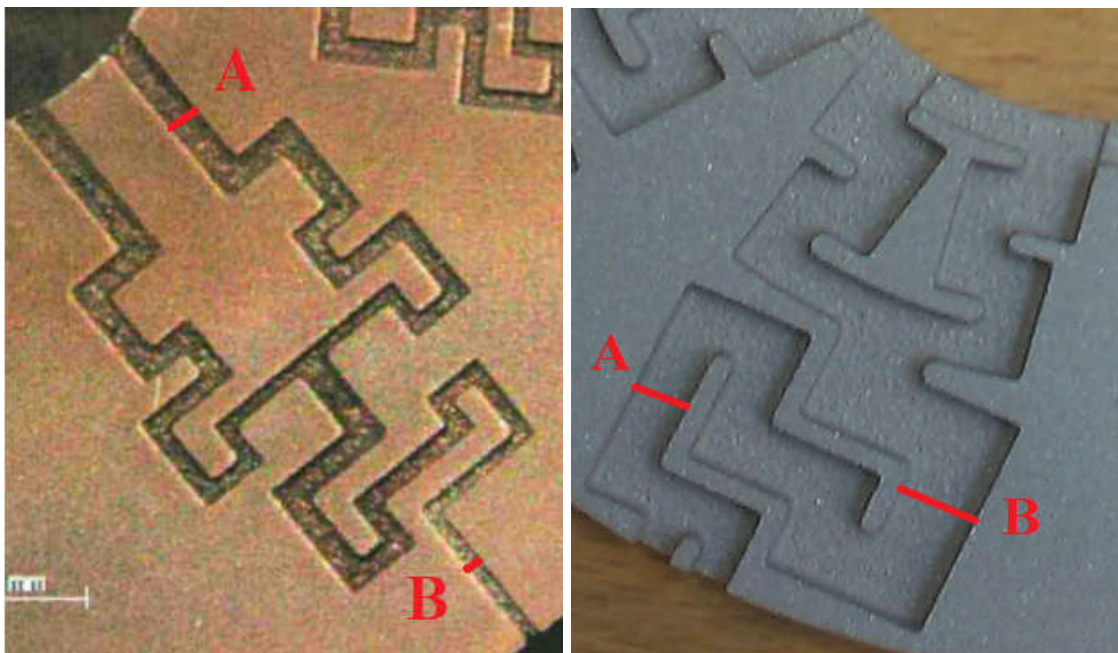
Z jednotlivých výbrusů lze usuzovat, že DMLS rezistor bude při vystavení kontroly průtočného koeficientu vyhodnocen jako neshodný ve větší míře, než tomu bude u EDM metody. Z důvodu propalu stropu v některých částech průřezu lze také usoudit, že je pravděpodobnější i kompletní ucpání redukčního kanálku u DMLS rezistoru. Tato skutečnost by však měla být objevena již při kontrole průchodnosti kanálků, která je prováděna již u dodavatele. Při celkovém zhodnocení průřezové shodnosti je možné usuzovat, že výsledné hodnoty průtokového koeficientu budou v případě DMLS rezistoru pod ideální hodnotou. Předpis vytvořený pro stanovení shodnosti průtokového koeficientu rezistoru, hovoří o možném rozptylu od požadovaných hodnot v rozmezí -10 % / +20 %. Z pohledu zjištěných hodnot maximálních odchylek vyplývá, že dané kanálky disponují nedostatečným průřezem zajišťující odpovídající průtok. Pokud by se odchylky pohybovali v podobných hodnotách u většiny kanálků, lze předpokládat, že při kontrole průtoky budou rezistory vyrobené DMLS metodou častěji označené za neshodné než EDM rezistory. Tento předpoklad však bude nutné ověřit odpovídajícími testy.

Vnitřní stavba a dodržení její shodnosti s návrhem byla kontrolována i řezem a následným výbrusem plochy rezistoru. Při této kontrole bylo ověřováno splnění dráhy kanálku. Rezistory vyrobené oběma metodami byly rozříznuty a vybroušeny dle požadovaných parametrů pro kontrolu možných konfigurací kanálků, viz obr. 42, v němž je znázorněn řez *Unity 2 a 3*, vyznačenými zeleně a žlutě.



Obr. 42 Znáornění podélných řezů rezistorem

Výbrusy nebylo nutné kontrolovat mikroskopy, jako v případě příčných průřezů, ale byly kontrolovány pouze vizuálně. Jak je zřejmé z obázků. 43a a 43b, konfigurace obou kanálků není shodná. Odlišují se tloušťkou i samotnou stavbou. Je tomu tak z důvodu rozdílného návrhu pro zajištění požadovaných redukčních parametrů.



a) DMLS kanálek

b) EDM kanálek

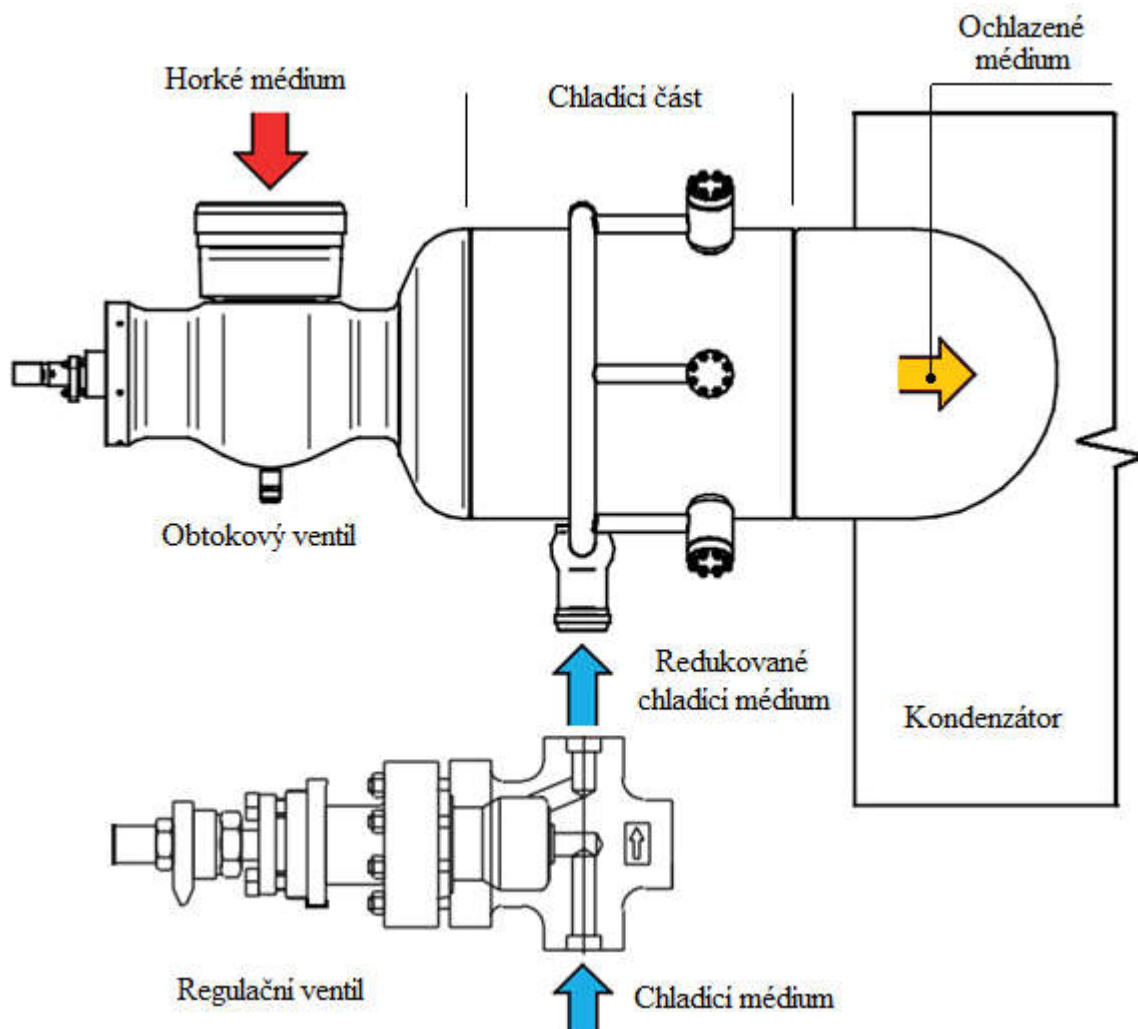
Obr. 43 Kanálky vyrobené metodou DMLS a EDM.

Při vizuální kontrole nebyla shledána žádná výrazná odchylka od navržených konfigurací. Oba vzorky se vyznačují vysokou podobností vůči předloze. Z toho lze usuzovat, že z pohledu případného nedodržení předepsaných hodnot průtočných koeficientů bude stěžejní příčný průřez.

4.2 Procesní hledisko

Správná funkce atmosférického rezistoru je tím nejzákladnějším aspektem, který lze porovnat z hlediska odlišnosti dvou metod výroby. Skutečnost, zda funkce dílce v provozu odpovídají předepsaným parametrům navrženým pro daný proces je z hlediska inovace nového výrobního postupu zcela zásadní. Pokud by inovace nepřinesla zlepšení procesních parametrů, případně by z ní nevyplývalo zlepšení pozice stran konkurenční výhody, neměla by taková inovace hlubší smysl.

Zlepšení procesních podmínek v procesu škrcení a redukce tlaku a teploty vstupujícího média do ventilu lze porovnávat v několika kategoriích. Podmínkou, která je v aplikaci ventilů regulujících průchod média do chladicí části obtokového ventilu, viz. obr. 44 zásadní, je jemnost regulace protékajícího média. Ta je zajištěna schopností ventilu jemně reagovat na případnou změnu požadavků na chlazení – průchod většího množství chladicího média do prostoru chladicí části obtokového ventilu. Samozřejmostí je shodnost vyrobeného dílce s digitální předlohou odpovídající hodnotám vypočteného procesu.



Obr. 44 Schéma procesu chlazení média procházejícího obtokovým ventilem.

4.2.1 Průtokový koeficient

Nejdůležitějším parametrem, který definuje vlastnosti atmosférického rezistoru je průtokový koeficient C_v . Tento koeficient předává informaci o tom, jaké množství média proteče danou armaturou za jednotku času. Doslovná definice zní následovně: „Množství média, které projde zařízením s poklesem tlaku o jednu libru na čtvereční palec.“ Výpočet je následující:

$$C_v = q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}} \quad (1.1)$$

- kde: C_v - průtokový koeficient [-]
 q - objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
 ρ - měrná hmotnost kapaliny [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]
 ΔP - změna tlaku (tlaková spád [psi])

V případě redukčních částí ventilu je stanovení této hodnoty zásadní. Teoretická hodnota C_v je analyticky určena konstruktérem s ohledem na požadavky zákazníka a aplikaci, ve které se zařízení použije. Podmínky pro určení této hodnoty jsou dány požadovanými hodnotami, nutnými k docílení odpovídajícího průtoku tekutiny na výstupu ventilu. Tím je následně řízen proces chlazení páry, potřebný k vzniku ideálních podmínek média procházejícího zákaznickým obvodem.



Obr. 45 Zařízení pro měření průtoku [61].

Hmotnostní průtok redukčních prvků ventilu je ve firmě IMI CCI Czech Republic s.r.o. měřen pomocí bubnového měřicího zařízení, viz obr. 45. Zařízení je tvořené měřícím bubnem, víkem, pneumatickými rozvody a měřícími a tlakovými aparaturami. Měřící aparatura je tvořena několika průtokoměry, snímači tlaku a termoanemometru. Měření probíhá v několika fázích uzavření průtoku média ventilem. Vzhledem k tomu, že je testována jen redukční část ventilu, je reprezentace uzavření částí průtoku provedeno pomocí nepropustné pásky (obr. 46). Páskou je vždy zaslepena ta část atmosférického rezistoru, kterou v dané fázi přiškrcení průtoku nemá proudit médium.

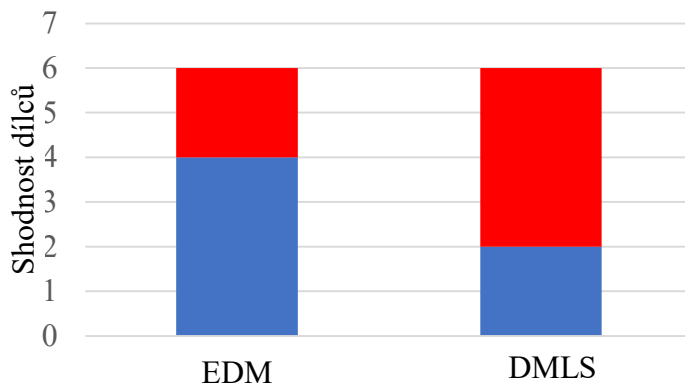
Jedním z předpokladů zavedení inovované výroby atmosférických rezistorů je zisk libovolně nastavitelného průtoku. Při výrobě rezistoru EDM metodou lze vytvořit pouze dílce se standardizovanou hodnotou průtokového koeficientu. Pro příklad, standardizovaný rezistor s vnitřním průměrem 25 mm a vnějším průměrem 66,5 mm je schopen regulovat v rozsazích dle tab. 5. Je to z důvodu omezené kombinovatelnosti jednotlivých redukčních prstenců. Ty jsou navrženy v omezeném množství konfigurací odvislého od množství vyrobených elektrod pro hloubení kanálků.

Tab. 5 Standardizované hodnoty C_v

Dosažitelné hodnoty C_v pro standardizovaný rezistor				
3.0	4.6	6.0	7.8	9.9

Přesnost vyrobeného atmosférického rezistoru, co se hodnot průtokového koeficientu týče, je zásadní pro následnou přesnost a možnost jemné regulace výstupních hodnot média. Rozdíl mezi navrženým C_v a skutečným musí být v rozmezí od -10 % do +20 %, aby mohl být rezistor označen za funkční a vhodný k použití. Pokud rozdíl dosahuje vyšších/nížších hodnot, je rezistor označen jako neshodný kus a musí být vyroben kus nový. Oprava rezistoru, který neprojde testem je možná pomocí vyfukování kanálku, případně vymývání. Je to z důvodu případného zanesení kanálků třískami nebo jinými nečistotami, které nebyly obsluhou odhaleny během kontroly. [61; 62]

Při porovnání shodnosti redukčních prvků, bylo analyzováno 6 rezistorů vyrobených metodou EDM a 6 rezistorů vyrobených DMLS metodou. Výsledky, které vzešly z testování pomocí zařízení pro měření průtoky byly porovnány s požadovanými parametry. Výsledky shodnosti jsou zaneseny v obr. 47.



a) graf shodnost



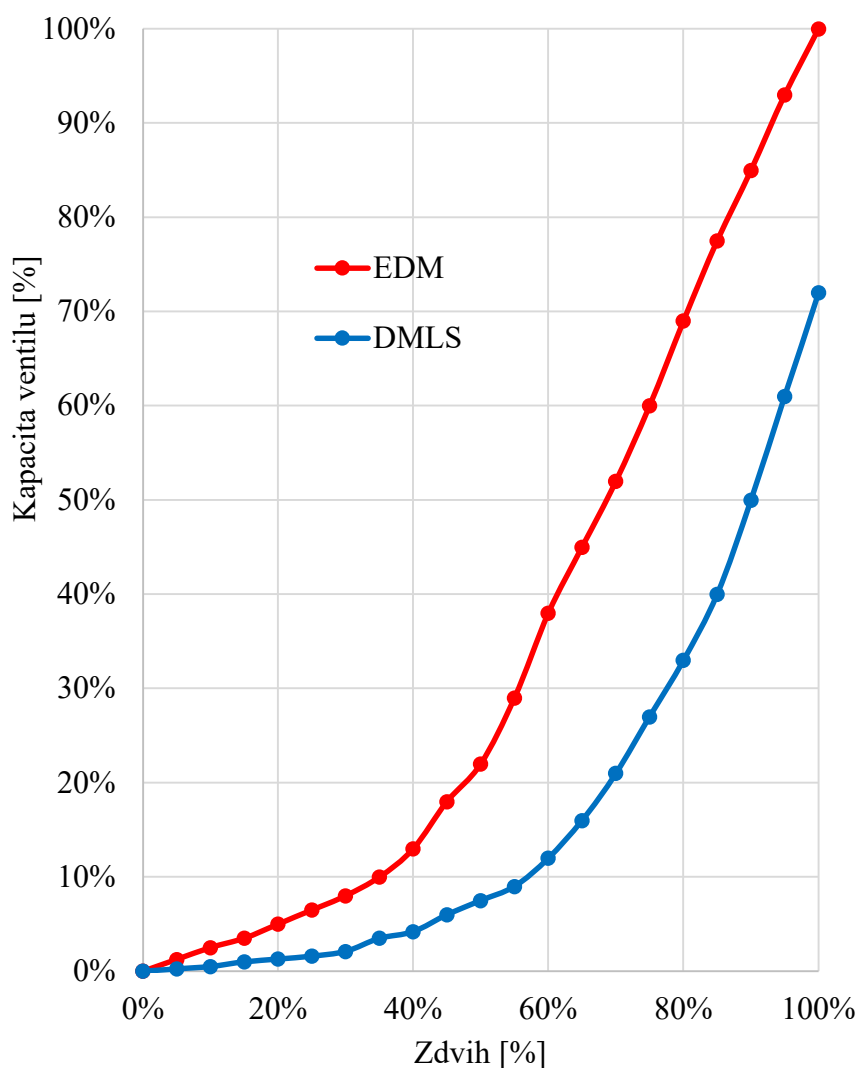
b) simulace škrcení

Obr. 47 Graf shodnosti dílců v závislosti na užití metodě a simulace škrcení průtoku.

Z grafu vyplývá, že EDM metoda má v průměru nižší zmetkovitost oproti DMLS. Bylo zjištěno, že 4 z 6 rezistorů vyrobených EDM metodou prošlo v souladu s předepsanými hodnotami. Oproti tomu DMLS metodou byly prohlášeny za shodné pouze 2 rezistory z 6. To může být dáno nedostatečnou funkčností procesů výroby rezistor DMLS metodou, která není tak dlouho prověřená a optimalizovaná oproti EDM. Příklady produkčních nedostatků u metody DMLS jsou popsány v předcházející části práce, poukazující na tvarové a rozměrové odlišnosti navrženého a reálného průřezu redukčních kanálků. V procesech výroby rezistorů pomocí 3D tisku je tedy nutno dále optimalizovat přístup k výrobě nebo designu, aby bylo možno docílit srovnatelných hodnot s metodou elektroerozivního hloubení labyrintů.

