

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství
Studijní specializace: Strojírenská technologie - technologie
obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

HVOF žárové nástřiky na bázi niklu a jejich obrobiteľnosť

Autor: Jan MEZULIÁNIK
Vedoucí práce: doc. Ing. Jan ŘEHOŘ, Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jan MEZULIÁNIK**
Osobní číslo: **S19B0607P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Téma práce: **HVOF žárové nástřiky na bázi niklu a jejich obrobiteľnosť**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod do problematiky
2. Technologie HVOF nástřiku
3. Vlastnosti nástřiků
4. Obrobiteľnosť nástřiků
5. Aplikace
6. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Elektronické informační zdroje dostupné z www.knihovna.zcu.cz
- CIRP ANNALS – Manufacturing Technology: (<http://www.cirp.net/>)
- MM Průmyslové Spektrum, dostupné z www.mmspektrum.com
- Strojírenská technologie, dostupné z <http://casopis.strojirenskatechnologie.cz/>

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Tomáš Zatloukal**
Regionální technologický institut

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2021**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Mezuliánik	Jméno Jan	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Řehoř, Ph.D.	Jméno Jan	
PRACOVISŤE	ZČU – FST – KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	HVOF žárové nástřiky na bázi niklu a jejich obrobiteľnosť		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	47	TEXTOVÁ ČÁST	36	GRAFICKÁ ČÁST	11
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Hlavním cílem bakalářské práce je popsat technologický proces zhotovení funkční plochy žárovým nástřikem, a to od přípravy povrchu před nástřikem až po finální jeho obrobení. Dílčím cílem je seznámit se s problematikou obrábění lineární řeznou hranou a vysokorychlostního obrábění (HSC).
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	žárové nástřiky, lineární řezná hrana, obrábění, Nikl, HSC, NiCrBSi

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Mezuliánik	Name Jan	
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) doc. Ing. Řehoř, Ph.D.	Name Jan	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	HVOF thermal coatings on basis of nickel and their machinability		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2021
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	47	TEXT PART	36	GRAPHICAL PART	11
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The main goal of the bachelor thesis is to describe the technological process of making a functional surface using a thermal spray, beginning with the surface preparation up to the final machining. Additional goal is to learn more about machining with linear cutting edge and about the technology of high-speed machining (HSC).
KEY WORDS	thermal spraying, linear cutting edge, machining, nickel, HSC, NiCrBSi

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	11
1 Úvod.....	12
1.1 Stanovení cílů řešení.....	12
2 Metody nástřiku.....	13
2.1 Nástřik elektrickým obloukem	13
2.2 Plazmový nástřik	14
2.3 Nástřik plamenem.....	15
2.4 Detonační nástřik.....	16
2.5 Nástřik za studena.....	17
2.6 Vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF).....	18
2.6.1 Technologická příprava před nástřikem [7]	18
2.6.2 Samotný proces HVOF nástřiku	19
2.6.3 Post processing[11, 12]	21
3 Srovnání metod žárových nástřiků	22
4 Vlastnosti nástřiku NiCrBSi.....	23
5 Další nástřiky na bázi niklu.....	27
5.1 Nástřik NiCrBSi-SiC	27
5.2 Nástřik NiCrBSi-WC.....	28
5.3 Nástřik NiCrBSi-Cr ₃ C ₂ -NiCr	28
5.4 Nástřik NiTi.....	28
5.5 Nástřik Ni5Al	29
5.6 Nástřik Ni20Cr	29
6 Obrábění žárových nástřiků	29
6.1 Obrábění lineární řeznou hranou	33
6.2 Vysokorychlostní obrábění - HSC.....	36
7 Obrábění slitin na bázi niklu	38
7.1 Obrábění slitin na bázi niklu vzniklých pomocí aditivní technologie.....	38
7.2 Broušení slitin na bázi niklu	39
8 Aplikace žárových nástřiků.....	41
Závěr.....	43
Seznam použitých zdrojů	44

Přehled použitých zkratk a symbolů

ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní norma
FST	Fakulta strojní
KTO	Katedra technologie obrábění
RTI	Regionální technologický institut
HVOF	Vysokorychlostní nástřik plamenem
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
EDM	Elektroerozivní obrábění
XRD	Rentgenová difrakční metoda
EDS	Energiově disperzní spektrometrie
SEM	Rastrovací elektronová mikroskopie
HSC	Vysokorychlostní obrábění
HFM	Vysokoposuvové obrábění
VBD	Vyměnitelná břitová destička
PCBN	Polykrystalický nitrid bóru
CVD-D	CVD povlakovaný diamant
CVD	Chemická depozice z plynné fáze
PVD	Fyzikální depozice z plynné fáze
SK	Slinutý karbid
CBN	Kubický nitrid bóru
SLM	Selektivní laserové tavení
DMLS	Přímé laserové tavení kovů
TIG	Svařování wolframovou elektrodou v atmosféře inertního plynu
HV	Tvrдость podle Vickerse
HRC	Tvrдость podle Rockwella
SNOP	Stroj, Nástroj, Obrobek, Přípravek

Seznam obrázků

Obr. 1 Proces žárového nástřiku [1].....	12
Obr. 2 Nástřik elektrickým obloukem [1]	13
Obr. 3 Plazmový nástřik [1]	14
Obr. 4 Nástřik plamenem [1].....	15
Obr. 5 Detonační nástřik [5].....	16
Obr. 6 Nástřik studeným plynem [3].....	17
Obr. 7 HVOF nástřik [1]	18
Obr. 8 Závislost porozity na vzdálenosti nástřiku [10]	20
Obr. 9 Závislost obsahu kyslíku na poměru palivo/kyslík [10]	20
Obr. 10 Závislost množství neroztavených částic na vzdálenosti nástřiku [10]	20
Obr. 11 Závislost výsledné tvrdosti na vzdálenosti nástřiku [10]	20
Obr. 12 Závislost teploty plamene na poměru palivo/kyslík [10].....	20
Obr. 13 Splatová struktura a nečistoty – schematicky [1].....	21
Obr. 14 Mikrostruktura nástřiku - pohled na plochu [13]	21
Obr. 15 Mikrostruktura nástřiku - příčný výbrus [13]	22
Obr. 16 Výsledky měření rentgenovou difrakční metodou [13]	24
Obr. 17 Výsledky tribologické zkoušky ball-on-disk [13].....	25
Obr. 18 Mikrotvrdość nástřiku [13]	25
Obr. 19 Výsledky měření rentgenovou difrakční metodou XRD [14].....	26
Obr. 20 Míra eroze při různém pH a rychlosti proudu [14]	26
Obr. 21 Míra eroze při různém pH a úhlu proudu [14]	26
Obr. 22 Morfologie prášku NiCrBSi [13]	27
Obr. 23 Morfologie prášku SiC [13]	27
Obr. 24 Změna mikrotvrdości nástřiku NiCrBSi přidáním WC(Co) [17]	28
Obr. 25 Rozměry již rozděleného polotovaru před nástřikem [23].....	31
Obr. 26 Opatřebení VBD Rotana [23]	31
Obr. 27 Dosah oblasti plastické deformace [25]	32
Obr. 28 Oblasti deformací při třískovém obrábění [26].....	32
Obr. 29 Bonar SCMW-F 120408 [28]	33
Obr. 30 Úhel λ_s při obrábění lineární řeznou hranou [29]	34
Obr. 31 Poloha VBD při obrábění lineární řeznou hranou; $\lambda_s \neq 0$ [23].....	34
Obr. 32 Nástroje s lineární řeznou hranou [29].....	35
Obr. 33 Ukázka tvaru třísky tvořené nástrojem B [29]	36
Obr. 34 HSC soustružení nástrojem s VBD z CBN [35]	37