4.2.2 Regulace

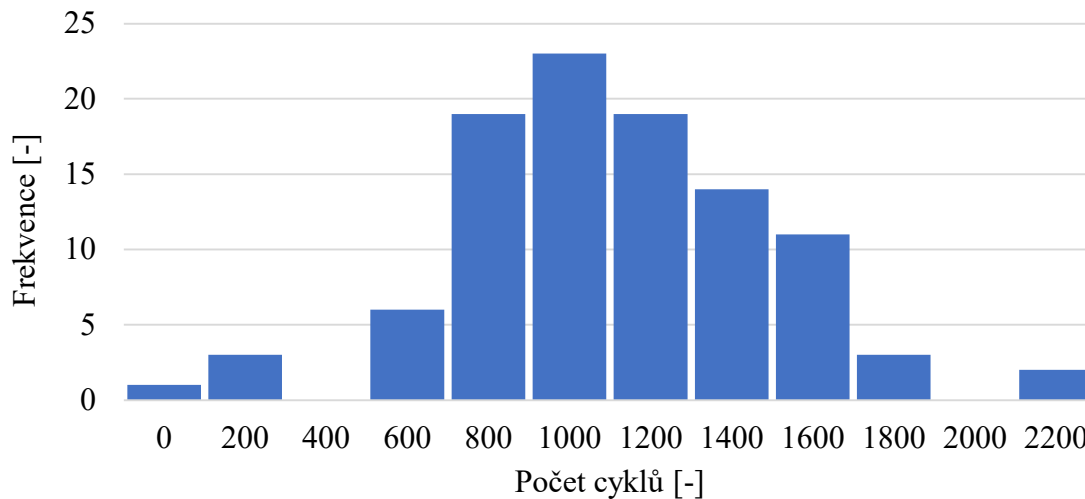
Jak bylo zmíněno výše, čím jemnější regulace je možno dosáhnout v rámci škrcení průtoku, tím je možnost ideálních podmínek chlazení dosažitelnější. EDM technologie výroby má oproti DMLS metodě výrazně větší nároky na vzdálenost jednotlivých kanálků od sebe. V praxi to znamená, že je možno dosáhnout jen omezeně nízké hodnoty průtokového koeficientu v závislosti na množství labyrintů na jednom úseku. V aplikacích, které vyžadují právě tyto nízké hodnoty se jedná o výraznou ztrátu. V obr. 48 je vykreslen průběh kapacity ventilu v závislosti na zdvihu. Jedná se o graf vykreslující výsledky porovnání obou přístupů výroby při požadavku maximální možné jemnosti regulace při počátku zdvihu. Počátek zdvihu je myšlen kontaktu zátky se sedlem při kompletním uzavření průtoku.



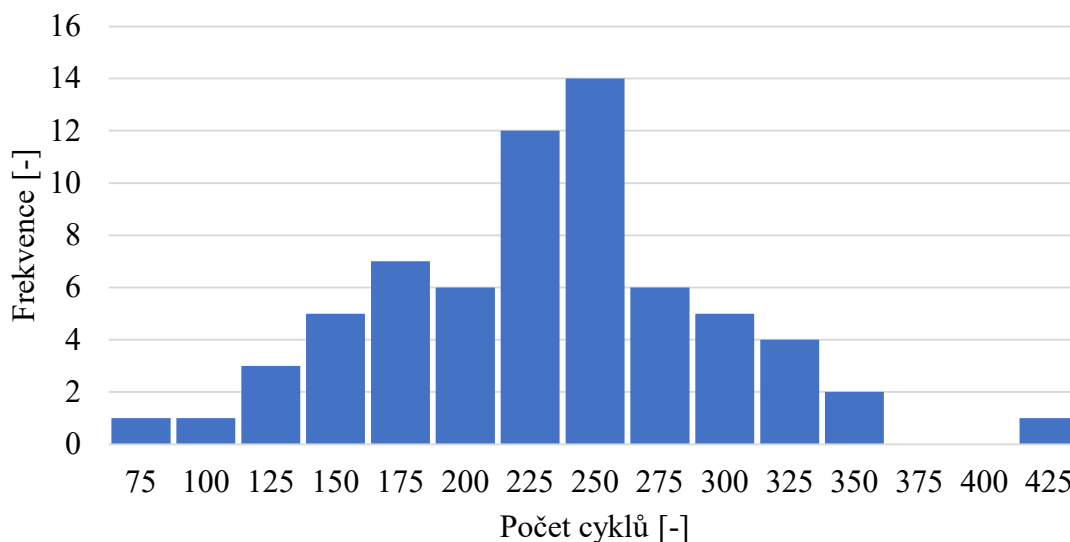
Obr. 48 Graf závislosti průtočné kapacity na zdvihu.

Z grafu vyplývá, že při aplikaci DMLS metody výroby je možno dosáhnout výrazně jemnější regulace při vyšších hodnotách zdvihu, což dovoluje velmi jemně regulovat průtok. Výsledku bylo docíleno zvýšením množství redukční fázi atmosférického rezistoru v blízkosti sedla. Díky tomu lze reagovat na změny provozních podmínek s vyšší přesností.

Skutečnost dosažení vyšší jemnosti v regulaci při aplikaci DMLS metody nám přidává další výhodu, kterou je výrazné omezení cyklování ventilu. Cyklování u redukčních ventilů je popsáno jako opakované snižování a následné zvyšování průtoku o relativně nízké frekvenci. Tento jev není kritickým pro funkci ventilu jako takového, ale výrazně snižuje jeho účinnost. Zvýšením jemnosti regulace v kritické fázi zdvihu je možno odstranit cyklování, vzniklé při neodpovídajícím škrcení, případně uvolňování průtoku média. Předpokladem zvýšení jemnosti průtoku je tedy snížení opakujících se cyklů v průběhu fungování ventilu, což bylo měřeno při aplikaci ve stejných podmínkách, kdy byl EDM rezistor, viz obr. 49, nahrazen DMLS rezistorem s jemnější regulací, viz obr. 50. [63]



Obr. 49 Graf počtu a frekvence cyklů při použití EDM rezistoru.



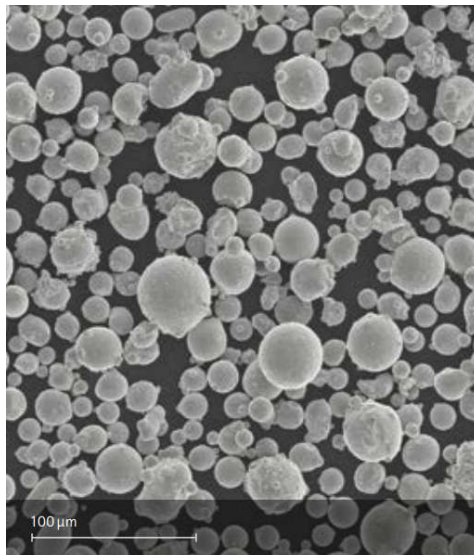
Obr. 50 Graf počtu a frekvence cyklů při použití DMLS rezistoru.

Výsledky, které lze vyčíst z grafů poukazují na výrazné snížení cyklování ventilu v dané aplikaci při využití DMLS rezistoru s jemnější regulací. Díky snížení míry cyklování je dosaženo plynulejší regulace průtoku. To má za následek rychlejší reakci na změnu procesních podmínek a tím pádem na ekonomičtější provoz daného obvodu.

4.3 Ekonomie

Energetické závody, jsou ve velké míře ve vlastnictví státních jednotek. To má za následek poměrně omezené možnosti ve formě případných dodatečných investic na údržbu provozu tak velkého komplexu, jakým elektrárna je. Každá elektrárna má nastavené určité intervaly, ve kterých je odstavena některá část okruhu, případně celý blok. Stává se tomu tak zpravidla z důvodů údržby, případně při zjištění pracovních podmínek, které nejsou ideální pro výrobu elektrické energie. V takovém případě se stává provoz méně rentabilním. Odstávka v energetickém průmyslu je často dlouho dopředu plánována a musí trvat jen krátkou dobu. To vyvíjí tlak nejen na obsluhu elektrárny, ale zároveň na dodavatele náhradních dílů, kteří musí vyhovět požadavkům zákazníka. Je tomu tak z důvodu vysokých ztrát při stojící výrobě elektrické energie. Nutností pro výrobu atmosférických rezistorů, které jsou jednou z nejvíce namáhaných částí redukčních ventilů je jejich co možná nejrychlejší a nejflexibilnější výroba. Zatímco pro rezistor vyráběný metodou EDM je proces výroby velmi náročný na dílčí procesy, se kterými jsou spojeny i další investice na potřebné zařízení, proces výroby DMLS metodou vyžaduje méně mezikroků, ale i méně zařízení.

Celý proces u obou metod začíná polotovarem. Atmosférické rezistory vyrobeny metodou EDM se skládají z určitého množství plechových prstenců o stejných rozměrech, které jsou při kompletaci z obou stran uzavřeny koncovými díly vyrobenými z kulatiny. Plechy jsou dodávány přes zprostředkovatele nakupujícího surové plechy, které jsou následně páleny na požadované rozměry. Polotovarem pro výrobu součástí pomocí DMLS metody je kovový prášek s částicemi v rozsahu velikostí 20-55 μm (obr. 51) označovaný distributorem EOS NickelAlloy IN718. Kovový prášek je získáván pomocí dvou metod, které jsou založeny na rozprašování, a to buď plynu nebo vody. Při tomto procesu se roztavený kov s vodou/plynem rozprašuje na kapičky pomocí trysek. Kapičky jsou následně rychle zchlazeny a tvoří prášek. EOS prášky dodává firmám, které využívají tiskárny vyrobené právě touto firmou a jejich distribuce je tedy velmi plynulá. Zbylé procesy byly rozebrány v popisu výroby rezistoru oběma metodami. [64; 65]



Obr. 51 Surový prášek pro DMLS [66].

4.3.1 Výrobní náklady

Jednotlivé postupy a principy výroby atmosférických rezistorů oběma analyzovanými metodami byly popsány v předešlých odstavcích práce. Nyní budou vybrány pouze ty položky procesů, které v sobě nesou nákladovou složku. Výpočty jsou založeny na výrobě pouze jednoho kusu. Náklady se v případě více stejných kusů jsou výrazně odlišné v obou metodách. V případě EDM metody jsou to následující:

- nákup vypálených plechů,
- nákup přířezů kulatin pro koncové dílce,
- obrábění přířezů,
- elektroerozivní obrábění plechů (včetně čištění a rovnání),
- pájení (nanášení pájky, desorpce pece a přípravků, pájení a transport),
- obrábění funkčních ploch čel rezistoru,
- elektroerozivní obrábění vnitřního průměru drátkem,
- PVD povlakování.

Jednotlivé položky EDM procesu výroby a k nim náležící náklady v Kč, viz tab. 6. Náklady jsou uvažované k období, ve kterém je práce vyhotovena a odpovídající situaci na trhu s polotovary (květen, 2022).

Tab. 6 Náklady pro výrobu EDM rezistoru.

Operace	Plechů nákup	Přířezy nákup	Přířezy obrábění	EDM elektroda	Pájení	Obrábění komplet	EDM drátek	PVD
[Kč]	47 713	2 249	3 017	13 235	19 798	2 836	9 020	2 221

Kompletní výrobní náklady na výrobu rezistoru EDM metodou jsou 116 805 Kč.

Níže budou dle položek rozebrány nákladové složky při výrobě DMLS rezistoru:

- tisk DMLS rezistoru (včetně kontrol a testů),
- obrábění čel,
- elektroerozivní obrábění vnitřního průměru drátkem,
- PVD povlakování.

Jednotlivé položky DMLS procesu výroby a k nim náležící náklady v Kč, viz tab. 7.

Tab. 7 Náklady pro výrobu DMLS rezistoru.

Operace	Tisk	Obrábění čel	EDM drátek	PVD
[Kč]	36 568	2 836	9 471	2 221

Při součtu jednotlivých položek náležitých jednotlivým metodám výroby atmosférického rezistoru docházíme ke kompletním nákladům 116 805 Kč při výrobě EDM metodou. Výrobou DMLS metodou dostáváme částku 51 096 Kč za kompletní náklady na výrobu rezistoru. Výsledky poukazují na ekonomičtější výrobu z finančního hlediska při využití metody DMLS, a to více jak dvojnásobně.

4.3.2 Dodací lhůty

Schopnost dodat dílce v požadované kvalitě a s odpovídající funkčností je jedním ze čtyř základních parametrů, které je nutné dodržet. Dalšími jsou udržení nákladů v akceptovatelné hladině pro zákazníka. To bylo pospáno v předešlé kapitole. Posledním neméně důležitým aspektem je dodací lhůta. Pokud není dodržena jedna z výše zmíněných podmínek, není možné se dlouhodobě udržet na trhu. Níže je rozebrán stav dodacích lhůt obou metod výroby. Nejprve položky ovlivňující čas dodání při výrobě EDM metodou:

- dodání vypálených plechů,
- elektroerozivní hloubení kanálků, soustružení přířezů, nanášení pájky a skládání,
- pájení,
- elektroerozivní obrábění drátkem,
- finální obrábění a kontroly,
- PVD povlakování.

Jednotlivé položky EDM procesu výroby a k nim náležící počet pracovních dnů je zobrazena níže, viz tab. 8.

Tab. 8 Časový fond na jednotlivé operace při EDM výrobě rezistoru.

Operace	Dodání plechů	EDM elektroda, nanesení pájky	Pájení	EDM drátek	Finální obrobění	PVD
[pracovní dny]	10	5	10	10	2	10

Níže budou dle položek rozebrány položky a jejich časová náročnost při výrobě DMLS rezistoru:

- tisk DMLS rezistoru (kontroly průchodnosti),
- obrábění čel,
- elektroerozivní obrábění vnitřního průměru drátem,
- PVD povlakování.

Jednotlivé položky DMLS procesu výroby a k nim náležící počet pracovních dnů je zobrazena níže, viz tab. 9.

Tab. 9 Časový fond na jednotlivé operace při DMLS výrobě rezistoru.

Operace	Tisk DMLS	Obrábění čel	EDM drátek	Finální obrobění	PVD
[pracovní dny]	10	2	5	2	10

Při součtu jednotlivých složek procesu náležících jednotlivým metodám výroby atmosférického rezistoru docházíme ke kompletnímu počtu dnů nutných k dodání. Tedy 47 pracovních dní při výrobě EDM metodou, respektive 32 pracovních dní při metodě DMLS. Pomocí 3D tisku je možné zkrátit dobu výroby o celé 3 pracovní týdny.

4.3.3 Reakce na změnu výroby

Schopnost rychle reagovat na změnu podmínek, případně rozměrů oproti původnímu návrhu je, jak bylo zmíněno v přechozích odstavcích velmi důležité. Ke změnám procesních podmínek dochází většinou pokud zákazník objeví neshodu s požadovanou mírou regulace při chlazení, nebo dochází ke zvýšené míře cyklování. To bylo popsáno v kapitolách *Průtokový koeficient a Regulace*. Včasná a přesná reakce je základem pro udržení dobrých vztahů se zákazníkem, který i přes odlišnosti v původním řešení zvolí upravenou alternativu daného řešení. Tento proces zlepšení původního řešení, případně úpravy daného procesu při neměnné konfiguraci okruhu je známý jako *Upgrade*. U tohoto způsobu řešení problému je stejně jako v případě *Aftermarket* velice důležitá flexibilní reakce v mezích akceptovatelných nákladů.

Změny pracovních podmínek atmosférického rezistoru jsou odvozeny od změny vnitřního složení a konfigurace jednotlivých kanálků. Buď je zvýšen, nebo snížen koeficient C_v , který je ukazatelem míry regulace. Možnost měnit průtokový koeficient se u obou analyzovaných metod výroby liší. Míra odlišnosti možných změn, a především jejich dopad na proces výroby bude rozebrán v následující části.

Jak bylo popsáno v kapitole *Aktuální stav výroby* kanálky jsou tvořeny procesem erodování, kdy se elektroda, která má předem definované trajektorie kanálků noří do vypáleného plechu. Pro každou velikost atmosférického rezistoru je vymezeno několik odlišných elektrod. Elektrody se od sebe odlišují obrobenu konfigurací kanálků. Díky tomu je možné při výrobě určité velikosti využít jen omezené množství konfigurací. Při skladbě rezistoru se na sebe ukládají vždy dvojice plechů, které spolu tvoří jeden *Unit*. Každý plech nese konfiguraci, kterou je možné aplikovat pouze na jednom plechu. Pomocí erodování lze tedy vytvořit pouze 2D kanálek. Vzhledem k omezeným zástavbovým prostorům z důvodu standardizované velikosti těla ventilu je omezený i počet disků, které se na sebe mohou naskládat. To je omezující z hlediska možnosti přesného nastavení průtokového koeficientu. Veškerá výše zmíněná standardizace je podmíněna maximální možné minimalizací nákladů na kompletní redukční ventil. Jak bylo zmíněno v části *Regulace* EDM rezistory mají omezení i z pohledu vzdálenosti jednotlivých kanálků od sebe. Z těchto důvodů jsou v daných velikostech vyráběny pouze rezistory se standardizovanými pracovními parametry, které jsou určeny právě hodnotou koeficientu C_v , viz tab. 5.

V případě potřeby stran zákazníka využít redukčních ventilů, které nedisponují schopností regulace ve výše zmíněných hodnotách by bylo nutností vyrobit kompletně novou elektrodu, která bude mít předem navržené konfigurace kanálků, aby odpovídala specifickým požadavkům zákazníka. Takový proces je náročný z hlediska návrhu nové elektrody, ale především z hlediska vysokých nákladů na její výrobu. Tím se samozřejmě prodlužuje i čas, za který je možné zákazníkovi požadavku vyhovět.

Návrh rezistoru z pohledu vnějších rozměrů vyrobeného metodou DMLS podléhá jen jedné podmínce. Stejně jako u EDM metody se rezistor vkládá do standardizovaného těla ventilu, které má předepsané vnitřní rozměry. Vnitřní konfigurace je následně omezená jen požadovanými parametry vystupujícího média. Způsob, jakým budou jednotlivé kanálky konfigurovány už jsou následně jen na fantazii konstruktéra zodpovědného za dosažení odpovídajících podmínek. Z pohledu způsobu tvorby kanálků zde není omezení. Záleží na volbě konstruktéra, zda se rozhodne pro pouze 2D konfiguraci kanálku, nebo zvolí variantu 3D, kdy může kanálek prostupovat napříč jednotlivými vrstvami. Společně s rozvahou nad konfigurací však musí současně vzít v potaz omezení při tisku, tak jak bylo popsáno

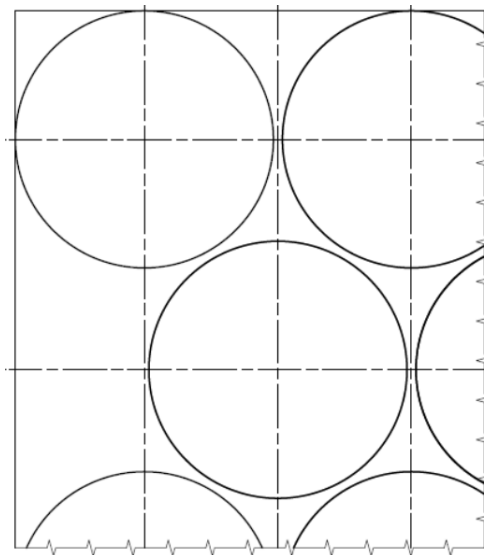
v kapitole *Návrh rezistoru pro DMLS metodu výroby*. Zvolená konfigurace je následně po vytvoření 3D modelu rozdělena na vrstvy, dle potřeb tiskárny. Náročnosti vnitřní stavby kanálků rezistoru a z nich plynoucích vícenákladů z pohledu vyšších nároků vytvořené trajektorie soustředěného tepelného toku laserem je zanedbatelná. Změna vnitřní konfigurace kanálků nemá při výrobě rezistoru DMLS metodou vliv ani na následné finální obrobení.

Z pohledu výroby rezistoru DMLS metodou je rychlost odezvy na specifický požadavek závislý na přítomnosti prášku a konstruktéra, který danou konfiguraci bude schopný navrhnout. Z pohledu produkčních kapacit je zde tedy eliminovaná potřeba výroby dodatečných nástrojů, nebo implementace jiných zařízení do procesu. To dělá z DMLS metody výrazně flexibilnější řešení z pohledu reakce na změny v produkci.

4.4 Ekologie

EDM metoda výroby atmosférických rezistorů je producentem několik typů odpadů. Primárním odpadem při procesu výroby jsou zbytky plechu po pálení prstenců, které nelze dále využít. Další odpad vzniká při obrábění koncových dílů rezistorů, které jsou soustruženy. Jedná se tedy stejně jako při finálním obrobení spájeného rezistoru, které je také součástí procesu výroby o třísky. Přídavky na obrábění jsou pro EDM metodu výroby atmosférických rezistorů prakticky totožné, jako v případě DMLS. Proto bude v práci zmíněna pouze rozdílnost z pohledu množství odpadu.

Jak bylo již několikrát zmíněno, polotovarem rezistorů vyrobených EDM metodou je plech. Pokud je vzata v potaz pouze ta část plechu, ze které jsou výpalky přímo určeny pro následnou výrobu rezistoru jedná se o plech o rozměrech 370 x 270 mm. Rozložení výpalků na plechu bylo rozvrženo jako na obrázku 52.



Obr. 52 rozložení výpalků.

Výpočet využitelnost plechu při pálení požadovaných rozměrů je dle následujících vzorců:

$$S_{výp} = \frac{\pi \times D_{výp}^2}{4} - \frac{\pi \times d_{výp}^2}{4} = \frac{\pi \times 66,5^2}{4} - \frac{\pi \times 23,75^2}{4} = 3\,030,213 \text{ mm}^2 \quad (1.2)$$

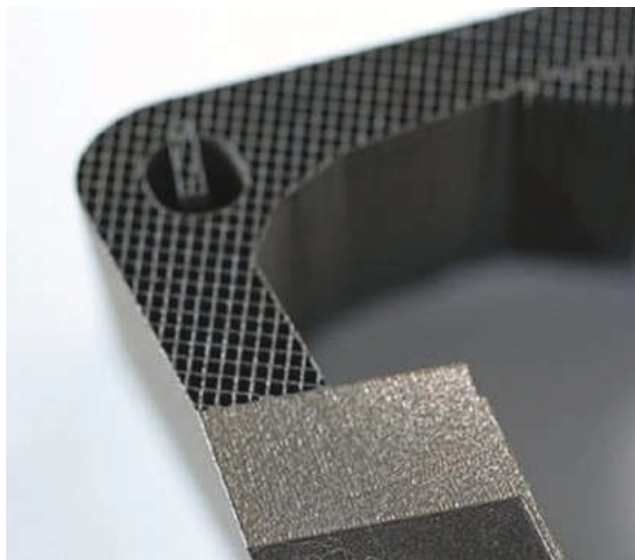
$$S_{pl} = h_1 \times h_2 = 370 \times 270 = 99\,900 \text{ mm}^2 \quad (1.3)$$

$$P_{EDM} = \frac{S_{pl}}{20 \times S_{výp}} = \frac{20 \times S_{výp}}{S_{pl}} = \frac{20 \times 3\,030,213}{99\,900} = 0,607 = 60,7 \% \quad (1.4)$$

- kde: $S_{výp}$ - obsah výpalku [mm^2]
 $D_{výp}$ - vnější průměr výpalku [mm]
 $d_{výp}$ - vnitřní průměr výpalku [mm]
 S_{pl} - obsah plechu [mm^2]
 P_{EDM} - využitelnost plechu [-]

Z procentuálního pohledu využití vstupujícího materiálu v podobě plechu do procesu a výsledného objemu dílce se jedná o 39,3 % podíl odpadu vzniklého při pálení.

Při DMLS metodě 3D tisku je nejprve tisknuta podkladová část výrobku, aby došlo k jeho fixaci a lepšímu odvodu tepla. Netavený prášek, který není součástí fixační části, slouží jako podpora pro tavené vrstvy nad ním. Následně je nutné tento typ podpory odříznout od požadované části tištěného dílce. Máme tedy dva typy odpadu přímo při tisku. Spečenou část podkladu a volnou část tvořenou práškem. Volný nespečený prášek je možné pomocí síta zbavit velkých částic a lze tak prášek ihned opětovně použít. Z pohledu množství prášku použitého pro tisk je v různých studiích zmíněno zpravidla množství odpovídající 1–4 % prášku, který je nutné po tisku odstranit. Zbylý odpad je tvořen třískami po finálním obrobení. Z hlediska podkladové části, nutné pro fixaci je míněna vrstva spečeného prášku o půdorysných rozměrech budoucího dílce a výšky v řádech několika milimetrů. V případě výroby atmosférického rezistoru je to vrstva vysoká 4 mm a je tvořená žebrováním, viz obr. 53. [67; 68]



Obr. 53 Žebrovaná fixační podpora při výrobě DMLS metodou [69].

Výpočet využitelnosti prášku jako polotovaru pro DMLS výrobu je dle následujících vzorců:

$$S_{tisk} = \frac{\pi \times D_{výp}^2}{4} - \frac{\pi \times d_{výp}^2}{4} = \frac{\pi \times 66,5^2}{4} - \frac{\pi \times 23,75^2}{4} = 3\,030,213 \text{ mm}^2 \quad (1.5)$$

$$V_{pod} = S_{tisk} \times h_{tisk} = 3\,030,213 \times 4 = 12\,120,852 \text{ mm}^3 \quad (1.6)$$

$$V_{kom} = v_1 \times v_2 \times v_3 = 30 \times 250 \times 250 = 1\,875\,000 \text{ mm}^3 \quad (1.7)$$

$$P_{DMLS} = \frac{V_{pod}}{V_{kom}} = \frac{12\,120,852}{1\,875\,000} \cong 0,0065 \cong 0,65 \% \quad (1.8)$$

kde:

S_{tisk}	- obsah půdorysu rezistoru [mm ²]
D_{tisk}	- vnější průměr tištěného polotovaru [mm]
d_{tisk}	- vnitřní průměr tištěného polotovaru [mm]
h_{tisk}	- výška fixační podpory [mm]
V_{pod}	- objem fixační podpory [mm ³]
v_1	- výška vrstvení prášku při tisku rezistoru [mm]
v_2	- šířka komory tiskárny [mm]
v_3	- hloubka komory tiskárny [mm]
V_{kom}	- objem zaplněné komory při tisku rezistoru [mm]
P_{DMLS}	- využitelnost prášku [-]

Výsledkem výpočtu odpadu ve formě podkladové fixační části při tisku je 0,65 % z kompletního objemu využitého prášku, kterým byla naplněna požadovaná část komory. Z hlediska odpadu ve formě degradace prášku, kdy studie mluví o odpadu v rozmezí 1-4 %, je uvažována maximální možná míra množství dále nevyužitelného prášku. Při součtu je dosaženo odpadu bez uvažování výsledného obrobění pod hranicí 5% kompletního využitelného polotovaru.

Obě zvolené metody výpočtu jsou demonstrativní a byly využity tak, aby poukázovaly na rámcové rozdíly v množství odpadu obou metod. Při detailním rozboru by bylo řešeno přesné rozdělení přídavek pro finální obrobění. Bylo by vhodné upravit i výpočet objemu podpory, kdy není uvažováno snížené objemu s ohledem na žebrování, ale je uvažována kompletně vyplněná stavba podpory.

4.4.1 Recyklace

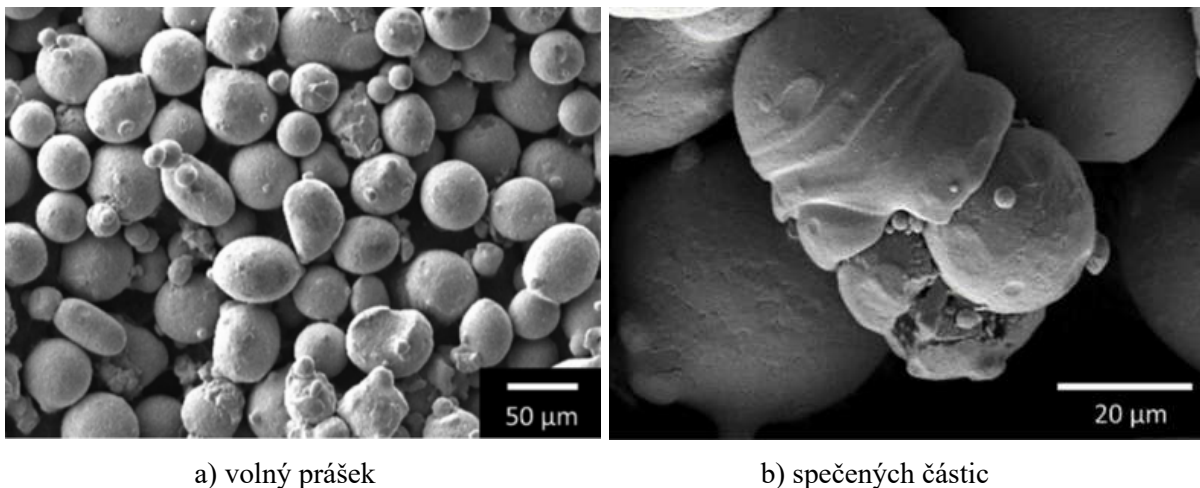
Potom co je odpadový materiál ve formě zbytků plechů po pálení, podpor po 3D tisku případně třísek přichází na řadu jeho opětovné použití. Samotný šrot nelze ihned znovu použít, jako je tomu například u ocelí, nebo obvyklých korozivzdorných ocelí. Šrot musí projít procesem recyklace, který je u slitin poměrně složitý a je závislý na míře jeho znečištění nebo podílu vedlejších cenných prvků, než jsou požadované legury dané slitiny. Na základě toho se šrot dělí do tří skupin, které se liší svým zpracováním při recyklaci:

- Šrot s malým množstvím nečistot se zjevným složením slitiny se přetavuje s novými legujícími kovy za účelem výroby primárních ingotů slitiny. Tento šrot prochází přísnou kontrolou shodnosti složení, kterou projde jen jeho omezené množství.
- Šrot se značným množstvím nečistot a dalších cenných prvků je nejprve rozemlet na prach, aby se zvětšil jeho povrch a následně se rozkládá pomocí silné kyseliny. Dalším krokem je rafinace na jednotlivé kovy slitiny. V mnoha případech se šrot rozmělnuje mletím, nebo atomizací. Ty pro svůj provoz vyžadují velké množství energie vzhledem k vysoké pevnosti a žáruvzdornosti šrotu této superslitiny.

- Šrot s vysokým podílem nečistot není vhodný k přetavení a následné recyklaci při výrobě nových ingotů superslitiny, ale používá se především jako přísada k výrobě ocelí a jiných slitin. [70]

Zbytky plechů po řezání laserem spadají do první kategorie. Je tedy možné tento druh odpadu recyklovat standardními metalurgickými postupy, bez nutnosti dalších zásahů při jejich třídění. Z pohledu energetické náročnosti přeměny šrotu na nový polotovár ve formě plechu se jedná o velmi náročný způsob recyklace, který je doprovázen vznikem nových spalin do ovzduší.

V případě odpadu ve formě prášku zbylého po tisku DMLS metodou, který není součástí tavených vrstev tvořících tištěný dílec je možné jej znovu použít. Je to prášek prakticky neovlivněný procesem tisku v porovnání se strukturou původního prášku, viz obr. 54a. Před tím, než se prášek využije pro další výrobu musí být roztřízen dle velikosti. Zjednodušeně řečeno jsou pomocí síta odstraněny nevyhovující částice. Zpravidla jsou to částice větší než 50 μm , které byly v blízkém kontaktu s tavenou vrstvou a došlo ke stavení několika sousedních částí k sobě, viz obr. 54b. Takto jsou z objemu prášku, který zbyl z předešlého procesu tisku odstraněny částice reprezentující jednotky procent celého zbytkového objemu prášku (1,4 – 4 %). Takto přesátý prášek lze znova použít pro tisk, a to bez toho, aniž by došlo k degradaci hotového dílce, případně snížení jeho mechanických vlastností. Opětovného tavení recyklovaného prášku je možno využít i v 15 po sobě jdoucích cyklech tisku následováno přesátím zbytkového prášku. Podpory vzniklé při tisku se recyklují stejným způsobem jako plechy zbylé po řezání laserem. [72; 73]



a) volný prášek

b) spečených částic

Obr. 54 Detail částic prášku [72].

Co se týče opětovného použití prášku bez toho, aby došlo k jeho doplnění o nový nepoužitý prášek, studie hovoří o zvýšení nežádoucích vlastností. Jedná se o prášek, který byl přesát, aby bylo možno využít výroby v odpovídajících tolerancích. Po několik cyklech tisku došlo ke zvýšení obsahu oxidů na povrchu částic prášku, tím pádem ke změně morfologie oproti původnímu neovlivněnému prášku. Došlo také ke zvýšení magnetického odporu. Tento jev byl sledován u niklové slitiny 718. V praxi je ale využíváno doplňování a mísení prášku recyklovaného o prášek dosud nepoužitý. Tím je docíleno snížení množství nežádoucích jevů na částicích prášku. [71; 72; 73]

4.5 Výsledné zhodnocení a diskuse

Analýza jednotlivých aspektů výroby, výrobitelnosti a funkčnosti, které byly v předešlých částech provedeny jsou uvedeny níže, včetně krátkých výstupů k dané problematice. Pro přehlednost je následně uvedeno v tabulce 10. Pokud metoda lépe odpovídá danému hledisku, je v daném aspektu označena.

- **Obrobitelnost** – při posuzování obou přístupů a užití standardních polotovarů a podmínek má podobný charakter u obou metod výroby rezistoru. Existuje několik způsobů, kterými lze polotovar ve formě plechu upravit tak, aby se změnila jeho struktura a mechanické vlastnosti, čímž by se obrobitelnost mohla zlepšit. Svými náklady a množstvím takto upravených plechů, které by se pro aplikaci námi analyzovaných dílců se však jedná o nepoužitelné řešení z důvodu vysokých vícenákladů. Oproti tomu mechanické vlastnosti a stavba vnitřní mikrostruktury výsledného dílce je snadno upravitelná při vhodně zvolených procesních podmínkách tisku DMLS metodou. Lze dosáhnout větší pórovitosti při dodržení požadovaných mechanických vlastností, což může mít výrazný vliv při chlazení. To je při obrábění materiálu *Inconel 718* velmi důležité.
- **Mechanické vlastnosti** – byly získány tahovou zkouškou a vyšli v požadovaných intervalech předepsaných s ohledem na metodu výroby. Zde je důležité zmínit možnost úpravy těchto vlastností vhodnou volbou procesních parametrů jako v případě obrobitelnosti. Stejně tak lze mechanické vlastnosti upravit procesem výroby polotovaru, respektive úpravou procesních podmínek tisku. Výrazný rozdíl je však v nákladech nutných k provedení daných úprav. V případě DMLS metody máme široké možnosti úpravy procesu s přihlédnutím k dodržení požadovaných minimálních hodnot. Tím se ve výsledku dají ovlivňovat i výsledné mechanické vlastnosti.
- **Chemické složení** – jako charakteristika materiálu použitého pro výrobu atmosférického rezistoru byla v souladu s požadavky u obou metod.
- **Přesnost průřezu labyrintů** – byla zkoumána po rozříznutí testovacích kusů. Zatímco EDM metoda prošla kontrolou příčných i podélných průřezů s akceptovatelnými odchylkami, u DMLS metody tomu tak nebylo. Především při porovnání předlohy a reálného výbrusu příčného řezu kanálku byl shledáno několik odchylek. Kromě propadu stropní části kanálku se jedná i o odchylky v tvarové podobnosti průřezu.
- **Průtokový koeficient a jeho shodnost** – jako jeden ze zásadních aspektů funkčnosti atmosférického rezistoru byl testován pomocí bubnového systému pro měření průtoku. Testu bylo vystaveno 6 rezistorů vyrobených metodou EDM a 6 metodou DMLS. Rozmezím povolených odchylek stanovených při návrhu rezistoru prošly 4 vyrobené EDM metodou a 2 metodou DMLS. Výsledky poukazují na vyšší shodnost dílců vyrobených EDM metodou, což může být důsledkem vysokých tvarových odchylek od navrženého průřezu atmosférických rezistorů vyrobených metodou DMLS.
- **Regulace** – stanovující mimo jiné schopnost rychleji reagovat na změny požadované redukce průtoku vyšla lépe pro DMLS rezistory. Vyznačují se vyšší jemností regulace, díky které je možné eliminovat cyklování ventilů, které prodražuje celý proces nastavení ideálních podmínek celého okruhu.