Obr. 35 Zbytková pnutí po broušení s a bez předehřevu [37].....	41
Obr. 36 Nástřík tiskařského válce [39].....	42

Seznam tabulek

Tab. 1 Chemické složení nástřiku Ni50Cr [10].....	21
Tab. 2 Srovnání parametrů metod žárových nástřiků [5, 6].....	23
Tab. 3 Parametry nástřiku [13].....	23
Tab. 4 Chemické složení složek nástřiku [13]	24
Tab. 5 Chemické složení nástřiku NiCrBSi [14].....	27
Tab. 6 Parametry obrobené plochy po jednotlivých řezech [2]	30
Tab. 7 Chemické složení nástřiku NiCrBSi [23].....	31
Tab. 8 Řezné podmínky při HSC soustružení [23, 27]	33
Tab. 9 Parametry nástrojů s lineární řeznou hranou [29].....	35
Tab. 10 Nejvhodnější řezné podmínky [36].....	39
Tab. 11 Sledované veličiny [38]	39
Tab. 12 Variované parametry broušení [38]	40

1 Úvod

Metoda žárového stříkání (anglicky thermal spraying) je metoda povrchové úpravy materiálu. Tato metoda je známa již delší dobu, nicméně její význam postupem času s vývojem technologie roste.

Technologie žárového nástřiku spočívá v nanášení většinou tekutého, či nataveného přídavného materiálu unášeného vysokou rychlostí na součást. Díky vysoké kinetické energii a teplotě přídavného materiálu dochází k přilnutí částic k povrchu součásti. Nástřik může být prováděn po vrstvách, díky čemuž je možné dosáhnout tloušťky nastříkané vrstvy v rámci desetin až jednotek milimetrů. [1]

Proces žárového stříkání



Obr. 1 Proces žárového nástřiku [1]

Žárového nástřiku se využívá především v případech, kdy je nutno zlepšit mechanické vlastnosti povrchu součásti. Zejména se jedná o korozivzdornost, otěruvzdornost a žáruvzdornost povrchu. Vlastností nastříkané vrstvy se využívá jak v prvovýrobě, tak i při renovaci opotřebovaných součástí (například náprav železničních vagónů). [2] Nástřik je možno aplikovat jak na železný, tak i neželezný základní materiál. U neželezných substrátů může nastat problém s teplotami při nástřiku, nebo rozdílnou tepelnou roztažností základního a přídavného materiálu.

V této bakalářské práci budou popsány žárové nástřiky na bázi niklu, a to především nástřiky NiCrBSi zhotovené metodou vysokorychlostního nástřiku plamenem (HVOF). Bude popsán proces žárového stříkání, vlastnosti žárových nástřiků a další druhy žárových nástřiků na bázi niklu. Bude také popsán proces obrábění žárových nástřiků nástrojem s definovanou geometrií břitu. K této problematice bude doplněn popis obrábění lineární řeznou hranou a také popis režimu vysokorychlostního obrábění HSC. Bude také zmíněna problematika obrábění niklových slitin nástroji s definovanou i nedefinovanou geometrií břitu. Nakonec budou uvedeny možné aplikace žárových nástřiků. Výsledkem bude také návrh možného postupu dalšího řešení a výzkumu v této problematice.

1.1 Stanovení cílů řešení

Hlavním cílem bakalářské práce je popsat technologický proces zhotovení funkční plochy žárovým nástřikem, a to od přípravy povrchu před nástřikem až po finální jeho obrobení. Dílčím cílem je seznámit se s problematikou obrábění lineární řeznou hranou a vysokorychlostního obrábění (HSC).

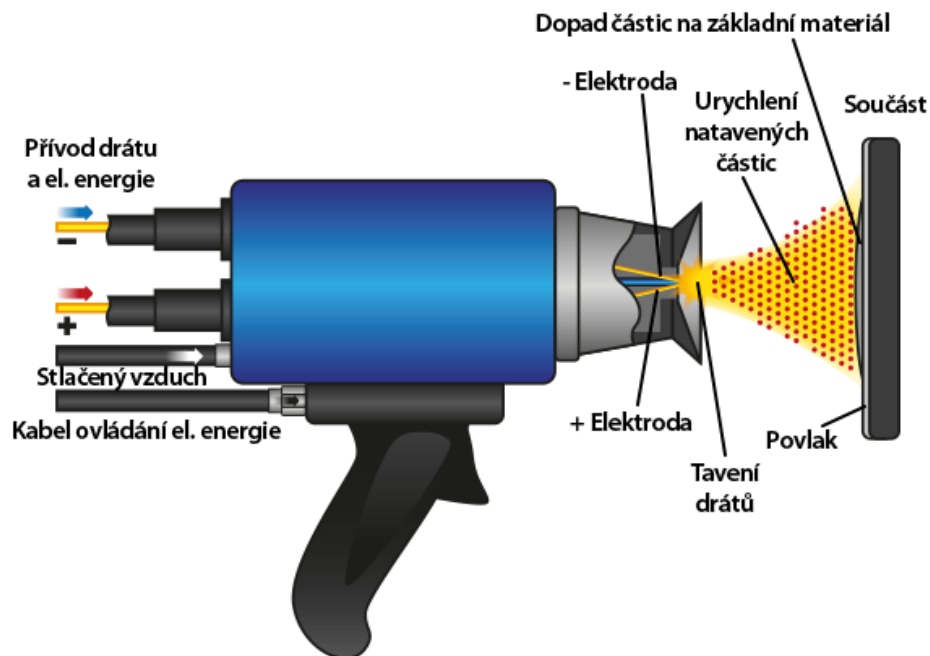
2 Metody nástřiku

Tato kapitola vychází ze zdroje [1].

Existuje více metod nanášení žárového nástřiku, z nichž v této práci bude kladen důraz především na metodu HVOF (High Velocity Oxygen Fuel), což je metoda vysokorychlostního nástřiku plamenem. Přesto budou ale nyní krátce zmíněny i jiné možnosti nanášení nástřiku.