- **Výrobní náklady** – vynaložené náklady pro výrobu rezistoru jsou u obou metod poměrně odlišné. To je dáno především množstvím operací vstupujících do procesu výroby. EDM metoda má výrazně vyšší množství vstupujících operací do procesu, což má za následek větší množství zařízení, které je nutné do procesu zapojit. To z pohledu nákladů činí z DMLS metody výrazně ekonomičtější řešení.
- **Dodací lhůty** – při nutnosti pružné reakce na zákaznické požadavky jsou opět poměrně odlišné. Stejně jako v případě nákladů je to dáno výrazně vyšším množstvím vstupujících operací do procesu výroby EDM metodou. Tím se nejen prodlužuje dodací doba, ale zvyšuje se i riziko vzniku vyššího množství chyb při procesu výroby. Výroba rezistoru DMLS metodou je o 3 pracovní týdny kratší.
- **Reakce na změnu výroby** – v případě EDM metody výroby se při inovaci procesu, například výrobě unikátních konfigurací plechů jedná o výrazně nákladnější a rovněž z časového hlediska náročnější řešení než využití standardních parametrů. Proces výroby rezistoru DMLS metodou při případné změně redukčních parametrů rezistoru prakticky neovlivňující kompletní proces výroby, stejně jako finální náklady a časovou dotaci.
- **Ekologické hledisko** – v dnešní době se na toto téma klade čím dál větší důraz a je důležité nejen z pohledu environmentálního. I zákazníci se orientují na minimalizaci odpadů v kompletním procesu. Z tohoto pohledu jednoznačně vyplývají lepší výsledky při užití DMLS metody výroby rezistorů, která vytváří až 8krát méně odpadu oproti EDM metodě. Navíc odpad v podobě prášků lze velice snadno, rychle a ekologicky recyklovat a znovu použít. Oproti tomu zbytky po pálení plechů při EDM metodě výroby se musí nově tavit jako přísady při výrobě nových slitin, což je energeticky velice náročné.

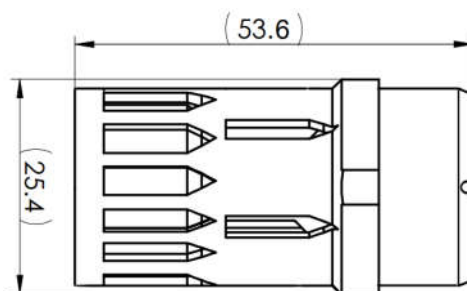
Tab. 10 Tabulka výsledků analýzy.

	EDM	DMLS
Obrobitelnost		✓
Mechanické vlastnosti	✓	✓
Chemické složení	✓	✓
Přesnost průřezů labyrintů	✓	
Průtokový koeficient a jeho shodnost	✓	
Regulace		✓
Výrobní náklady		✓
Dodací lhůty		✓
Reakce na změnu výroby		✓
Ekologie		✓

Aktuální návrh atmosférického rezistoru DMLS metodou ve velké míře vychází z původního EDM koncept výroby, především pak jeho návrhu. Přirozeně je tomu tak z důvodu snazší aplikovatelnosti nového přístupu na již existující a funkční způsob návrhu. Avšak při porovnání výrobních možností, a především omezení obou přístupů výroby toto řešení snižuje výhodu, jakou využití 3D tisku daných dílců skýtá. Níže bude rozebráno, jakým způsobem by bylo možné návrh kanálek vylepšit:

- Příčný průřez redukčních kanálek, který vychází z původního návrhu při výrobě EDM rezistorů je z pohledu 3D tisku nevhodný. Je tomu tak z důvodu příliš nízkého úhlu sklonu stropní části. Pokud by došlo k úpravě návrhu příčného průřezu do takových tvarů, které by bylo snazší metodou 3D tisku dosáhnout, docílilo by se tím zvýšení tvarové shodnosti s reálným průřezem. Například rovnostranný trojúhelníkový průřez, případně pětihran s horním vrcholovým úhlem $<90^\circ$, viz obr. 55. To by mělo pozitivní vliv na přesnost dosažených hodnot průtokového koeficientu v porovnání s návrhem. Díky této skutečnosti by došlo ke zvýšení shodnosti vyrobených dílců.
- EDM metoda rezistorů je omezena tvorbou kanálek prostorově orientovaných pouze ve dvou dimenzích na ploše elektroerozivně obráběných plechů. DMLS metoda výroby vnitřní struktury umožňuje vyhnout se tomuto omezení. Výsledkem pak mohou být návrhy kanálek, jejichž konfigurace nebude procházet rezistorem pouze v plochách tvořených dvěma souřadnicemi, ale libovolně pod jakýmkoli uskutečnitelným sklonem vhodnějším pro daný způsob regulace.

Výroba dílců redukčních ventilů pomocí 3D tisku DMLS metodou nemusí být konečnou fází využití této technologie. Další možnou částí ventilu vyráběnou 3D tiskem, což by mohlo vést ke zlepšení možností regulace průtoky by mohla být zátka škrťící průtok. Návrh by počítal jen s částí zátky, která je přímo v kontaktu s redukčními kanálky rezistoru. Zbylá část, kterou je táhla protažená až ven z těla ventilu, kde je spojena k hřídeli pohonu by byla vyrobena konvenčně. Část zátky vyhotovená 3D tiskem by obsahovala další redukční část tvořenou kanálky, viz obr. 61 podobně jako rezistor. Postupným překrýváním a otvíráním výstupních kanálek rezistoru, respektive vstupních kanálek v zátce, které by obsahovaly výstupní otvory na konci zátky. Bylo by tak docíleno ještě jemnější regulace průtoky média, což by výrazně snížilo cyklování ventilů a umožnilo přesnější úpravu podmínek média vstupujícího do chladicí části obtokového ventilu. Zároveň by se tímto řešením eliminovala nutnost výroby sedla, které má v aktuálně koncipovaném redukčním ventilu funkci uzavření po kompletním dosednutí zátky. Tím by bylo možné kompenzovat vícenáklady vzniklé při změně výrobní strategie zátky z konvenčně obráběné na 3D tisknutou část.



Obr. 55 Uvažovaný návrh zátky redukčního ventilu vyrobený 3D tiskem.

Oba výše zmíněné přístupy úpravy konfigurace kanálek, respektive doplňkové výroby další části redukčního ventilu 3D tiskem je nutné podrobně zanalyzovat. Výsledky by následně poukázali na přínos dané alternativy, případně opak. Úvaha nad možnými alternativními přístupy, jak využít 3D tisk kovů při výrobě komponent redukčních ventilů může sloužit jako podklad pro budoucí výzkum v dané problematice.

ZÁVĚR

Dle výsledků jednotlivých částí analýzy, která se zabírala vlivem výrobní technologie na dílčí aspekty procesu výroby a funkčnosti analyzovaného rezistoru, lze vyvozovat několik závěrů. Z úvodní teoretické části byla vybrána jako alternativa výroby atmosférického rezistoru metoda DMLS. Parametry dílců vyrobených touto metodou vykazují vlastnosti, které ji předurčují jako jedinou vhodnou alternativu.

Při návrhu dílce inovovanou metodou se vycházelo z původní koncepce. To mělo za následek snazší kontrolovatelnost dosažitelných procesních parametrů. Současně však koncepce musela být uzpůsobena parametrům limitující výrobu alternativní metodou.

Srovnání technologických hledisek obou přístupů výroby poukázalo na splnění požadovaných parametrů z pohledu chemického složení a mechanických vlastností. Ty vyšly v předepsaných intervalech. Co se možnosti ovlivnění finální obrobiteľnosti a mechanických vlastností týče, je možné tyto parametry modifikovat již při tvorbě polotovaru. Výroba DMLS metodou se však vyznačuje výrazně snazším a méně nákladným způsobem úpravy těchto vlastností.

Při porovnávání přesnosti vnitřní stavby rezistoru vyrobených DMLS byla zjištěna vysoká míra odchylek od požadovaného příčného průřezu kanálků v porovnání s návrhem. EDM metoda výroby se vyznačuje vysokou tvarovou podobností průřezů v porovnání s navrženými rozměry. Tyto skutečnosti mají jednoznačný vliv na až trojnásobně vyšší míru neshodnosti dílců vyrobených metodou DMLS, která byla zjištěna při kontrole předepsaného průtoku. Možnou alternativou je úprava navrženého průřezu, případně kompletní změna tvaru průřezu redukčních kanálků. Pro vyhodnocení, zda je vhodné zmíněný přístup aplikovat je třeba dalších analýz v dané problematice.

Při hodnocení procesních podmínek byl zjištěn výrazně vyšší rozsah regulovatelnosti průtoku v případě využití DMLS metody. Krom možnosti libovolné konfigurace kanálků a tím i redukčního koeficientu je DMLS metodou zajištěna i vyšší dosažitelná jemnost regulace. Díky tomu je pomocí rezistoru vyrobeného DMLS metodou možné rychleji reagovat na změnu provozních podmínek a vyhnout se tak přílišnému cyklování.

Výroba atmosférického rezistoru DMLS metodou přináší úsporu výrobních nákladů až o 56 %. Zároveň je možné zkrátit čas kompletní výroby, a to až o třetinu. Mimo tyto dvě skutečnosti lze při využití výroby DMLS metodou výrazně zkrátit proces vedoucí od návrhu po finální realizaci funkčního rezistoru s minimálními dodatečnými náklady.

Podíl vzniklého odpadu na výrobu jednoho dílce je při využití DMLS metody až 8x nižší než v případě výroby metodou EDM. To platí pro v případě odpadu, který je nutné přímo recyklovat v podobě dodatečného materiálu při tvorbě nových polotovarů. Většina zbylého materiálu použitého pro tisk a neovlivněného procesem spékání lze ihned, bez závažnějšího zásahu použít pro další výrobu.

Porovnání náchylnosti k erozi nebylo možné posoudit. Je tomu tak z důvodu absence rezistoru vyrobeného DMLS metodou, který by bylo nutné v důsledku opotřebení tímto jevem nahradit. Případná analýza eroze může být zahrnuta při dodatečném pokračování v daném tématu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. CCI DRAG® 100DSV for Spraywater Control Application. California, USA, 2003. Dostupné také z: <https://www.yumpu.com/en/document/read/6542565/cci-dragr-100dsv-for-spraywater-control-applications>
 2. PARTHAN, Veena. DESUPERHEATER | JE TO DŮLEŽITÉ KONCEPCE A 10 FAQ [online]. [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://cs.lambdageeks.com/desuperheater-its-important-concepts-and-10-faqs/#d14>
 3. LINDSLEY, David. *Power Plant Control and Instrumentation*. 1. Stevenage: Institution of Engineering & Technology, 1999. ISBN 9780852967652.
 4. *Fluid pressure reducing device*. USA. WO 00/57091 F16K 47/08. Uděleno 10.3.00. Zapsáno 28.9.00.
 5. DRAG® Control valves. 1. Birmingham, 2017. Dostupné také z: https://www.imi-critical.com/wp-content/uploads/2020/10/IMI_CCI_Product_DRAG-Control-Valves_AW_LRES.pdf
 6. ANSI B16.5 - Steel Pipe Flanges - Pressure and Temperature Ratings - Group 1.2. *Engineering ToolBox* [online]. 2003 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/ansi-flanges-pressure-temperature-d_342.html
 7. E.C., Jameson. *Electrical discharge machining*. 1. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, Machining Technology Association, 2001. ISBN 0-87263-521-X.
 8. I., Wright. EDM 101: Electrical Discharge Machining Basics. *Www.engineering.com* [online]. 2017, 15.12.2017 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/story/edm-101-electrical-discharge-machining-basics>
 9. ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook volume 6: Welding, Brazing and Soldering*. Materials Park, Ohio: American Society for Metals, 1993. ISBN 978-0-87170-382-8.
 10. NICROBRAZ® *Production information: Nicrobraz EXP1307 Brazing Alloy*. Pontarware, Swansea, 2013.
 11. MÍKA, Vladimír a Lubomír NEUŽIL. *Chemické inženýrství II*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. ISBN 80-7080-359-2
 12. DANIELSEN E., L. S. MOE, J.T. GRAVDAHL, O. ROULET-DUBONNET, L.T. GELLEIN a V. BROTON. Additive manufacturing by robot manipulator: An overview of the state-of-the-art and proof-of-concept results. In: 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. IEEE, 2017. ISBN 978-1-5090-6505-9.
 13. GROOVER, Mikell. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*. Hoboken: J. WILEY, 2010, 1012 s. ISBN 978-0470-467002.
 14. GIBSON, I., D. ROSEN a B. STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies*. 2010. ISBN 978-1-4419-1119-3
 15. MOŠNER, L. *VLASTNÍ 3D TISKÁRNA*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. M. Španěl, Ph.D.
 16. Technology overview metal Additive Manufacturing. AMPower [online]. Hamburg, c2020 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: https://am-power.de/tools/metal-additivemanufacturing/#av_section_2
 17. DASS, A. a A. MORIDI. State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design. *Coatings* [online]. Basilej: BASEL: MDPI, 2019, 9(7), 418 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: doi:10.3390/COATINGS9070418
-

-
18. YAN, Z., L. SONG, W. LIU, X. ZOU a Z. ZHOU. Numerical analysis of thermal stress evolution of pulsed-wave laser direct energy deposition. *International journal of advanced manufacturing technology* [online]. Londýn: Springer London, 2021, **115** (5-6), 1399-1410 [cit. 2022-04-22]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-021-07154-8
 19. LIU, Z-Q., P-I. ZHANG, S-W. LI, D. WU a Z-S. YU. Wire and arc additive manufacturing of 4043 Al alloy using a cold metal transfer method. *International journal of minerals, metallurgy and materials* [online]. Shanghai: School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, 2020, **27**(6), 789-71 [cit. 2022-05-07]. ISSN 1674-4799. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s12613-019-1930-6.pdf>
 20. DEREKAR, K.S. A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium. *Materials science and technology* [online]. 2018, **34**(8), 895-916 [cit. 2022-05-07]. ISSN 0267-0836. Dostupné z: doi:10.1080/02670836.2018.1455012
 21. ALALUSS, K. a P. MAYR. Additive Manufacturing of Complex Components through 3D Plasma Metal Deposition—A Simulative Approach. *Metals* [online]. Basel: MDPI, 2019, **9**(5), 574 [cit. 2022-05-07]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met9050574
 22. ALALUSS, K. a P. MAYR. Additive manufacturing of complex components through 3D plasma metal deposition—A simulative approach. *Metals* [online]. Basel: MDPI, 2019, **9**(5), 574 [cit. 2022-05-07]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met9050574
 23. MAYR, P. a K. HOEFER. Additive Manufacturing of Titanium Parts Using 3D Plasma Metal Deposition. *Materials Science Forum* [online]. 2018, **1**(1), 2137-2141 [cit. 2022-05-07]. ISSN 0255-5476. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.941.2137
 24. M3DP – WHEN 3D COMPONENTS GROW BEYOND THE POWDER BED!. *SBI* [online]. Ziersdorf: SBI, 2021 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://www.sbi.at/media/pages/products/plasma-additive-manufacturing/m3dp-industrial-line/401f9802a5-1616074582/2021-m3dp-am-systems_lowres.pdf
 25. MAHESHWARI, S., S. RATHEE, M. SRIVASTAVA a TK KUNDRA. *Additive Manufacturing: Fundamentals and Advancements* [online]. 1. England: CRC Press, 2019 [cit. 2022-04-22]. ISBN 9780367776541. Dostupné z: <https://www.taylorfranciscom.ezproxy.lib.vutbr.cz/books/mono/10.1201/9781351049382/additive-manufacturing-manu-srivastava-sandeep-rathee-sachin-maheshwari-kundra>
 26. AWAD, A., F. FINA, A. GOYANES, S. GAISFORD a W. A. BASIT. 3D printing: Principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering. *International journal of pharmaceutics* [online]. Elsevier B.V, 2020, **1**(586), 119594-119594 [cit. 2022-04-22]. ISSN 0378-5173. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijpharm.2020.119594
 27. AWARI, G. K, C. S THORAT, Vishwjeet AMBADE a D. P KOTHARI. *Additive Manufacturing and 3D Printing Technology*. Milton: Taylor & Francis Group, 2020. ISBN 9780367436223.
 28. GALATI, M. a P. MINETOLA. Analysis of Density, Roughness, and Accuracy of the Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) Process for Metal Parts. *Materials* [online]. BASEL: MDPI, 2019, **12**(24), 4122-4138 [cit. 2022-04-24]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma12244122
 29. BOUAZIZ, M. A., J. M. DJOUDA, J. KAUFFMANN a F. HILD. Microscale mechanical characterization of 17-4PH stainless steel fabricated by Atomic Diffusion
-

-
- Additive Manufacturing (ADAM). *Procedia Structural Integrity* [online]. Elsevier B.V, 2020, **28**(1),
30. BOUAZIZ, M.A., J.M. DJOUDA, M. CHEMKHI, M. RAMBAUDON, J. KAUFFMANN a F. HILD. Heat treatment effect on 17-4PH stainless steel manufactured by Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM). *Procedia CIRP* [online]. Elsevier B.V, 2021, **104**(1), 935-938 [cit. 2022-04-24]. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2021.11.157
 31. An Introduction to ADAM Metal 3D printing. *Additive-X* [online]. Ripon: Additive-X, 2019 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.additive-x.com/blog/an-introduction-to-adam-metal-3d-printing/>
 32. KRAKEN - Frézovací hlava nové generace. *BVV Veletrhy Brno* [online]. Brno: BVV, 2018 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.bvv.cz/msv/zlata-medaile-msv/2018/prihlasene-exponaty/05-kraken-specialni-frezovaci-hlava-velmi-lehke-ko/>
 33. Druckwege 3D printing. *DruckWege* [online]. Troisdorf: DruckWege, 2020 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://druckwege.de/en/home-en/technology/fused-deposition-modelling-fdm>
 34. Laser sintering ushers in new route to PM parts. *PM special feature* [online]. Elsevier B.V, 1997, **1997**(2), 30 [cit. 2022-03-06]. ISSN 0026-0657. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S002606579786910X>
 35. KHAING, M.W, J.Y.H FUH a L LU. Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts. *Journal of materials processing technology* [online]. Elsevier B.V, 2001, **113**(1), 269-272 [cit. 2022-02-28]. ISSN 0924-013
 36. Tips and Tricks for Metal 3D Printing: Recoaters. *Materialise* [online]. Materialise, 2017, 17.7.2017 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/blog/metal-3D-printing-recoaters>
 37. KRUTH, J.P., P. MERCELIS, J. VAN VAERENBERGH a T. CRAEGHS. *Feedback control of selective laser melting* [online]. Lirias: TAYLOR & FRANCIS, 2007 [cit. 2022-05-10]. ISBN 0415416027. ISSN 9780415416023. Dostupné z: https://limo.libis.be/primo-explore/fulldisplay?docid=LIRIAS66104&context=L&vid=Lirias&search_scope=Lirias&tab=default_tab&fromSitemap=1
 38. Lasery pro 3D tisk kovů. *Laserové a optické technologie pro průmysl a vědu* [online]. Praha: LASCAM, 2016 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/3d-tisk-prototyping/>
 39. LAVERNIA, E.J. a T.S. SRIVATSAN. The rapid solidification processing of materials: science, principles, technology, advances, and applications. *Journal of materials science* [online]. New York: Springer US, 2010, **2010**(45), 287-325 [cit. 2022-05-10]. ISSN 0022-2461. Dostupné z: doi:10.1007/s10853-009-3995-5
 40. KRUTH, J.P., L. FROYEN, J. VAN VAERENBERGH, P. MERCELIS, B. LAUWERS a M. ROMBOUTS. Selective laser melting of iron-based powder. *Journal of materials processing technology* [online]. Elsevier B.V, 2014, **204**(149), 616-622 [cit. 2022-05-10]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2003.11.051
 41. EOS. *EOS* [online]. Krailling, Mnichov: EOS, 2022 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en>
 42. ROZKOŠNÝ, L. Technologie DMLS - 3D tisk kovů. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Jaroměř: MM Průmyslové spektrum, 2017 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-dmls-3d-tisk-kovu>
 43. ČSN EN ISO 6892-1 (420310) Kovové materiály – Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. *Technor* [online]. Úřad pro technickou normalizaci,
-

- metrologii a státní zkušebnictví: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020, Červen 2020 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-6892-1-420310-202363.html>
44. MILAN, Dana, Zetkova IVANA, Hanzl PAVEL a Hronek ONDREJ. Accuracy of Holes created by 3D printing. In: *Annals of DAAAM & proceedings* [online]. DAAAM International Vienna, 2018, s. 0467 [cit. 2022-04-09]. ISSN 1726-9679. Dostupné z: doi: 10.2507/28th.daaam.proceedings.065
 45. JAIN, Neelesh Kumar a Kapil GUPTA. *Spark Erosion Machining*. 1. Boca Raton: CRC Press, 2020. ISBN 9780429464782.
 46. GOVINDARAJU, M., S. KAMARA a J. YOO. Effect of Heat Treatment on Mechanical/Metallurgical Properties of Direct Metal Laser Sintered 17-4 Precipitate Hardened Stainless Steel. *Advanced Materials Research* [online]. Scopus, 2013, 2013(699), 795-801 [cit. 2022-05-10]. ISSN 1022-6680. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.699.795
 47. MIKOVEC, M. *Obrábění materiálů s velkou pevností a tvrdostí*. 1. Praha: SNTL, 1982.
 48. PERVAIZ, S., A. RASHID, I. DEIAB a M. NICOLESCU. Influence of Tool Materials on Machinability of Titanium – and Nickel-Based Alloys: A Review. *Materials and Manufacturing Processes* [online]. Taylor & Francis Group, 2014, 3(29), 219-252 [cit. 2022-04-15]. ISSN 1042-6914. Dostupné z: doi:10.1080/10426914.2014.880460
 49. ABELE, E. a B. FROHLING. High speed milling of titanium alloy. *Advancs in Production Engineering & Management* [online]. 2008, 3(3), 131-140 [cit. 2022-04-15]. ISSN 1854-6250. Dostupné z: https://apem-journal.org/Archives/2008/APEM3-3_131-140.pdf
 50. Obrobitelnost – Bogner Edelstahl [online]. [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <http://www.bogner.cz/files/files/Obrobitelnost.pdf>
 51. JAFARIAN, F. Electro discharge machining of Inconel 718 alloy and process optimization. *Materials and manufacturing processes* [online]. Taylor & Francis, 2020, 35(1), 95-103 [cit. 2022-04-18]. ISSN 1042-6914. Dostupné z: doi:10.1080/10426914.2020.1711919
 52. LI, L., Z. Y. LI, X. T. WEI a X. CHENG. Machining Characteristics of Inconel 718 by Sinking-EDM and Wire-EDM. *Materials and manufacturing processes* [online]. Taylor & Francis, 2015, 2015(30), 968-973 [cit. 2022-04-18]. ISSN 1042-6914. Dostupné z: doi:10.1080/10426914.2014.973579
 53. DE OLIVEIRA, D., R. L. DE PAIVA, R. B. DA SILVA a P. H. DE CARVALHO CASTRO. Assessment of the grindability of Inconel 718 under different coolant delivery techniques. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, 42(1) [cit. 2022-04-17]. ISSN 1678-5878. Dostupné z: doi:10.1007/s40430-019-2093-0
 54. WEN, Y., Y-F. WANG, H. RAN, W. WEI, J-M. ZHANG a Ch-Y. HUANG. Improving the Mechanical and Tribological Properties of NiTi Alloys by Combining Cryo-Rolling and Post-Annealing. *Acta metallurgica sinica* [online]. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2021, 1.6.2021, 35(2), 317-325 [cit. 2022-05-01]. ISSN 1006-7191. Dostupné z: doi:10.1007/s40195-021-01253-x
 55. POLKOWSKI, W., E. PECZEK, D. ZASADA a Z. KOMOREK. Materials science & engineering. A, Structural materials : properties, microstructure and processing. *Materials science & engineering. A, Structural materials : properties, microstructure and processing* [online]. Lausanne: Elsevier B.V, 2018, 28. 10. 2015, 1(1), 170-183 [cit. 2022-05-01]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2015.08.083

-
56. NAGARAJAN, B., D. KUMAR, Z. FAN a S. CASTAGNE. Effect of deep cold rolling on mechanical properties and microstructure of nickel-based superalloys. *Materials science & engineering. A, Structural materials : properties, microstructure and processing* [online]. Lausanne: Elsevier B.V, 2018, **1**(1), 196-207 [cit. 2022-05-01]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2018.05.005
57. RAN, R., Y. WANG, Y-X. ZHANG, F. FANG, H-S. WANG, G. YUAN a G-D. WANG. Microstructure, precipitates and mechanical properties of Inconel 718 alloy produced by two-stage cold rolling method. *Materials science & engineering. A, Structural materials : properties, microstructure and processing*, [online]. Lausanne: Elsevier B.V, 2020, **1**(1), 793-799 [cit. 2022-05-01]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2020.139860
58. TAŞCIOĞLU, E., Y. KAYNAK, S. SHARIF, F. PITIR a M. A. SUHAIMI. Machining-induced surface integrity of Inconel 718 alloy fabricated by powder bed fusion additive manufacturing under various laser processing parameters. *Machining science and technology* [online]. Taylor & Francis, 2022, **26**(1), 49-71 [cit. 2022-04-18]. ISSN 1091-0344. Dostupné z: doi:10.1080/10910344.2021.1998107
59. VLIV LEGUJÍCÍCH PRVKŮ. *FABORY* [online]. Brno: Fabory CZ Holding, 2022 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: https://www.fabory.com/cs/knowledge_center/technical/steel/influence_of_alloying_elements
60. DAVIS, J.R. *ASM speciality handbook : Nickel, cobalt, and their alloys*. 1. Cleveland: Materials Park : ASM International, 2000. ISBN 978-0-87170-685-0.
61. KEREK, M. Návrh zařízení pro testování atmosférických rezistorů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Houška, Ph.D..
62. SCHMIDT, A. *Technical Thermodynamics for Engineers: Basics and Applications* [online]. 1. Springer, Cham: Cham: Springer International Publishin, 2019, s. 149-199 [cit. 2022-03-21]. ISBN 3030203964. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/book/10.1007/978-3-030-20397-9>
63. CHYBY PŘI NAVRHOVÁNÍ A INSTALACI POJISTNÝCH VENTILŮ V CHEMICKÉM PRŮMYSLU. *CHEMICKÝ PRŮMYSL*. Orlen Unipetrol RPA, Litvínov-Záluží, 2021, **2021**(4), 375-382.
64. EOS NickelAlloy IN718 Material Data Sheet. In: *EOS* [online]. Mnichov, Německo: EOS, 2020 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/nickelalloyinconel/material_datasheet_eos_nickelalloy_in718_m290_premium_en_web.pdf
65. SEHHAT, M.H, A.T SUTTON a CH. HUNG. Investigation of Mechanical Properties of Parts Fabricated with Gas- and Water-Atomized 304L Stainless Steel Powder in the Laser Powder Bed Fusion Process. *JOM* [online]. New York: Springer US, 2022, **2022**(3), 1088-1095 [cit. 2022-03-13]. ISSN 1047-4838. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s11837-021-05029-7>
66. CHANG, I. a Y. ZHAO. *Advances in Powder Metallurgy: Properties, Processing and Applications*. 1. Cambridge, England: Elsevier Science & Technology, 2013. ISBN 9780857094209.
67. HOSSEINI, E. a V.A. POPOVICH. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718. *Additive manufacturing* [online]. Elsevier B.V, 2019, **2019**(12), 1-18 [cit. 2022-03-22]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S221486041930226X>
-

-
68. YAGI, R. a T.H. OKABE. Recovery of Nickel from Nickel-Based Superalloy Scraps by Utilizing Molten Zinc. *Metallurgical and Materials Transactions B* [online]. New York: Springer US, 2016, 28.11.2016, 48(1), 335-345 [cit. 2022-04-25]. ISSN 1073-5615. Dostupné z: doi:10.1007/s11663-016-0854z
69. ROZKOŠNÝ, L. Jak funguje 3D tisk metodou Direct Metal Laser Sintering. *Konstruktér* [online]. Innomia, 2015, 1(1), 1 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/jak-funguje-3d-tisk-metodou-direct-metal-laser-sintering/>
70. DEBARBADILLO, J.J. Nickel-Base Superalloys; Physical Metallurgy of Recycling. *METALLURGICAL TRANSACTION* [online]. AMERICAN SOCIETY FOR METALS AND THE METALLURGICAL SOCIETY OF AIME, 1983, 1983(14), 329-341 [cit. 2022-05-14]. ISSN 0360-2133/83/0311-0329\$500.75/0. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF02644211.pdf>
71. DELACROIX, Timothée, Fernando LOMELLO, Frédéric SCHUSTER, Hicham MASKROT a Jean-Paul GARANDET. Influence of powder recycling on 316L stainless steel feedstocks and printed parts in laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*. 2022, 50, 102553. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102553>
72. AHMED, F., U. ALI, D. SARKER, E. MARZBANRAD a K. CHOI. Study of powder recycling and its effect on printed parts during laser powder-bed fusion of 17-4 PH stainless steel. *Journal of materials processing technology* [online]. Amsterdam: Elsevier B.V, 2019, 2020(4), 1-11 [cit. 2022-03-23]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013619304959>
73. ROCK, Christopher, Christopher LEDFORD, Matias GARCIA-AVILA, Harvey WEST, Victoria M MILLER, Mark PANKOW, Ryan DEHOFF a Tim HORN. The Influence of Powder Reuse on the Properties of Nickel Super Alloy ATI 718™ in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. *Metallurgical and materials transactions. B, Process metallurgy and materials processing science* [online]. New York: Springer US, 2021, 52(2), 676-688 [cit. 2022-03-25]. ISSN 1073-5615. Dostupné z: doi:10.1007/s11663-020-02040-2
74. Citace PRO [online]. 2015-2020 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
Ra	průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti	[mm]
C _v	průtokový koeficient	[-]
v _c	řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
f	posuv	[mm]
d ₀	počáteční průměr vzorku pro tahovou zkoušku	[mm]
L ₀	počáteční měřená délka vzorku pro tahovou zkoušku	[mm]
d _L	velikost závitu vzorku pro tahovou zkoušku	[mm]
h	délka závitu vzorku pro tahovou zkoušku	[mm]
L _c	celková délka měřené části vzorku pro tahovou zkoušku	[mm]
L _t	délka kompletního vzorku pro tahovou zkoušku	[mm]
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
R _m	mez kluzu	[MPa]
A ₂₅	tažnost	[%]
q	objemový průtok	[m ³ ·h ⁻¹]
ρ	měrná hmotnost kapaliny	[kg·m ³]
ΔP	změna tlaku (tlakový spád)	[psi]
S _{výp}	obsah výpalku	[mm ²]
D _{výp}	vnější průměr výpalku	[mm]
d _{výp}	vnitřní průměr výpalku	[mm]
S _{pl}	obsah plechu	[mm ²]
P _{EDM}	využitelnost plechu	[-]
S _{tisk}	obsah půdorysu rezistoru	[mm ²]
D _{tisk}	vnější průměr tištěného polotovaru	[mm]
d _{tisk}	vnitřní průměr tištěného polotovaru	[mm]
h _{tisk}	výška fixační podpory	[mm]
V _{pod}	objem fixační podpory	[mm ³]
v ₁	výška vrstvených vrstev při tisku rezistoru	[mm]
v ₂	šířka komory	[mm]
v ₃	hloubka komory	[mm]
V _{kom}	objem zaplněné komory při tisku rezistoru	[mm ³]
P _{DMLS}	využitelnost prášku	[-]

Zkratky

Označení	Legenda
EDM	elektroerozivní obrábění
PVD	fyzikální depozice par
CAD	počítačem podporované kreslení
STL	standardní tesselační jazyk
DED	spojování prášku laserovým paprskem
WAAM	tavení drátu elektrickým obloukem
MIT	kovový inertní plyn
CMT	přenos kovu za studena
TIG	wolframový inertní plyn
PMD	tavení drátu, nebo prášku plazmou
PBF	tavení v práškové loži

SLS	selektivní laserové spékání
DMLS	přímé selektivní laserové spékání
SLM	selektivní laserové tavení
EBM	tavení elektronovým svazkem
ADAM	fúzní spojování kovové struny
CFM	počítačová dynamika tekutin
PMI	rozbor materiálu spektrometrem
VBD	výměnná břitová destička
HRC	tvrdost dle Rockwella

SEZNAM PŘÍLOH

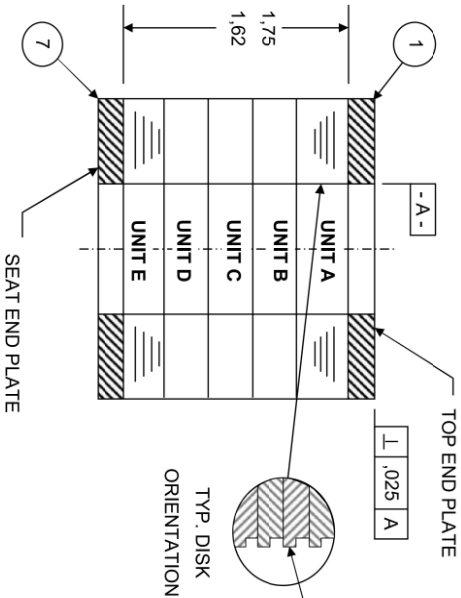
- Příloha 1 Výkres sestavení EDM atmosférického rezistoru
- Příloha 2 Protokol o pájení EDM atmosférického rezistoru
- Příloha 3 Protokol pro kontrolu EDM atmosférického rezistoru
- Příloha 4 Certifikát k příjemce DMLS atmosférického rezistoru

THIS DOCUMENT CONTAINS PROPRIETARY INFORMATION WITH ALL RIGHTS AND TITLES RESERVED AND MAY NOT BE REPRODUCED IN WHOLE OR IN PART WITHOUT WRITTEN CONSENT OF CONTROL COMPONENTS, INC.

Excel
Generated Dwg.

REVISIONS		DATE	APPVD
EO NO.	LTR		
-	A	1.4.2009	HUB
-	B	8.6.2009	HUB

DESCRIPTION RELEASED
ADD DETAIL "B" AT NOTE 4.



ITEM	PART NO.	QTY	I.D.	O.D.	THK.	DESCRIPTION	# O.D. PORTS	TOTAL SET PER UNIT	STACKING CALCULATIONS	
									COMPRESSED FLOW HEIGHT	ACTUAL QTY.
1	122286002	1	0.935	2.62	.50	END PLATE	----	----		
2	051887011	13	0.935	2.62	.062	DISK, 4-T	28	UNIT A / 3		
3	051886012	4	0.935	2.62	.062	DISK, 8-T	24	UNIT B		
4	021801033	4	0.935	2.62	.062	DISK, 12-T	32	UNIT C		
5	021801034	3	0.935	2.62	.062	DISK, 16-T	20	UNIT D		
6	021801035	3	0.935	2.62	.062	DISK, 20-T	12	UNIT E		
7	122286002	1	0.935	2.62	.88	END PLATE	----			
									TOTAL	TOTAL

TOTAL FLOW HEIGHT _____ + (.002 X TOTAL QTY _____) = CALCULATED FLOW HEIGHT

BRAZE ALLOY: _____
 TIME AT TEMP: _____
 AMOUNT OF DEAD WEIGHT: _____
 TYPE OF TOOLING: _____
 AS BRAZED HEIGHT: _____
 DISCREPANCIES: _____
 VERIFY CAD DISK GEOMETRY EXIST: _____

- NOTES:
1. BRAZE PER CCI 519.
 2. ALL DISK PASSAGES TO FACE SAME DIRECTION.
 3. TO OBTAIN THE FLOW HEIGHT, ADD OR SUBTRACT DISKS FROM THIS UNIT.
 4. MACHINE DISK STACK PER DWG 728700657 DETAIL 'B'.
 5. DISK PASSAGES TO BE STAGGERED.