2.1 Nástřik elektrickým obloukem

Tato metoda využívá jako zdroj tepla potřebného k tavení přídavného materiálu elektrický oblouk. Ten hoří v rámci aplikačního zařízení, na rozdíl od svařování, kdy hoří oblouk mezi přídavným a základním materiálem. Přídavný materiál je v podobě dvou drátů přiváděn do aplikačního zařízení. Když dojde ke kontaktu jednotlivých drátů, zapálí se oblouk a přídavný materiál se začíná tavit. Tento natavený materiál je následně unášen proudem stlačeného vzduchu na povrch součásti. [3]

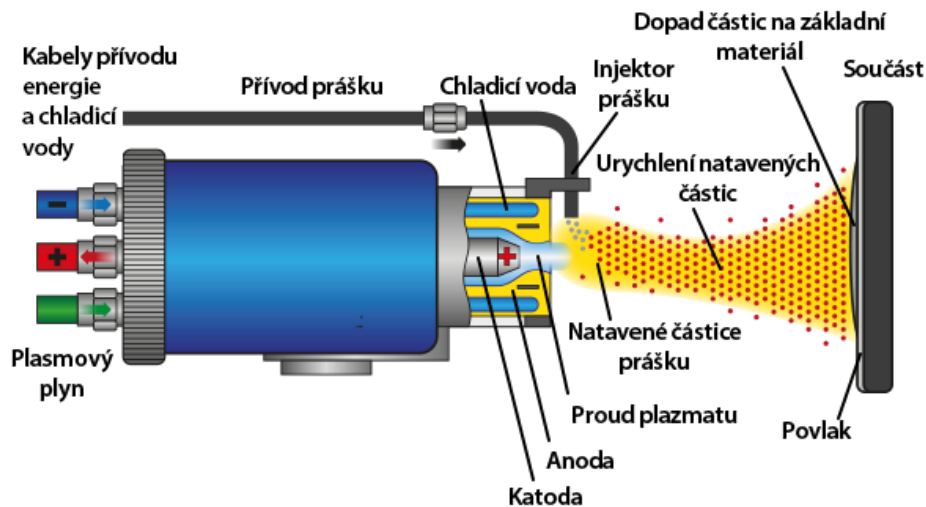


Obr. 2 Nástřik elektrickým obloukem [1]

2.2 Plazmový nástřík

Další metodou, u níž je potřebné vysoké teploty dosahováno pomocí elektrické energie je metoda plazmového nástříku. V tomto případě je elektrický oblouk zapálen mezi pevnými elektrodami v ochranné atmosféře inertního plynu (obvykle argonu), jehož ionizací dojde ke vzniku plazmy. Obloukem následně prolétá přídavný materiál ve formě prášku unášený stlačeným vzduchem. Průletem horkou plazmou dojde k natavení částic přídavného materiálu a ty poté urychlené nosným plynem dopadají na povrch součásti.

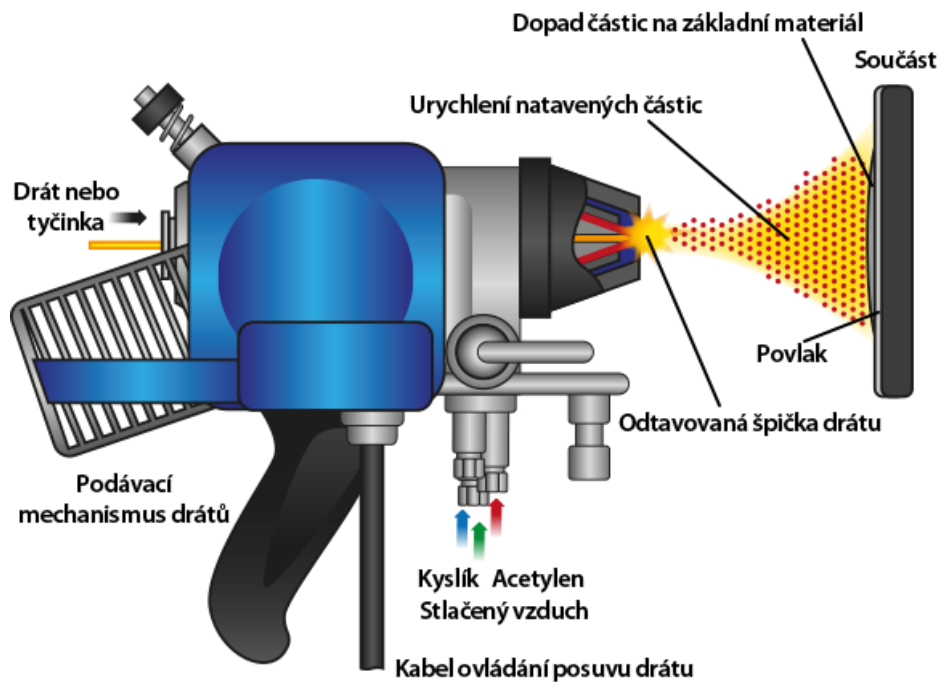
Obě metody využívající elektrické energie jako zdroje tepla zahřívají přídavný materiál na vyšší teploty než zbylé metody, což na jednu stranu umožňuje i aplikaci keramických nástříků, ale na druhou stranu může způsobovat vyhoření některých žádoucích prvků ještě před dopadem částic na povrch součásti.



Obr. 3 Plazmový nástřík [1]

2.3 Nástřik plamenem

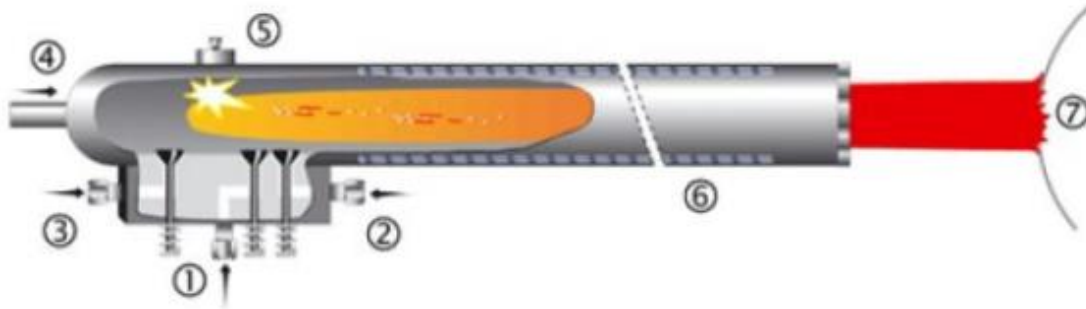
Krom elektrické energie lze vysoké teploty potřebné k natavení přídavného materiálu dosáhnout i jinými prostředky. V případě nástřiku plamenem se k tomuto účelu využívá teploty hoření směsi kyslíku a paliva (obvykle acetylen) podobně jako při řezání plamenem. Do zapáleného plamenu je přiváděn přídavný materiál. Zde se nataví a pomocí stlačeného vzduchu je tryskán na součást.