DATE:		22591 AVENIDA EMPRESA
M.O.:		RANCHO SANTA MARGARITA, CA 92688 U.S.A.
S.N.:		
INSPECTOR:		
PREP	LEB	25.03.2009
CHK	TPF	25.03.2009
DSGN	OMU	25.03.2009
APPVD	HUB	25.03.2009
WO #	600007AT-01	

B/M DISK STACK
BRAZING (EDM) OPF
CHARA, PER GROOVE
 SIZE **B** DRAWING NUMBER **AT0025372**
 MATERIAL: INC 718 SHEET: 1 OF 1

INHALTSVERZEICHNIS Table of Contents		Nr. / no. 091/2022
		Seite / page 1 of 1
		Datum / date : 12.05.2022
Hersteller / manufacturer Metall- und Kunststoffwaren Erzeugungsgesellschaft m.b.H. Bahnhofstraße 31 A-3860 HEIDENREICHSTEIN	Bestellung Nummer /order number 5100420583	Bestelldatum / order date 08.03.2022
Besteller / customer CCI CZECH REPUBLIC S.R.O. K LETISTI 1804/3 CZ - 627 00 ŠLAPANICE	Empfänger / consignee CCI CZECH REPUBLIC S.R.O. K LETISTI 1804/3 CZ - 627 00 ŠLAPANICE	Projekt / Project A76163CZ - 1
DISK STACK / 728740244 Line Item-No.: 5.1		
<input checked="" type="checkbox"/> Certificate of compliance with the order <input checked="" type="checkbox"/> Material certificate EN 10204-3.1 <input checked="" type="checkbox"/> Hardness Test Report (NON NACE) <input checked="" type="checkbox"/> Temperature-diagram, Vacuum-diagram <input checked="" type="checkbox"/> Dimensional Control Report <input checked="" type="checkbox"/> QA outcoming inspection Checklist		

Art des Zertifikates / type of certificate WERKS BESCHEINIGUNG 2.1 Certificate of compliance with the order nach/acc. EN 10204		Nr. / no. 091/2022	
		Seite / page 1 of 1	
		Datum / date : 12.05.2022	
Hersteller / manufacturer Metall- und Kunststoffwaren Erzeugungsgesellschaft m.b.H. Bahnhofstraße 31 A-3860 HEIDENREICHSTEIN	Bestellung Nummer /order number 5100420583	Bestelldatum / order date 08.03.2022	
Besteller / customer CCI CZECH REPUBLIC S.R.O. K LETISTI 1804/3 CZ - 627 00 ŠLAPANICE	Empfänger / consignee CCI CZECH REPUBLIC S.R.O. K LETISTI 1804/3 CZ - 627 00 ŠLAPANICE	Projekt / Project A76163CZ - 1	
Pos. item	Stk. pcs	Artikel article	Kennz. marking
001	1	DISK STACK / 728740244 Material: INC718 Drawing-/Part-No.: Line Item-No.: MKE reference no.: Heat no. TOP END PLATE: Heat no. SEAT END PLATE: Personell identification: Heat treatment Charge-no.: Brazing powder:	728740244 5.1 V220308 Heat: 331278 Heat: 331278 MKE/CZG A-22-136 EXP 1307
Remarks: Without objections			
<p>Wir bestätigen hiermit, dass oben angeführte Bauteile den Vereinbarungen bei der Bestellannahme entsprechen.</p> <p><i>We hereby certify that the component described above complies the terms of the contract.</i></p>			
<p>MKE Metall- und Kunststoffwaren Erzeugungsges.m.b.H. A-3860 Heidenreichstein i.v. Tel. 0 28 62 / 52 3 21-0</p> <hr/> <p>Werkssachverständiger Factory expert</p>			



MAHER

Consignor (Exporter / Seller)

Maher Limited
 2 Brightside Way
 Sheffield
 South Yorkshire
 United Kingdom
 S9 2RQ
 Tel: +44 (0) 114 2909200
 VAT Reg: GB173362074

Fax: +44 (0) 114 2909290
 Website: www.maher.com

Date 28/08/2012	Batch No P002859	Customer Ref 1208229 / 313144
---------------------------	----------------------------	---

Consignee

Metall-Und Kunststoffwaren
 Erzeugungsgesellschaft M.B.H.
 Bahnhofstrasse 31
 Heidenreichstein
 Austria
 A-3860

Buyer (if other than consignee)

Metall-Und Kunststoffwaren
 Erzeugungsgesellschaft M.B.H.
 Bahnhofstrasse 31
 Heidenreichstein
 Austria
 A-3860

Reference	Job Ref: 004602-2-1	Cast Number	331278	Requirements
Part Number	Z-718-00000542	Incoming Cert.	100273	Supply 1 cut piece 1500 mm long of Alloy 718 Solution Annealed Aged Pickled 69.850mm Dia Bar Certified To EN10204:2004 Type 3.1
Cust Part Num				
Job Quantity	47.26	Weight (kg)	48.00	

Specification(s)

WN 2.4668 - 2010
 ASTM B637 UNS N07718 Chemistry Only - 2011

 ANSI/NACE MR0175/ISO 15156-3 - 2009(E)
 API6A PSL3 - 20th Edition
 Maher Z71800 - 14

CHEMICAL ANALYSIS

Al	.53	B	<.004	Bi	<.00003	C	.024	Ca	<.002
Co	.15	Cr	18.8	Cu	.03	Fe	18.44	Mg	<.005
Mn	.05	Mo	3.06	Nb + Ta	5.1	Ni	52.7	P	.006
Pb	.0002	S	.001	Se	<.0003	Si	.06	Ti	.98

HEAT TREATMENT

	Type	Temp C	Time mins	Cooling Method
Cycle 1	Solution Annealed	1032	120	Water Quench
Cycle 2	Aged	779	480	Air Cool

Temperature Monitoring Method Heatsink Thermocouple
 Heat Treatment Performed On Batch

TENSILE TEST

	Proof Stress MPa	UTS MPa	Elong %	ROA %
Test 1	943	1238	32	44

Orientation Longitudinal
 Gauge Length 4D
 Proof Stress Type 0.2% Proof Stress
 Test Piece Type Bar Prolongation
 Test Temperature : Room Temp
 Specification ASTM E8

IMPACT TEST

	1	2	3
Absorbed Energy J	101	103	102
Lat. Exp. mm	.89	.97	.92
% Shear	90	80	80

Orientation Longitudinal
 Test Temp. C -60
 Test Specification ASTM E23
 Absorbed Energy Charpy V-notch energy

Consignor (Exporter / Seller)

Maher Limited
 2 Brightside Way
 Sheffield
 South Yorkshire
 United Kingdom
 S9 2RQ
 Tel: +44 (0) 114 2909200
 VAT Reg: GB173362074

Fax: +44 (0) 114 2909290
 Website: www.maher.com



MAHER

Date 28/08/2012	Batch No P002859	Customer Ref 1208229 / 313144
---------------------------	----------------------------	---

HARDNESS TEST

	1	2	Method	Spec	Location	Tested On
1	38	40	Rockwell C	ASTM E18	Surface	Bar Prolongation

Ultrasonic Examination NDE 31 Rev AM
 Grain Size 4.0
 Forging Ratio 30.04
 Melt Practice VIM-ESR

DOCUMENTS

In accordance with NACE MR01-75
 Mill Cert

This certification has been computer generated
 and is valid without a signature.

The material hereby certified complies with the order requirements referenced above and has been controlled in accordance with our EN ISO 9001:2008 and AS9100 Rev C registration LRQ 0862013 with LRQA.

004602-2-1

ThyssenKrupp VDM

Page 1 of 2
printed: 08. MAR 2012



Inspection certificate 100273/0
DIN EN 10204/01.05 3.1
Order No. 392571 Delivery No. H00809 Purchase Order No.

P002859

MAHER LIMITED

2 Brightside Way
GB -S9 2RQ Sheffield

Trademark
NICROFER 5219 NB
2.4668

EN ISO 9001, AS 9100
LRQA Approval
KLN 4000941/E

Product
Bar, round, forged, solution ann. / age hardened, descaled

Specification

Maher Procedure QPP14 Rev. 3 with agreed exceptions
with exceptions as agreed of SOPT 4002 Rev.0, 4003 Rev.0 and SOPQ 9020 Rev.0
Schlumberger CMS.Z1 CSU.0 Rev. AP
Schlumberger CMS.Z1 CGU.0 Rev. BE
NACE MR0175 / ISO 15156 2009
API 6A718 Second Edition 12.2009

Material
UNS N07718

UNS N07718
UNS N07718
UNS N07718

MAHER LIMITED

04 APR 2012

CONFORMITY VERIFIED
BY: *[Signature]*

Item	Pcs	Wht [kg]	Dimension [mm]	Cast	Lot
2	12	1437	69,85 Ø x Rl.	331278	103606016

Analysis (weight %)

GFAAS=graphite furnace AAS
LE=combustion analysis
OE=optical emission analysis
RF=XRF

Maher Procedure QPP14 Rev. 3 with agreed exceptions; Schlumberger CMS.Z1 CSU.0 Rev. AP; Schlumberger CMS.Z1 CGU.0 Rev. BE; API 6A718 Second Edition 12.2009

Cast	Melting Pr.	C	S	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	Ti	Nb	Cu	Fe
331278	VIM/ESR	0,024	0,001	18,8	52,7	0,05	0,06	3,06	0,98	5,09	0,03	R18,44
	top Meth	LE	LE	RF	RF	RF	RF	RF	RF	RF	RF	

Cast	Melting Pr.	P	Al	Mg	Pb	Sn	Ca	Co	B	Ta	Se	Bi
331278	VIM/ESR	0,006	0,53	<0,0050	0,0002	0,0010	<0,0020	0,15	<0,0040	<0,01	<0,0003	<0,00003
	top Meth	RF	RF	OE	GFAAS	GFAAS	OE	RF	OE	RF	GFAAS	GFAAS

Sample Condition	Tensile Test	Grain Size
solution ann. / age hardened	1 ASTM E 8 / longitudinal specimen	1 ASTM E 112
Lot	Temp Yield0.2% Yield1.0% Tensile Elongation RoA	
Sample No.	[°C] [MPa] [MPa] [MPa] A [%] A [%] [%]	
103606016	1 RT 943 1238 4D 32 44	1 No 4.0

Sample Condition	Microstructure/Precipitations
solution ann. / age hardened	1 Maher Procedure QPP14 Rev. 3
Lot	
Sample No.	
103606016	1 Complying with delivery specification.

Item	Lot	Ultrasonic Examination: see enclosure
2	103606016	

Heat Treatment	Lot
1032°C/2h/water + 779°C/8h/air	103606016

We herewith certify, that the material is in conformance with the above mentioned specifications

T. Gymnich

Tel. +49 2392 552056
Fax +49 2392 552827
EMail thomas.gymnich@thyssenkrupp.com

Mark of the Inspector P

Q

Enclosures: 4

Thomas Gymnich, authorized inspection representative Date of release: 12.03.2012

* 100273 - O - E *

This certified test report shall not be reproduced except in full, without the written approval of ThyssenKrupp VDM. The recording of false, fictitious or fraudulent statements or entries on the certificate may be punished as a felony under federal law.

Address: ThyssenKrupp VDM GmbH, Kieffstraße 23, D-58762 Altena, Postbox 1251, D-58742 Altena
Telephone: 02392 55-0 Fax: 02392 55-2217 Internet: www.thyssenkrupp-vdm.com
Management Board: Dr. Jürgen Olbrich, Dipl.-Betriebsw. Ulrike Meiritz, Dr.-Ing. Franz-Josef Wahlers
Company domicile: Werdehof Commercial register:: Iserlohn local court, #5327



Inspection certificate 100273/0
DIN EN 10204/01.05 3.1

Order No. Delivery No. Purchase Order No.
392571 H00809

Spectrographic analytical mixup test: without objection
Dimensional and visual inspection performed: without objection
No mercury contamination; no Radium, Luminous or Alpha source materials were used in the manufacture or testing of the items furnished.

No weld repairs performed.

The material supplied are in accordance with the order referenced above and are covered by the Sources's Certificate of Conformity whilst having been subject to the Quality System. Requirements in accordance with Lloyd's Registration to BS 5750 part 5/ISO 9001/EN 29002.

Samples for tensile testing are standard ASTM specimens with 12.5 mm diameter taken from a prolongation of the bars.

Samples for notched-bar impact testing are standard ASTM specimens with 10 mm x 10 mm taken from a prolongation of the bars.

MACROETCHING: conducted as per ASTM A 604, etchant 'Aqua Regia', sample taken from top and bottom of ingot after hot forming.

Rating: better or equal class A, in all 4 classes.

No topological duplex-microstructure acc. to ASTM E 1181, representative microstructure is free of Laves phases and continuous grain boundary secondary phases. Assessment of Delta phase in the representative microstructures conform to the specification, with no acicular delta phase present, other than individual, isolated grains that are not representative of the bulk of the microstructure.

All tests have been carried out by ThyssenKrupp VDM.

SAMPLE LOCATION:

all samples for technological test were taken from $\frac{1}{4}$ T for $>\varnothing$ 50 mm;

all samples for technological test were taken from $\frac{1}{2}$ T for $<=\varnothing$ 50 mm.

The pyrometry of heat treatment is in accordance with AMS 2750.

Hot Forming: Reduction ratio: 30,04:1

amount of deformation: \geq 4:1

Temperature controlled / monitored by heat sink.

Surface roughness Ra: 1,60 μ m

Hot forming process by v. Schaeuwen / Ossenberg / DEW

Test method specification: latest revision

No thermal or mechanical processing has been performed after mill certification



Enclosure 1 for Inspection certificate 100273/0
 DIN EN 10204/01.05 3.1
 Order No. Delivery No. Purchase Order No.
 392571 H00809

Hardness Test

solution ann. / age hardened		ASTM E 18 Schlumberger CMS.Z1 CSU.0 Rev. AP				
Lot	Sample No.	Location	Method	Values		
103606016	1-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	38
103606016	2-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	39	39
103606016	3-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	38	38
103606016	4-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	39	39
103606016	5-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	40	38
103606016	6-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	39	38
103606016	7-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	38	38
103606016	8-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	39	40
103606016	9-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	39	39
103606016	10-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	38	40
103606016	11-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	38	39	38
103606016	12-A1	Surf.: 0° 120° 240°	HRC	39	38	38

solution ann. / age hardened		ASTM E 18 Schlumberger CMS.Z1 CSU.0 Rev. AP				
Lot	Sample No.	Location	Method	Values		
103606016	1-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	36	37	37
103606016	2-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	36	37	37
103606016	3-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	36	37	36
103606016	4-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	37	37	37
103606016	5-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	37	36	37
103606016	6-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	36	37	36
103606016	7-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	37	37
103606016	8-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	37	36	36
103606016	9-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	36	37	37
103606016	10-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	38	37	38
103606016	11-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	36	37	37
103606016	12-A1	R / 2 : 0° 120° 240°	HRC	37	37	36

solution ann. / age hardened		ASTM E 18 Maher Procedure QPP14 Rev. 3				
Lot	Sample No.	Location	Method	Values		
103606016	1-A1	edge r/2 center	HRC	40	40	39

solution ann. / age hardened		ASTM E 18 Maher Procedure QPP14 Rev. 3				
Lot	Sample No.	Location	Method	Values		
103606016	1-A1	surface	HRC	40	38	38
103606016	1-A1	surface	HRC	38	39	39

Adress: ThyssenKrupp VDM GmbH, KleffstraÙe 23, D-58762 Altena, Postbox 1251, D-58742 Altena
 Telephone: 02392 55-0 Fax: 02392 55-2217 Internet: www.thyssenkrupp-vdm.com
 Management Board: Dr. Jürgen Olbrich, Dipl.-Betriebsw. Ulrike Meintz, Dr.-Ing. Franz-Josef Walthers
 Company domicile: Werdohl Commercial register: Iserlohn local court, #5327



Enclosure 1 for Inspection certificate 100273/0
 DIN EN 10204/01.05 3.1
 Order No. Delivery No. Purchase Order No.
 392571 H00809

Notched Bar Impact Test

solution ann. / age hardened

ASTM E 23Charpy-V sample / longitudinal
 Maher Procedure QPP14 Rev. 3

Lot	Sample No.	Temp. [°C]	KV [J]			aK [J/cm ²]	Lateral Expansion [mm]			Shear Fracture [%]		
103606016	1-A1	-60	101	103	102		,89	,97	,92	90	80	80

Adress: ThyssenKrupp VDM GmbH, Kleffstraße 23, D-58762 Altena, Postbox 1251, D-58742 Altena
 Telephone: 02392 55-0 Fax: 02392 55-2217 Internet: www.thyssenkrupp-vdm.com
 Management Board: Dr. Jürgen Olbrich, Dipl.-Betriebsw. Ulrike Meinitz, Dr.-Ing. Franz-Josef Wahlers
 Company domicile: Werdohl Commercial register: Iserlohn local court, #6327



Enclosure 2

Ultraschallprüfbericht
Ultrasonic Examination Report
Rapport de contrôle U.S.