Obr. 4 Nástřik plamenem [1]

2.4 Detonační nástřik

Tento způsob nanášení je podobný metodě nástřiku plamenem. I zde se využívá směsi plynů (často kyslík a acetylen) jako zdroje tepla, nicméně v tomto případě dochází k uvolnění tepla nikoliv hořením, ale detonací stlačené směsi plynů. Plyny jsou přivedeny do komory společně s přídavným materiálem v podobě prášku. Zde jsou promíchány a stlačeny. Následně je směs zažehnuta, dojde k detonaci, natavení prášku a výbuch je usměrněn na základní materiál. Na rozdíl od ostatních metod není tato metoda kontinuální, ale probíhá ve výše popsaných cyklech, které se opakují s frekvencí vyšší než 100 Hz. [4]

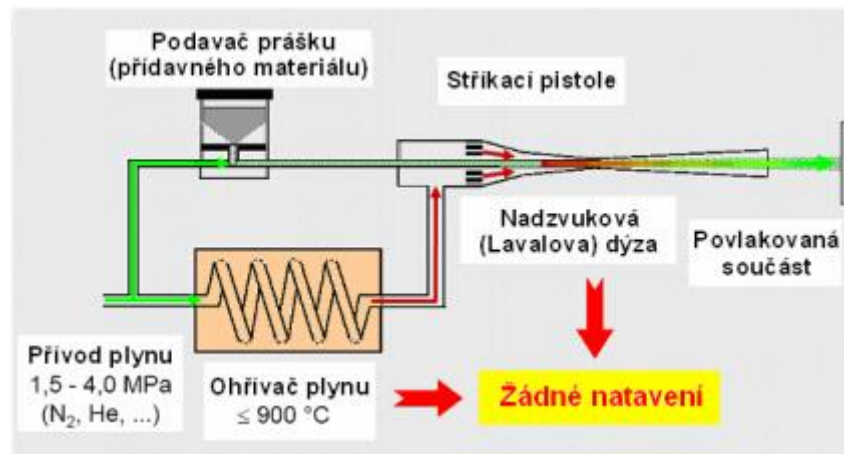


Obr. 5 Detonační nástřik [5]

1 – přívod acetyleny, 2 – přívod kyslíku, 3 – přívod dusíku, 4 – přívod přídavného materiálu, 5 – zapalovací svíčka, 6 – hlaveň, 7 – povlakovaný materiál

2.5 Nástřik za studena

Nejvíce se od ostatních metod nanášení liší metoda nástřiku za studena. Nedochozí při ní totiž k tavení částic přídavného materiálu. Přídavný materiál je unášen nosným plynem přehřátým na teplotu maximálně 900 °C o tlaku 0,5 až 6 MPa do Lavalovy dýzy. Zde dojde k urychlení směsi na nadzvukovou rychlost a takto urychlené částice dopadají na základní materiál. Jediným mechanismem spojení přídavného a základního materiálu je v tomto případě deformace vlivem dopadové energie. Proto je tato metoda používá především pro aplikaci měkkých přídavných materiálů. [3, 4, 6]

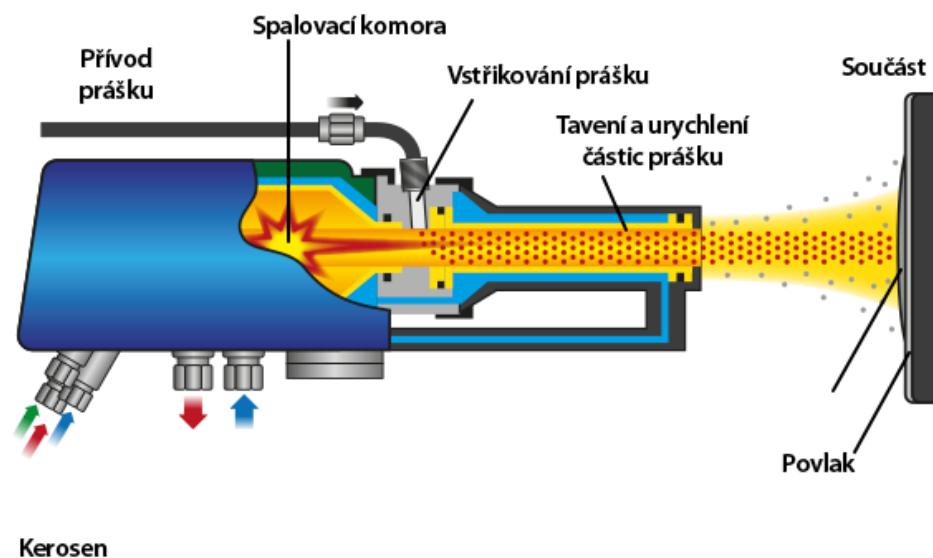


Obr. 6 Nástřik studeným plynem [3]

2.6 Vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF)

Tato metoda je v této kvalifikační práci ústřední, a proto bude rozebrána více do hloubky a bude na ní také popsán technologický proces výroba žárového nástřiku. Metoda HVOF je založena na podobném principu jako metoda nástřiku plamenem, tedy získávání potřebného tepla z hoření směsi plynů, ale na rozdíl od metody nástřiku plamenem využívá jako palivo nejčastěji kerosin. Přízvisko „vysokorychlostní“ si tato metoda vysloužila tím, že směs natavených částic a nosného plynu (nejčastěji dusíku) je ještě před opuštěním aplikačního zařízení vedena skrz konvergentně-divergentní trysku, v níž se rychlost této směsi zvýší až na nadzvukové hodnoty. Díky tomu je kinetická energie částic přídavného materiálu při dopadu vyšší než u jiných metod a dochází k lepšímu přilnutí povlaku.

Nevýhodou metody HVOF může být vyšší technologická náročnost, vysoká hlučnost při aplikaci (až 100 dB) a nižší teplota plamene, která znemožňuje úspěšnou aplikaci keramických povlaků. [3]



Obr. 7 HVOF nástřik [1]

2.6.1 Technologická příprava před nástřikem [7]

Aby byla zaručena dobrá přilnavost stříkaného povlaku, je nutné podniknout určité kroky. Poté, co je základní materiál obroben na požadované rozměry před nanášením, je nutné inkriminované plochy očistit a připravit pro přilnutí nástřiku. Za tímto účelem jsou plochy součásti nejprve zdrsňeny, obvykle pomocí otryskání pískem z oxidu hlinitého (Al_2O_3). Otryskání bývá prováděno ručně, nicméně pro dosažení maximálně homogenních podmínek pro přilnutí nástřiku je vhodnější otryskání provádět strojně (pomocí robota).

Jako alternativní proces pro zdrsňení povrchu polotovaru zkoušeli Sharma a kol. [8] při výzkumu v roce 2020 využít elektroerozivní obrábění. To se ale ve výsledku ukázalo jako méně vhodné, jelikož u vzorků opracovaných EDM nebylo kvůli přítomnosti cementitu a austenitu na povrchu, dosaženo dostatečné přilnavosti nástřiku. Materiál nástřiku byla slitina Ni-5Al aplikovaná metodou detonačního nástřiku. [8]

Po otryskání/zdrsňení povrchu následuje očištění polotovaru v ultrazvukovém čistícím přístroji v acetonové lázni. Do nádoby čistícího přístroje jsou vloženy polotovary k očištění a zbylý objem nádoby se doplní acetonem. Poté se stroj spustí. Ke dnu nádoby je připevněn zdroj ultrazvukových vln. Ty se šíří kapalinou a přivádí její částice k pohybu. Jelikož je frekvence pohybu částic kapaliny velmi vysoká, je pro kapalinu obtížné rychlé změny polohy

sledovat. Díky tomu vznikají mikroskopické bublinky s velkým povrchovým napětím, které záhy kolabují za uvolnění velkého množství energie. Tento proces se nazývá akustická kavitace. Díky tomu a chemickým vlastnostem acetonu, je z povrchu součásti odstraněna téměř veškerá mastnota, stejně jako většina nečistot.

Poslední fázi přípravy před samotným nanášením bývá předehřev. Součásti se obvykle nepředehřívají na teploty vyšší než 250 °C, aby nedošlo k výrazným změnám tvaru součásti. Díky předehřevu je jednak dokončeno očišťování součásti, jelikož většina nečistot zbylých po předešlých procesech je spálena a také je snížen teplotní gradient mezi základním a přídatným materiálem, díky čemuž chladne nanášený materiál pomaleji a výsledné zbytkové napětí v nástřiku je menší.