Besteller Purchaser / Client / No. Cde	Bestell-Nr. P.O. No. / No. Commande	Auftrags-Nr. Order No./No. cde	Zeugnis-Nr. Certificate No	Datum Date	Seite Page	von of
Maier Ltd		392571	100273	09.03.12	1	1

Lieferform Product / Produit	bar
Werkstoff Material / Nuance	Nicrofer 6219 Nb
Wärmebehandlung Heat Treatment / Traitement thermique	sol. ann. + age hardened
Oberfläche Surface Condition / Aspect surface	descaled
Prüfspezifikation Test Specification	NDE 31 Rev. AM
Prüfgerät Test Apparatus / Appareil	Karl Deusch Echograph 1080
Ankopplungsmittel Couplant / Agent Couplant	water
Prüftechnik Inspection Technique / Technique	1 straight beam in radial direction 2 shear wave in two directions circumferential
Prüfkopftyp/Freq./Abm. Type of Probe/Freq./Dim. / Palpeur /Freq.	1 Krautkrämer SEB 2 HO ^o -E/2 MHz/7x18 mm 2 Krautkrämer WB 45 N 2/2 MHz/
Prüfumfang Scanning /% Controle	100% on all surfaces
Kalibrierung Calibration / Calibrage de la sensibilité	recording sensitivity eq. 50% of 3,2 mm FBH
Methode Method:	Test block
Prüfergebnis Test Result / Resultat	No recordable or rejectable indications, the material is in compliance with the test specification

Geprüfte Menge / Quantity Inspected

Auftr.-Pos. Order Item	Menge Quantity	Abmessung [mm] Dimension	Charge Nr. Heat No. Coulée	Los-Nr. Lot No.	Probe-Nr. Sample No. No. d'essai
02	12	69,85 mm Ø x RL	331278	103606016	

Prüfer
Inspector / Vérificateur

Prüfaufsicht
Supervisor

Abnahmegesellschaft
Inspecting Authority

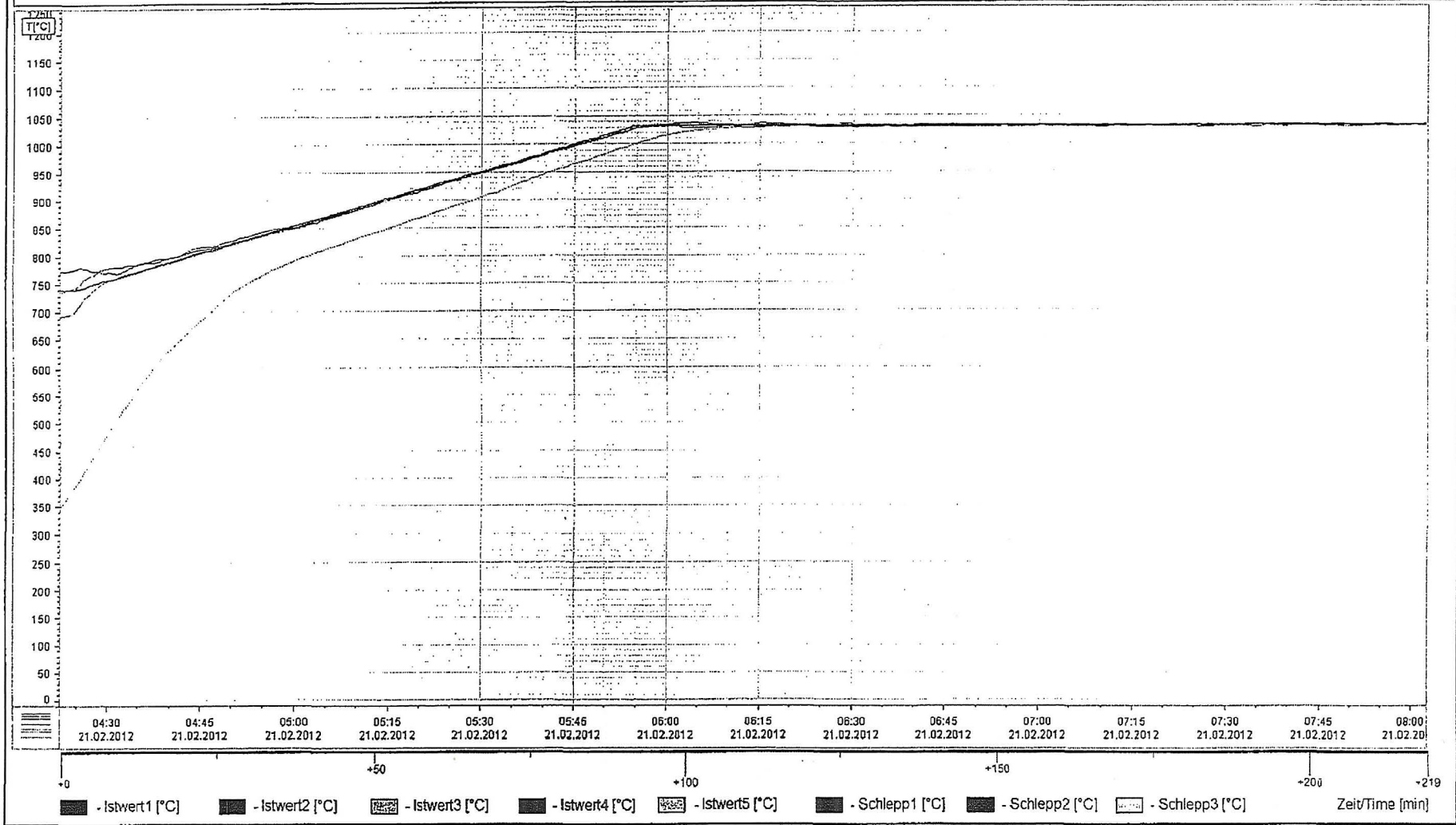
Plaza-Wacker, Level 2

Adresse: ThyssenKrupp VDM GmbH, Kleffstrasse 23, 58762 Altena, Postfach 12 51, 58742 Altena
Telefon: 02392 55-0 Telefax: 02392 55-2217 Internet: www.thyssenkrupp-vdm.com

Vorsitzender des Aufsichtsrates: Clemens Iller

Geschäftsführung: Dr. Jürgen Olbrich, Vorsitzender; Dipl.-Betriebsw. Ulrike Meiritz, Dr.-Ing. Franz-Josef Wahlers
Sitz der Gesellschaft: Werdohl Registergericht: Amtsgericht Iserlohn HR B 5327

Anlage/Furnace: 5531	Start/Start time: 21/2/2012 4:22:32	Prozesszeit/Process period: 03 h 39
Glühlos/Heat treatment lot: 303607	Ende/End time: 21/2/2012 8:2:26	Bediener: Schon
Start Haltezeit/Start holding time: 21/02/2012 06:02		Ende Haltezeit/End holding time: 21/02/2012 08:02
Haltezeit/Time at temperature: 02 h 00		



Herdwagenofen 3

Druckzeitpunkt: 21.02.2012 08:03:56

Seite: 1 / 1

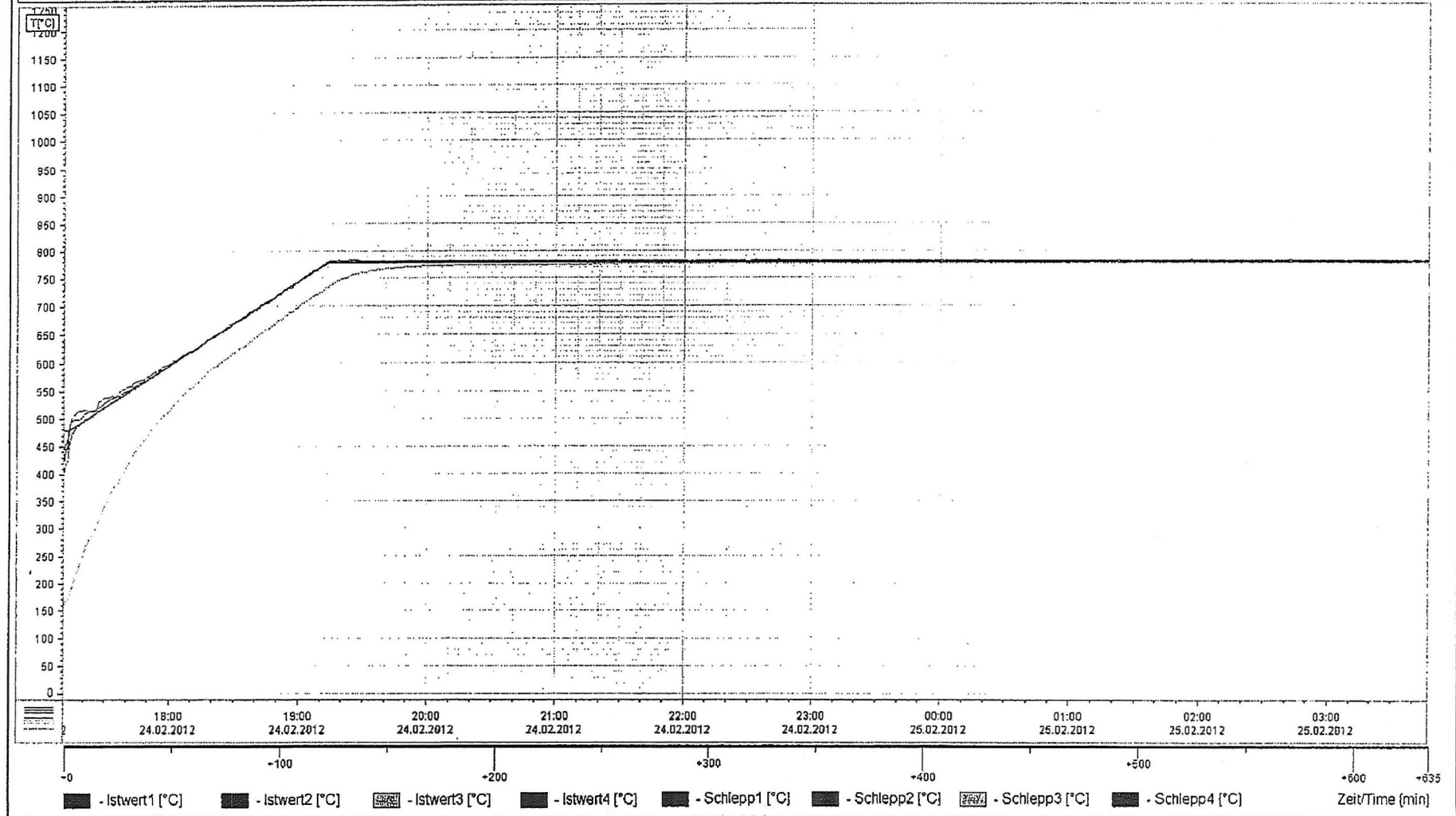
Anlage/Furnace: 5580
 Glühlos/Heat treatment lot: 403204

Start/Start time: 24/2/2012 17:11:14
 Ende/End time: 25/2/2012 3:46:51

Prozesszeit/Process period: 10 h 35
 Bediener: Remisch



Start Haltezeit/Start holding time: 24/02/2012 19:46 Ende Haltezeit/End holding time: 25/02/2012 03:46 Haltezeit/Time at temperature: 08 h 00



Herdwagenofen 4

Druckzeitpunkt: 25.02.2012 03:48:24

Seite: 1 / 1



Microstructure Examination

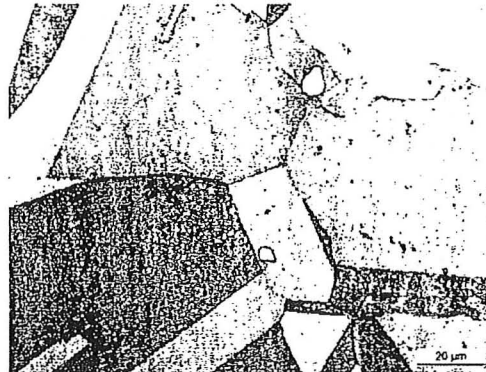
Metallography Job No.: 113233
Lot No.: 103606016
Heat: 331278

Inspection Certificate No.: 100273

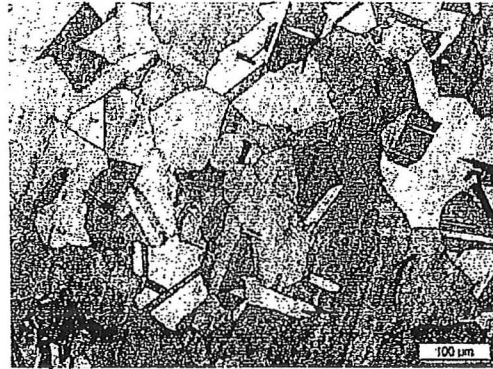
Enclosure: 4
Page: 1 of 1



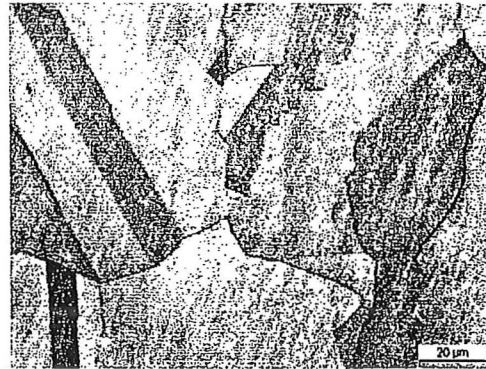
100:1
1A1 surface
Nicrofer 5219 Nb So
Kallings No.2



500:1
1A1 surface
Nicrofer 5219 Nb So
Kallings No.2



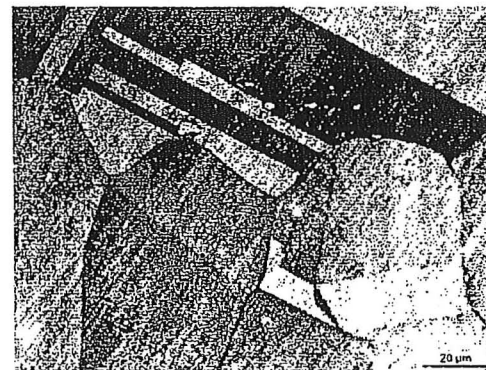
100:1
1A1 1/4 thickness
Nicrofer 5219 Nb So
Kallings No.2



500:1
1A1 1/4 thickness
Nicrofer 5219 Nb So
Kallings No.2



100:1
1A1 center
Nicrofer 5219 Nb So
Kallings No.2



500:1
1A1 center
Nicrofer 5219 Nb So
Kallings No.2

Adress: ThyssenKrupp VDM GmbH, Kleifstrasse 23, D-58762 Altena, P.O. Box 12 51, D-58742 Altena
Telephone: +49 2392 55-0 Fax: +49 2392 55-2217 Internet: www.thyssenkrupp-vdm.com
Chairman of the Supervisory Board: Clemens Iller
Management Board: Dr. Jürgen Olbrich, Chairman; Dipl.-Betriebsw. Ulrike Meiritz, Dr.-Ing. Franz-Josef Wahlers
Company domicile: Werdohl Commercial register: Iserlohn local court, # 5327



REPORT OF HARDNESS TEST

Metal- und Kunststoffwaren-
erzeugungsges.m.b.H.
Bahnhofstraße 31
A 3860 Heidenreichstein
Tel.: +43(0) 2862/52321-0*
Telefax: +43(0) 2862/53141

Manufacturing No. / Project:

5100420583 A76163CZ - 1

Examination Record No.:

MKE V220308 728740244

TEST RESULTS

Part / Drawing No.	Item	Material	Test	HRC	Average Hardness
DISK STACK 728740244	TOP END PLATE	INC718	1	41,8	41,7
			2	41,9	
			3	41,4	
	SEAT END PLATE		1	42,2	42,4
			2	42,5	
			3	42,4	

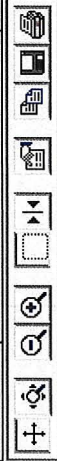
Result: Satisfactory

Remarks: acceptance criteria: 35-45HRC

Apparatus: Orion D 500
Examination Place: MKE
Heidenreichstein

Tester: BREINHÖLDER Harald
Date: 04.05.2022

Chargen-Daten		Programm-Daten			Bediener	
Nr.	Chargen Nr.:	Start	Ende	Nr.	Name	Kommentar
4589	A-22-136	4/23/2022 8:31:49 AM	4/25/2022 8:56:18 AM	14		sa

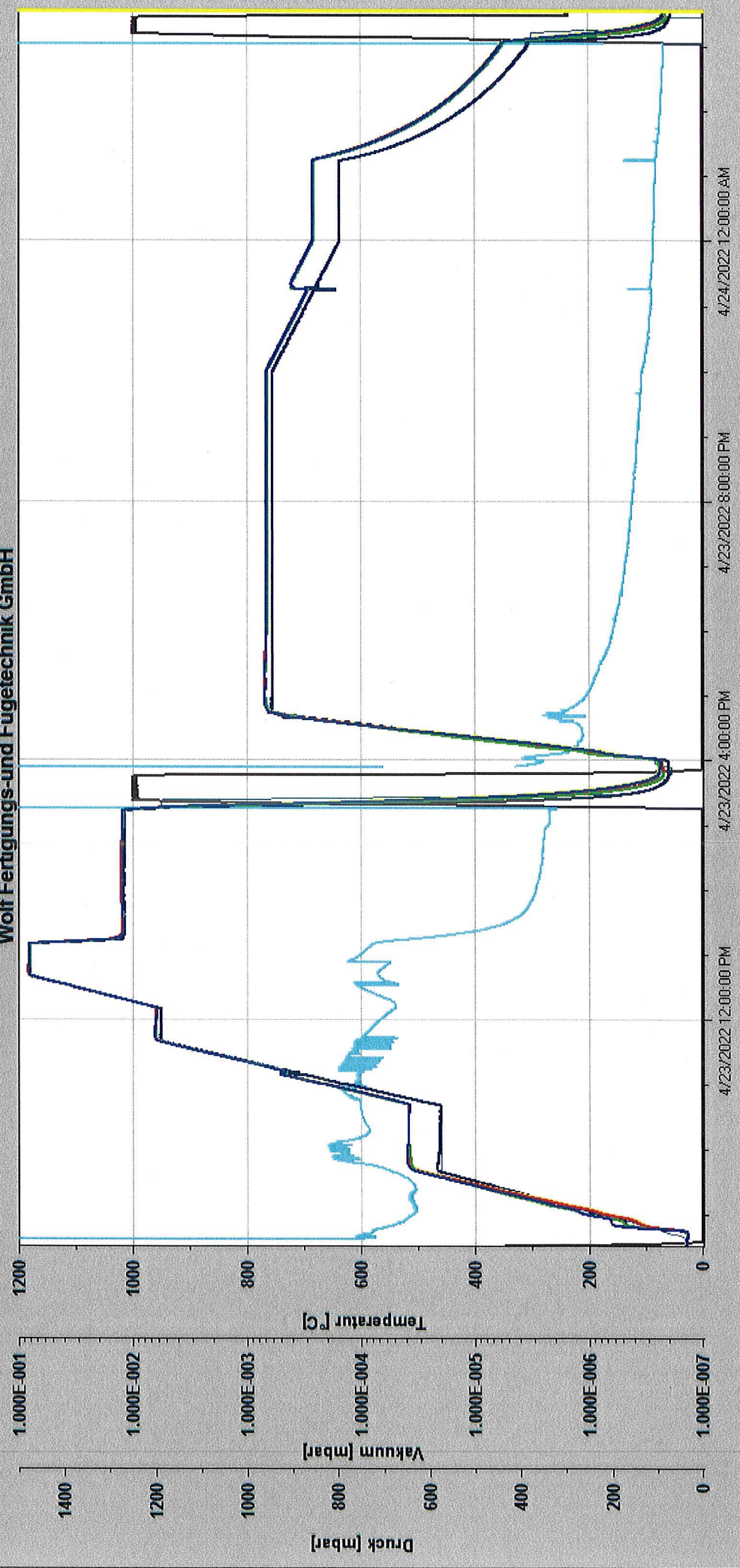


- F01_AV_TC_4_20_1
- F01_AV_TC_4_20_2
- F01_AV_TC_4_20_3
- F01_AV_TC_4_20_4

- F01_CZ4-1_HEATER_AV 68
- F01_PIS6-25-1_HV 67
- F01_PRESS_ABS_HMI 63
- F01_CZ4-1_HEATER_SP 71

- Temperatur [°C] 4/24/2022 3:33:30 AM 57
- Vakuum [mbar] 4/24/2022 3:33:30 AM 0.000E+000
- Druck [mbar] 4/24/2022 3:33:30 AM 298
- Temperatur [°C] 4/24/2022 3:33:30 AM 0