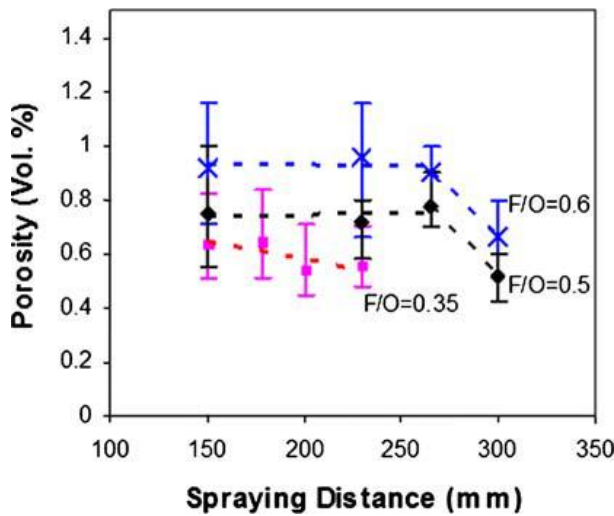
Další fází technologické přípravy může být také nástřik povlaku jiného složení, než jaké je složení finální vrstvy. Tento povlak se využívá například mají-li být spojovány materiály se špatnou vzájemnou soudržností. Mezivrstva slouží jako pojivo základního materiálu a materiálu svrchního povlaku, ale sama nemusí mít výrazný vliv na mechanické vlastnosti. Liborius a kol. [9] například využili vrstvu Ni-5Al jako mezivrstvu mezi základním materiálem EN AW-5754 a svrchní vrstvou Fe17Cr2Ni0,2C, která byla následně soustružena.

2.6.2 Samotný proces HVOF nástřiku

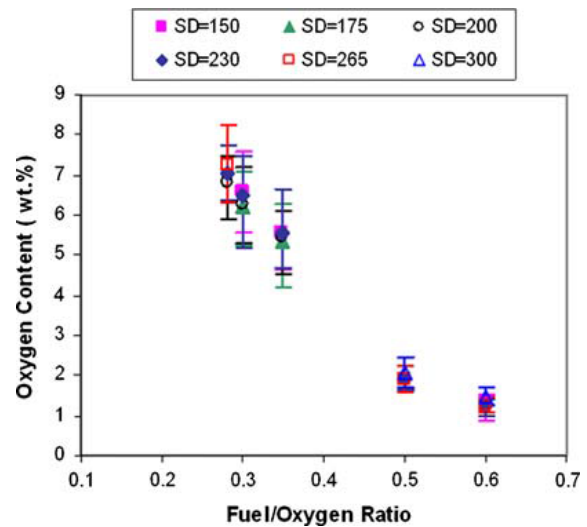
Po dokončení technologické přípravy před nástřikem přichází na řadu nástřik samotný. V našem případě se bude jednat o nástřiku metodou HVOF. Obtížnost nástřiku záleží na tvaru ošetřované plochy. Je-li plocha rovinná, je vcelku jednoduché dosáhnout nástřiku o homogenní tloušťce, ovšem je-li plocha zakřivená, například kulová, stává se nanesení homogenní vrstvy složitějším. O obtížnosti HVOF nástřiku na kulovou plochu se zmiňují Valíček a kol. [2].

V obou případech nástřiku (jak rovinné, tak kulové plochy) je aplikační přístroj namontovaný na robotu. Preciznost pohybu robotické ruky zajišťuje plynulý a rovnoměrný nástřik. Zároveň by bylo krajně nebezpečné, aby s aplikátorem pracoval člověk vzhledem k částicám nataveného kovu, které z něj ve vysokých rychlostech vylétávají. Vlastnosti výsledného nástřiku záleží do jisté míry i na parametrech procesu stříkání. Hraje zde roli například poměr a tlaky spalovaných plynů (kyslík a kerosin nebo jiný palivový plyn), nebo vzdálenost trysky od ošetřovaného povrchu.

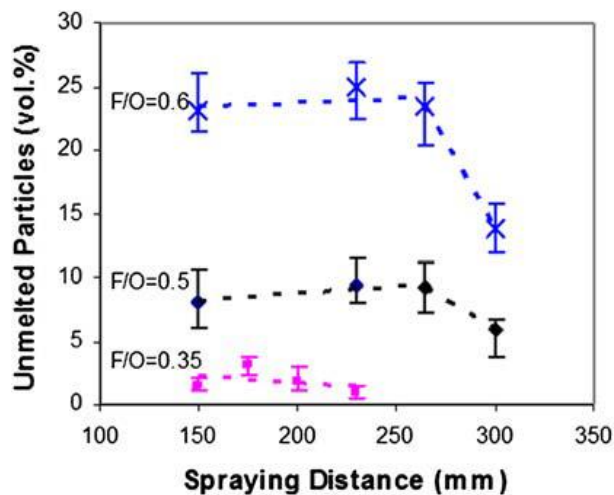
Vlivem parametrů procesu nanášení se zabývali v článku z roku 2010 Saaedi a kol [10]. Cílem jejich článku bylo pozorovat závislost mechanických vlastností nástřiku Ni-Cr na podmínkách, ze kterých je nástřik nanášen. Bylo sledováno 5 hlavních kritérií: průtok kyslíku, průtok paliva (propylen), průtok vzduchu, vzdálenost nanášení a množství dodávaného materiálu. Později se ukázalo, že vliv průtoku vzduchu a množství dodávaného materiálu je neznatelný a tyto parametry byly po zbytek pokusu zachovány konstantní (průtok vzduchu: 355 SLM (Standard Litres per Minute); množství dodávaného materiálu: 23 g/min). Zbylé parametry byly upravovány v rozmezí: 0,28 až 0,6 pro poměr paliva/kyslíku a 150 až 300 mm pro vzdálenost aplikačního zařízení od zpracovávaného kusu. Jako povlakový materiál byla využita slitina Ni50Cr od společnosti Sulzer Metco Inc. (přesné chemické složení viz Tab. 1). V průběhu všech experimentů byl povrch ochlazován proudem stlačeného vzduchu, aby nedocházelo k jeho přehřátí. Krom vlastností výsledného nástřiku byla také v průběhu stříkání hlídána teplota nanášených částic materiálu. Po analýze výsledků se ukázalo, že s rostoucím poměrem palivo/kyslík, klesá podíl kyslíku ve výsledném nástřiku, ale stouplо množství neroztavených částic, jak je patrné z obrázků 9 a 10. Obdobně stoupla porozita výsledného nástřiku s póry rozmezí 0,8 až 6 μm. Rostoucí vzdálenost nástřiku poté vedla ke snížení pórovitosti a snížení podílu nenatavených částic (viz Obr. 8 a 10). Podrobnější vývoj vlastností, s ohledem na parametry nástřiku, je patrný z následujících grafů. [10]



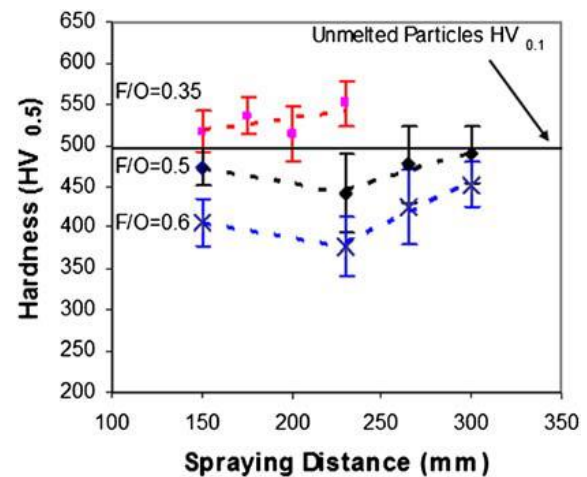
Obr. 8 Závislost porozity na vzdálenosti nástřiku [10]



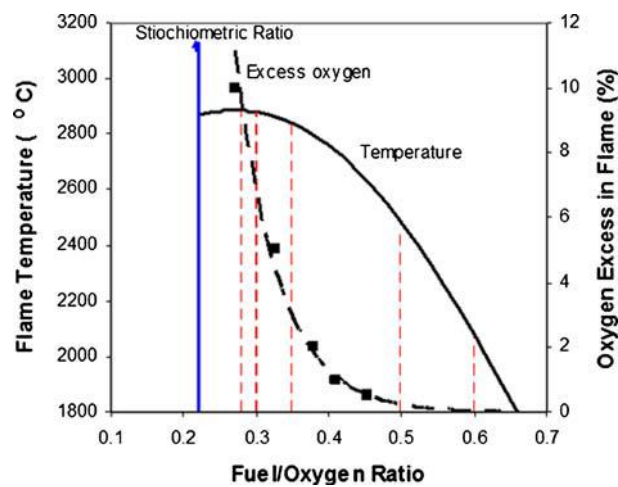
Obr. 9 Závislost obsahu kyslíku na poměru palivo/kyslík [10]



Obr. 10 Závislost množství neroztavených částic na vzdálenosti nástřiku [10]



Obr. 11 Závislost výsledné tvrdosti na vzdálenosti nástřiku [10]



Obr. 12 Závislost teploty plamene na poměru palivo/kyslík [10]

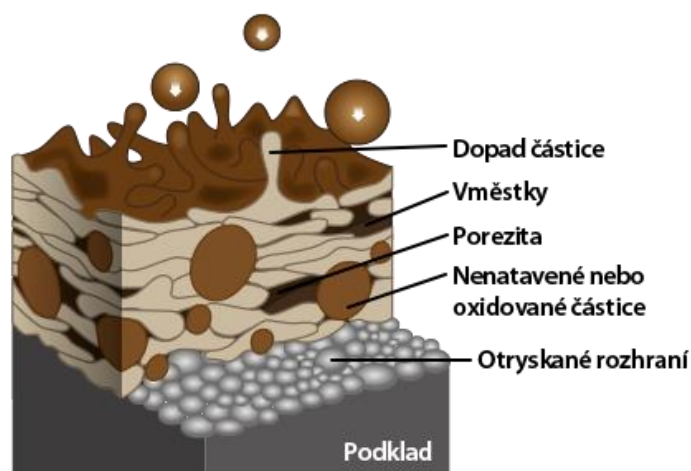
Tab. 1 Chemické složení nástřiku Ni50Cr [10]

Slitina	Ni	Cr	Si	Fe	C	Mn	Rozměr částic
Ni-50Cr	Základ	49,6	0,3	0,1	0,03	0,1	44 μm

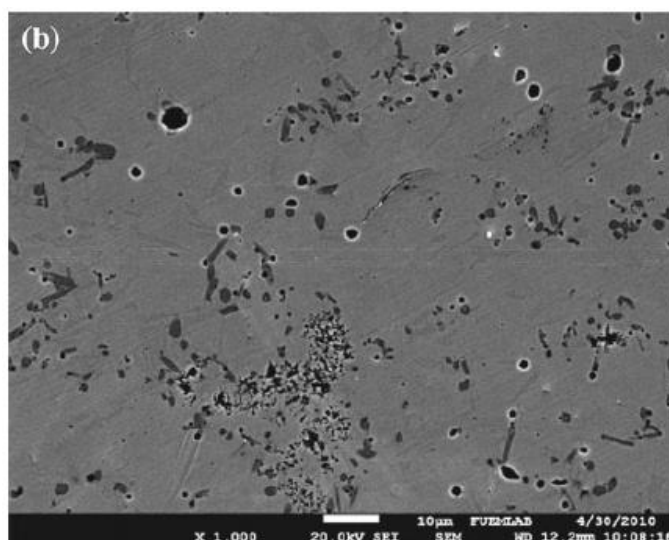
Pozn.: Hodnoty zastoupení jednotlivých prvků jsou uvedeny v hmotnostních procentech.

2.6.3 Post processing[11, 12]

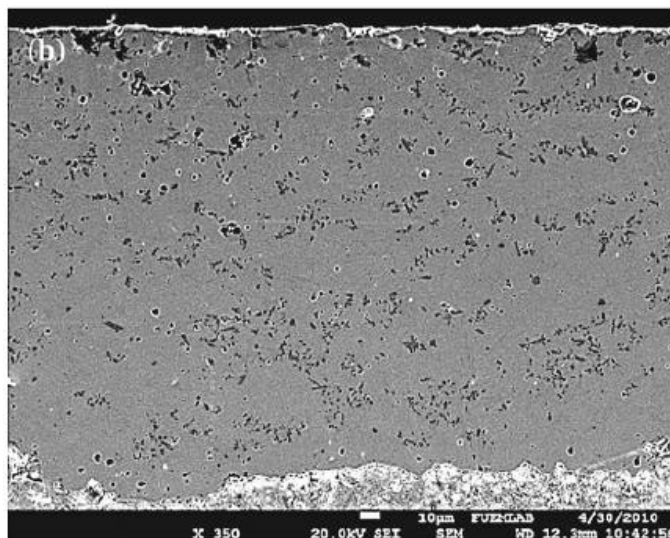
Po dokončení samotného stříkání vykazuje povlak jisté znaky typické pro žárové nástřiky (viz Obr. 13). Ve vrstvě povlakového materiálu, která má tloušťku zpravidla do 3 mm, se nachází póry, vměstky a nenatavené částice prášku. Zároveň částice, u kterých došlo k natavení, ale nikoliv k úplnému roztavení se při dopadu na povrchu součásti zdeformují do tvaru lamel. Vrstvením těchto lamel, v oboru žárových nástřiků též nazývaných „splaty“, vzniká struktura pro žárové nástřiky typická, ovšem z hlediska mechanických vlastností povlaku nežádoucí. Dopadová rychlost a teplota částic spolu se strukturou povrchu základního materiálu mají velký vliv na výslednou přilnavost povlaku, a spolu s rychlostí chlazení vrstvy mají vliv na zbytková pnutí.