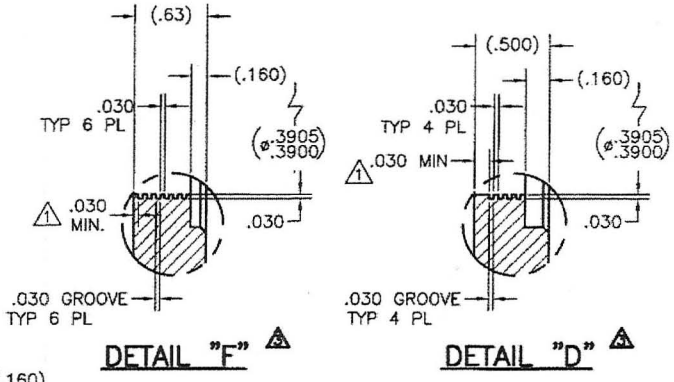
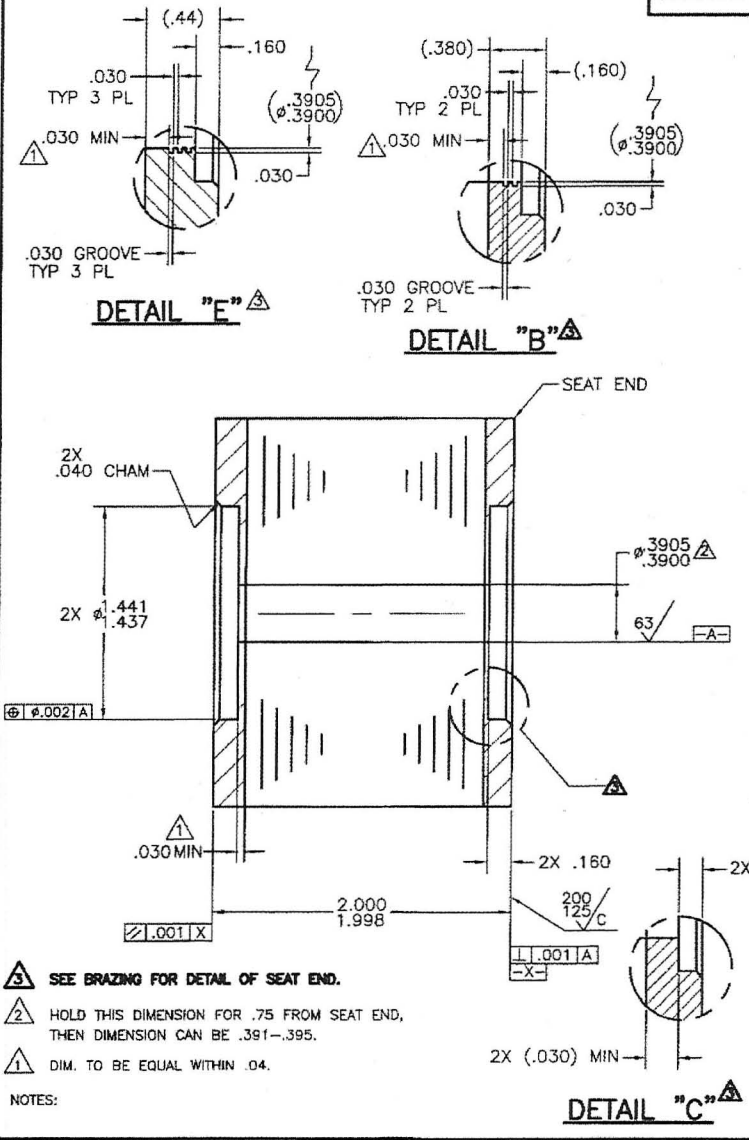
Wolf Fertigungs- und Fügetechnik GmbH



THIS DOCUMENT CONTAINS PROPRIETARY INFORMATION WITH ALL RIGHTS AND TITLES RESERVED AND MAY NOT BE REPRODUCED IN WHOLE OR PART WITHOUT WRITTEN CONSENT OF CONTROL COMPONENTS INC.

ACAD
Generated Dwg.

E.O. NO.		LTR.	REVISIONS	DATE	APPROVED
19982	-	-	RELEASED	9/30/96	E.CHAU
21923	A	-	ADDED DETAIL "C", & NOTE 3	3/12/97	SGF
2001001300	B	-	REDRAWN ON "C" SIZE, ADDED DETAIL "B"	23AUG01	KC
2002000246	C	-	ADDED DETAIL "E"	26FEB02	SC
2005000251	D	-	ADDED DETAIL "F"	17 FEB 05	TS



- 3 SEE BRAZING FOR DETAIL OF SEAT END.
- 2 HOLD THIS DIMENSION FOR .75 FROM SEAT END, THEN DIMENSION CAN BE .391-.395.
- 1 DIM. TO BE EQUAL WITHIN .04.

NOTES:

DO NOT SCALE DRAWINGS MUST CONFORM TO ES 100		Control Components Inc. <small>an IMI value company</small>	
GEOMETRIC SYMBOLS PER ANSI Y14.5		DISK STACK ASSY EDM	
MACHINED SURFACES 125 — PER ANSI B46.1		.375" PLUG, 1.5" STK	
WELDING SYMBOLS PER ANSI Y32.3 OR ASW A2.0		DRAWING NUMBER 728700244	
ABBREVIATIONS PER MIL-STD-12		SIZE C	
PREP R.GRANT	9/18/96	UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	PLOT SCALE 2:1
CHK S.CHIZHIK	9/27/98	DIMENSIONS ARE IN INCHES	
OSGN R.GRANT	9/27/96	TOLERANCES ANGLE ± 2 DEG.	SHEET 1 OF 1
APVD E.CHAU	9/28/98	(.0)±.1 (.00)±.03 (.000)±.010	
MATERIALS		SEE BOM	

Qualitätsmanagement / quality management
Messprotokoll / Fertigung / measurement / production

Teil / Bezeichnung part / description	DISK STACK FERTIGBEARBEITUNG	Kunde customer	CCI - CZ	Auftragsnummer order number
Zeichnungs Nr. drawing number	728740244 / 728700244 DETAIL "D"	Änderungsnummer change number		V220308
Bestellung Nr. Purchase Order No.	5100420583 / Line 5.1	Projekt Nr. Project Id.	A76163CZ - 1	

Maß Nr.	Prüfmerkmal test feature	laufende Teilnummer / Istmaße Angaben in mm / Prüfmittel				serial number / actual size information in mm / measuring device			
1	\varnothing 36,60 \varnothing 36,49	\varnothing 36,54							
2	Ra 5,08-3,17	Ra 3,88							
3	\varnothing 9,918 \varnothing 9,906	\varnothing 9,914							
4	50,80 50,74	50,78							
5	\varnothing 36,60 \varnothing 36,49	\varnothing 36,56							
6	Ra 1,6	1,0							
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									

Datum / date	9.5.2022 10.05.22
Prüfer / checked by	Lise Bruberg REM



QA outcoming inspection Checklist

Project number/PO number:
A76163CZ – 1 / 5100420583 / Line 5.1

Drawing number:
728740244

	OK	NOK
1. Dimensional control (all dimensions must be checked)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Disk stack isn't scratched - no scratches are allowed	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Ribs aren't bended / hitted	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Whole disk stack is clean from welding paste (ribs especially)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Disk stack is free from metal splinter	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. The threads' function is OK and have been checked with caliber	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. The threads' dimensions agrees with the drawing	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. Every single disk stack is marked by heat number	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Name of controller:	Date:	Signature of controller:
<i>Breinhölder</i>	<i>12.05.2022</i>	<i>Breinhölder</i>

No. of document:	Revision:	Integrated Management System	
CZ-FO-32.0	1		

DISK STACK - Protokol pro kontrolu Disk Stacku po procesu pájení

Číslo průvodky: _____


Číslo pájecího výkresu: _____

Popis	Hodnota	OK
Kontrola poklepem (OK/NOK)	-	<input type="checkbox"/>
Kontrola spájených spojů (OK/NOK)	-	<input type="checkbox"/>
Kontrola prosvícením (OK/NOK)	-	<input type="checkbox"/>
Kontrola kolmosti (OK/NOK)	-	<input type="checkbox"/>
Počet disků (číslo + OK/NOK)		<input type="checkbox"/>
Kontrola průchodnosti kanálků (OK/NOK)	-	<input type="checkbox"/>
Kontrola výšky disků (Rozměr + OK/NOK)		<input type="checkbox"/>
Kontrola obkročnosti kanálků (OK/NOK)	-	<input type="checkbox"/>
Kontrola OD portů (OK/NOK)	-	<input type="checkbox"/>

Poznámky:

Kontrolor: _____

Datum: _____

	Author/ Autor: J. Oprchal	Approver/ Schvalovatel: J. Šindelka	Released/ Uvolnil: Boris Svoboda	Date/ Datum: 12.01.2015	Page/ Strana: 1 of 1
---	-------------------------------------	---	--	-----------------------------------	--------------------------------



Inspection Certificate

EOS NickelAlloy IN718

Inspection certificate according to EN 10204, type 3.1

Trade name	EOS NickelAlloy IN718	Manufacturing method	Gas atomized
EOS product no.	9011-0020	Date of manufacturing	08.09.2021
Lot number	K 332101		
Manufacturer	Electro Optical Systems Finland Oy Lemminkäisenkatu 36 FI-20520 Turku Finland Tel.: +358 (0)20 765 91 40 Quality_Control_FINLAND@eos.info	Supplier	EOS GmbH Electro Optical Systems Robert-Stirling-Ring 1 D-82152 Krailling Germany Tel.: +49 89 893 36 0

Declaration of conformance

As part of EOS quality assurance, the powder lot has been analyzed for powder properties and has been tested to work in EOS M machine. Parts built with this lot have been tested against EOS criteria and standard requirements.

Powder lot conforms to EOS requirements for powder, machine behavior, and solid part properties. The chemical composition of powder and mechanical properties are in accordance with standard SAE AMS 5662 (except Se).

Date: 08.09.2021

Approved by:

Harri Pohtola

Quality Engineer

Electro Optical Systems Finland Oy

Inspection Certificate

Analyses of Powder (see page 4 for analysis details)

Sampling and Analysis Sample Preparation

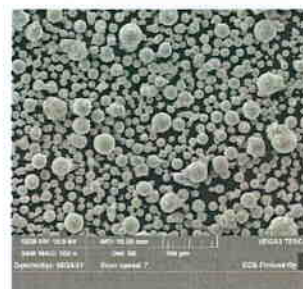
Sampling of the quality assurance test batch and analysis sample preparation done according to ASTM B215.

Cleanliness of Powder

Powder is visually free from foreign materials and uniform in condition.

Morphology

Powder is predominantly spherical with low levels of deformed particles.



Scalebar length 100 μm

Particle Size Distribution Analysis

Test Method	Size characteristics	Limits	Result	✓/✗	Test Method	Size characteristics	Result
Laser diffraction	d10 [μm]	14 – 26	16	✓	Dynamic image analysis <small>X_{Cmin}</small>	x10 [μm]	16
	d50 [μm]	28 – 38	33	✓		x50 [μm]	31
	d90 [μm]	43 – 63	57	✓		x90 [μm]	49

Sieve Analysis

Fraction retained	Test Method	Limits	Result	✓/✗
> 63 μm [wt%]	Laboratory sieving	Max. 0.3	0.0	✓
> 75 μm [wt%]	Laboratory sieving	Max. 0.1	0.0	✓

Powder Density Analysis

Property	Test Method	Limits	Result	✓/✗
Apparent density [g/cm^3]	ASTM B417	3.50 – 4.80	4.01	✓
Skeletal density [g/cm^3]	Inert gas displacement	N/A	8.200	N/A

Powder Water Content Analysis

Property	Test Method	Limits	Result	✓/✗
Water content [ppm]	Coulometric KF titration	Max. 125	38	✓

Chemistry Analysis (External ISO 17025 accredited laboratory)

Element	Test Method	Limits [wt.%]	Result	✓/✗	Element	Test Method	Limits [wt.%]	Result	✓/✗
Fe	ICP-OES	Balance	Bal.	✓	Ta	ICP-OES	Max. 0.05	<0.01	✓
Ni	ICP-OES	50.00 - 55.00	53.67	✓	P	ICP-OES	Max. 150 ppm	<10	✓
Cr	ICP-OES	17.00 - 21.00	19.11	✓	S	Combustion	Max. 150 ppm	33	✓
Nb	ICP-OES	4.75 - 5.50	5.02	✓	B	ICP-OES	Max. 60 ppm	13	✓
Mo	ICP-OES	2.80 - 3.30	3.11	✓	Se	AA-Graphite*	Max. 20 ppm	<1	✓
Ti	ICP-OES	0.65 - 1.15	1.00	✓	Pb	AA-Graphite*	Max. 5 ppm	<1	✓
Al	ICP-OES	0.20 - 0.80	0.51	✓	Bi	AA-Graphite*	Max. 0.3 ppm	<0.1	✓
Mn	ICP-OES	Max. 0.35	0.02	✓	H	Fusion	N/A	6 ppm	N/A
Si	ICP-OES	Max. 0.35	0.02	✓	Ag	AA-Graphite*	N/A	<1 ppm	N/A
Co	ICP-OES	Max. 0.24	0.01	✓	N	Fusion	N/A	0.011	N/A
Cu	ICP-OES	Max. 0.24	0.01	✓	O	Fusion	N/A	0.018	N/A
C	Combustion	Max. 0.08	0.04	✓					

*or ICP-OES

Inspection Certificate

Analyses of Solid Part Properties (see page 4 for analysis details)

Following properties for this lot have been determined on additively manufactured solid parts using following system setup:

EOS M Machine: EOS M 290 400W
EOS Parameter Set: IN718_040_PerformanceM291_2.11
Post Processing: Heat treatment per AMS2774D, ASM5662
Stage 1: Solution anneal; 954 °C 1 hour, rapid cooling
Stage 2: Two step ageing; 718 °C 8 hours, cool down to 621 °C in 2 hours, hold 621 °C 8 hours

Density

Density	Method	Limit	Result	✓/✗
Solid density [g/cm ³]	ISO 3369	Min. 8.15	8.22	✓

Mechanical Properties (External ISO 17025 accredited laboratory)

Property	Test Method	Limit	Result	✓/✗
Yield strength, Rp0.2 [MPa]	ISO 6892-1 B10	Min. 1034	1169	✓
Tensile strength, Rm [MPa]		Min. 1276	1367	✓
Elongation, A [%]		Min. 12	16	✓

Inspection Certificate

You've got a question(s) or request(s) on the content of this document?

Don't hesitate to email us at Quality_Control_FINLAND@eos.info

Information on Analysis Methods

Internal powder and solid part analyses done using qualified and calibrated (where applicable) analysis equipment. Calibration/operational check performed on predetermined intervals according to internal procedures and/or procedures recommended by the manufacturer. Daily operational checks for equipment where applicable using traceable reference materials (if available) or internal reference materials.

Sampling and sample preparation: According to ASTM B215. Analysis sample(s) for sieve analysis, laser diffraction analysis and powder densities prepared using spinning riffles.

Cleanliness of powder and powder morphology: Visual examination of powder according to internal procedure using optical microscope Olympus BX41 or GX51 to investigate powder monolayer and mounted, polished samples. Terminology in accordance with ASTM B243.

Particle size distribution: Laser diffraction analysis and sample preparation according to ASTM B822 and ISO 13320 with Microtrac S3500 or Sympatec HelosRodas according to ISO 13320. Dynamic image analysis according to ISO 13322-2 with CAMSIZER XT.

Sieve analysis: Sieve analysis based on ASTM B214. Retsch AS200 Digit sieving system is used. Sieves according ASTM E11.

Powder density: Apparent density analysis according to ASTM B212 or ASTM B417 or ASTM B329. Skeletal density determination according ASTM B923 using Quantachrome UltraPyc 1200e gas pycnometer (He).

Powder water content: Water content determination according to internal procedure using coulometric Karl Fischer titrator C30s with InMotion KF Flex oven autosampler.

Powder chemistry: The chemical composition is in accordance with standards SAE AMS 5662 (except Se). Elemental composition determined in ISO 17025 certified laboratory with following test methods: Elemental analysis according to ASTM E2594 (ICP-OES), except for C/S acc. to ASTM E1019 (combustion), O/N/H acc. to ASTM E1019 (fusion). Pb, Bi, Se, Ag acc. to. ASTM 1184 (AA/Graphite) or ASTM E1479 (ICP-OES). Powder analyses without surface removal. Bal. = balance.

Density: Weighing of part in air and water according to ISO 3369 with Kern PLT 650-3M balance.

Mechanical properties: Mechanical properties determined in ISO 17025 accredited laboratory according to ISO 6892-1 method B10 for samples in heat treated condition (AMS2774D, AMS5662). Specimen machining according to ISO 6892-1 (Annex D), cylindrical samples with d=5 mm in neck region. Samples build in vertical orientation. Limits from standard SAE AMS 5662 indicate minimum requirements.

The data correspond to our knowledge and experience at the time of publication. They do not on their own represent a sufficient basis for any part design, neither do they provide any agreement about or guarantee the specific properties of a product or part or the suitability of a product or part for a specific application. It is the responsibility of the producer or customer of a part to check its properties as well as its suitability for a particular purpose. This also applies to consideration of possible intellectual property rights as well as laws and regulations. The data are subject to change without notice as part of EOS' continuous development and improvement processes. EOS has not FDA cleared this product for medical device manufacturers to use this material in FDA sensitive applications.