Obr. 13 Splatová struktura a nečistoty – schematicky [1]



Obr. 14 Mikrostruktura nástřiku - pohled na plochu [13]



Obr. 15 Mikrostruktura nástřiku - příčný výbrus [13]

Za účelem zkvalitnění struktury nástřikové vrstvy může být využito přetavení nástřiku. Opětovným zahřátím, nebo až roztavením přídavného materiálu, nyní již spojeného se základním materiálem, dojde k homogenizaci vrstvy nástřiku a k lepšímu přilnutí povlaku. Splatová struktura přestává být patrná, póry se zalijí, dojde ke snížení zbytkových pnutí a jelikož teplo pronikne hlouběji do základního materiálu může dojít až ke svaření základního a naneseného materiálu. [13]

Tento krok lze realizovat skrze vícero prostředků, ať už pomocí laseru, plamene (například z acetylenového hořáku), přímo v peci nebo i pomocí elektrického proudu. [12]

3 Srovnání metod žárových nástřiků

Tabulka 2 nabízí obrazné srovnání metod žárového stříkání podle teploty, dopadové rychlosti částic, pórovitosti výsledného nástřiku a jeho přilnavosti. Metoda HVOF, která je předmětem této bakalářské práce je v tabulce zvýrazněna.

Je patrné, že metody využívající elektrické energie jako zdroje tepla dosahují nejvyšších teplot, což je činí vhodné i pro aplikaci keramických nástřiků. Na druhou stranu nemusí být takto vysoká teplota při nástřiku vždy žádoucí. U kovových nástřiků způsobí příliš vysoká teplota rychlejší oxidaci částic před dopadem na základní materiál a může dojít také k degradaci stříkané směsi, jelikož dojde k vyhoření některých z obsažených prvků ještě před dopadem částic. [13]

Z hodnot také vyplývá, že metoda vysokorychlostního nástřiku plamenem kombinuje relativně vysoké teploty přítomné u detonačního, či plamenného nástřiku se supersonickou dopadovou rychlostí typickou pro metodu nástřiku studeným plynem. Díky tomuto spojení dosahuje metoda HVOF nejnižší pórovitosti a nejlepší přilnavosti nástřiku.

Tab. 2 Srovnání parametrů metod žárových nástřiků [5, 6]

	Metoda nástřiku					
	Plamenem	Elektrickým obloukem	Plazmou	Detonační nástřik	HVOF	Studeným plynem
Teplota [°C]	3200	6000 - 8000	16 000 - 20 000	2500 - 3200	3200 - 3600	400 - 900
Dopadová rychlost [m/s]	80 - 100	150	150 - 250	600 - 800	800 - 1200	900 - 1200
Pórovitost [%]	10 - 15	5 - 10	3 - 10	1 - 3	0,5 - 2	-
Přilnavost [MPa]	8 - 20	15 - 20	15 - 35	50 - 80	70 - 90	-

4 Vlastnosti nástřiku NiCrBSi

Žárové nástřiky na bázi niklu jsou využívány především v případech, kdy je nutno zvýšit korozivzdornost a odolnost vůči otěru za zvýšených teplot. Slitina NiCrBSi – tedy nikl, chrom, bor, křemík – doplňuje zmíněné vlastnosti niklu o další vyplývající z přítomnosti jiných prvků. Přítomnost chromu zlepšuje korozivzdornost nástřiku díky tvorbě pasivační vrstvy a také zvyšuje tvrdost povlaku, jelikož tvoří spolu s přítomným uhlíkem tvrdé karbidy. Přidání boru do slitiny způsobuje pokles teploty tavení, díky čemuž je slitina NiCrBSi velice vhodná pro aplikaci metodou HVOF. Kvůli nadzvukovým rychlostem pohybu částic totiž tráví částice v tavicí zóně, a tedy za vysokých teplot, méně času, přičemž se stihnou dostatečně natavit, ale nedojde k rozpadu karbidů. Přítomnost křemíku zlepšuje přilnavost nástřiku k základnímu materiálu. [13]

Buytoz a kol. [13] v článku z roku 2013 zkoumali mikrostrukturu a otěrové charakteristiky nástřiku NiCrBSi s různým objemovým přídatkem SiC. Nástřik byl aplikován metodou HVOF a jako palivo byl využit propan. Parametry samotné nástřiku jsou k vidění v tabulce 3.

Tab. 3 Parametry nástřiku [13]

Tlak palivové směsi [bar]	Tlak nosného plynu (Dusík) [Mpa]	Průtok kyslíku [l/min]	Průtok propanu [l/min]	Vzdálenost nástřiku [mm]
5 / 7	0,35	439	35 / 45	180 - 200

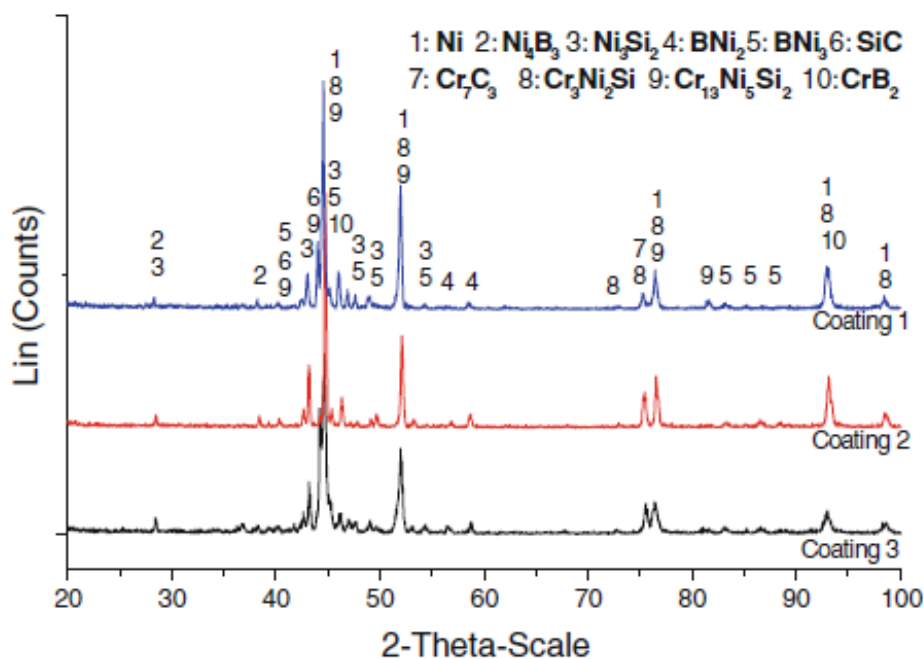
Celkem pořídili Buytoz a kol. 3 vzorky s hmotnostními procenty SiC: 10 %, 20 % a 40 % v tomto pořadí. Chemická složení obou využitých složek žárového nástřiku jsou sepsána v tabulce 4. Výsledky byly vyhodnoceny z hlediska mikrostruktury pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM), rentgenové spektroskopie (EDX) a rentgenové difrakční metody (RDX) a z hlediska tribologie pomocí zkoušky valivého tření „ball-on-disc“.

Pro zkoušku ball-on-disc byla využita kulička o průměru 3 mm vyrobená z Al_2O_3 a zatížena přítláčnou silou 3 N. Zkouška byla prováděna rychlostí 2,5 cm/s na celkové dráze 50 m. [13]

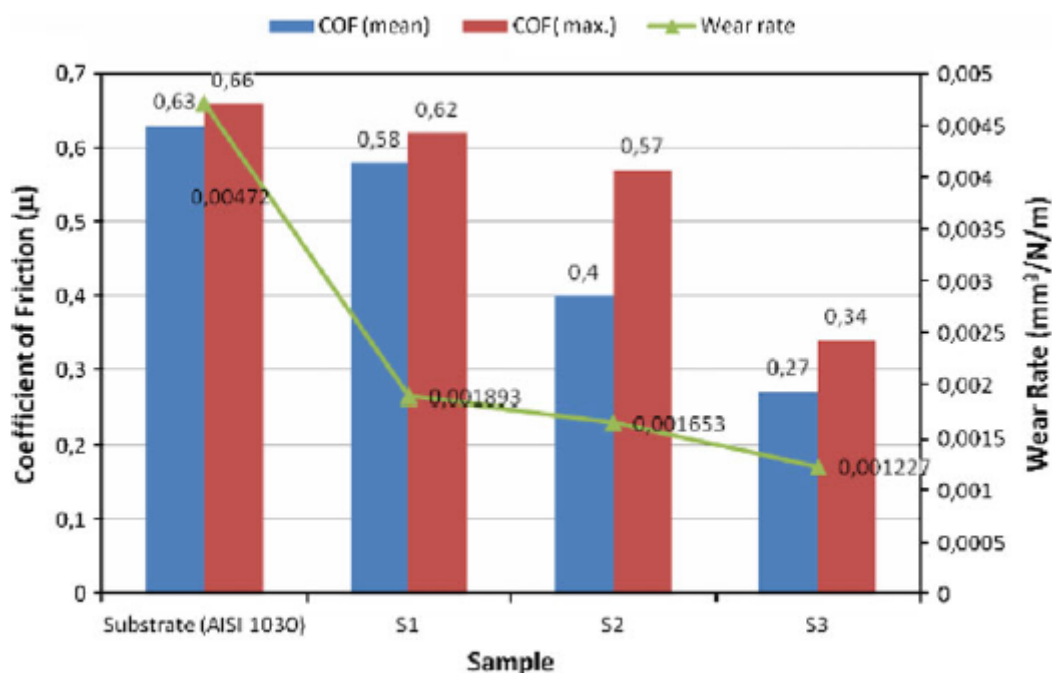
Tab. 4 Chemické složení složek nástřiku [13]

Složka	Ni	Cr	Si	C	Fe	B	Rozměr částic [μm]
NiCrBSi	Základ	13,94	5,03	4,86	3,97	3,34	60
SiC	-	-	74,33	20,21	-	-	68

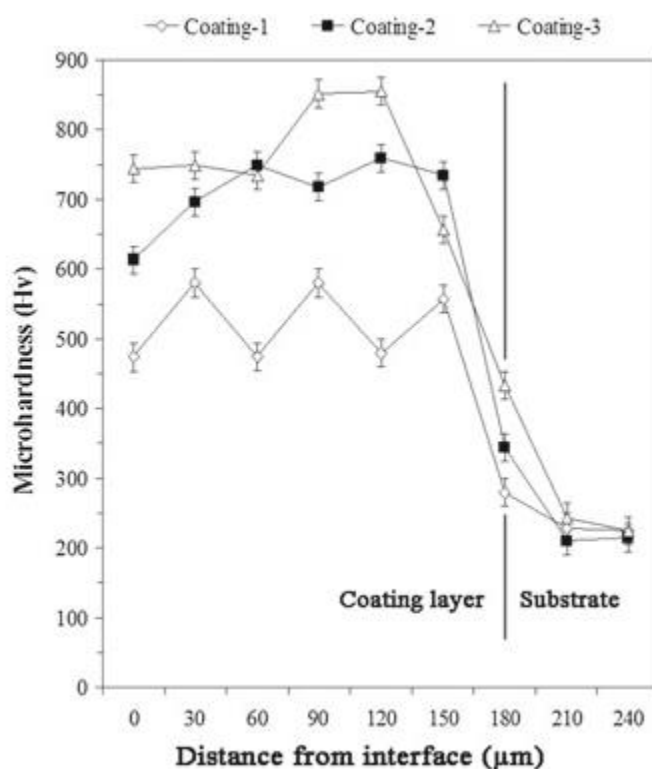
Pozn.: Hodnoty zastoupení jednotlivých prvků jsou uvedeny v hmotnostních procentech.



Obr. 16 Výsledky měření rentgenovou difrakční metodou [13]



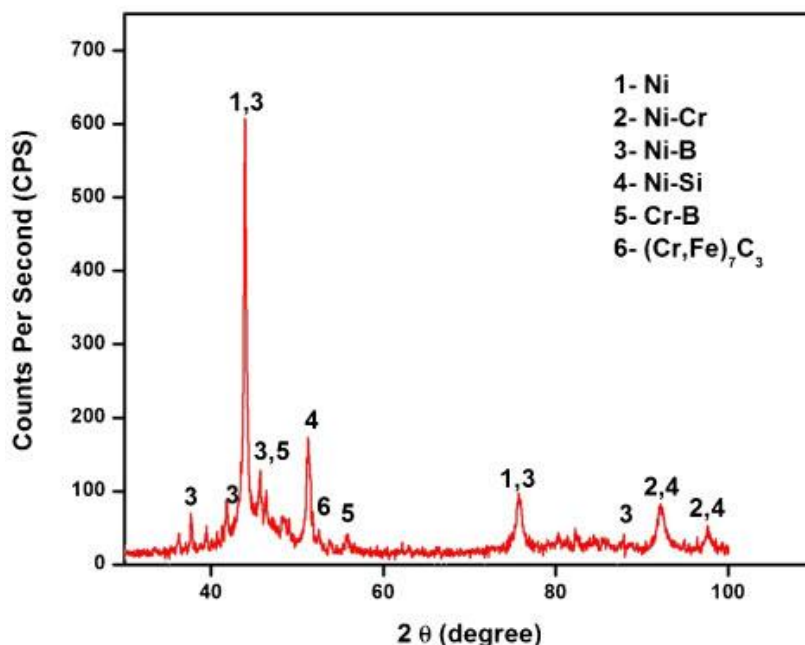
Obr. 17 Výsledky tribologické zkoušky ball-on-disk [13]



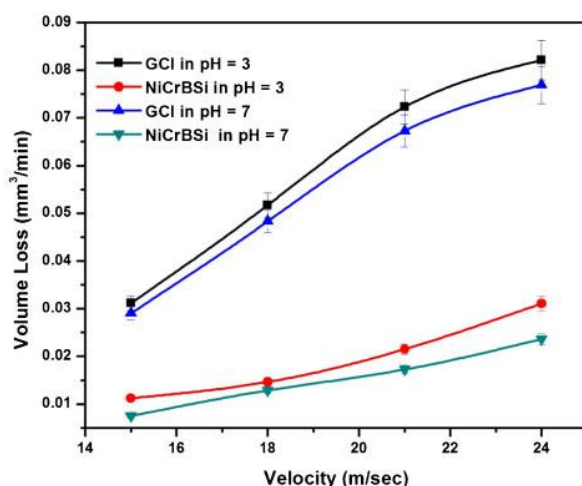
Obr. 18 Mikrotvrdost nástřiku [13]

Výsledkem bylo zjištění, že základní matrice nástřiku je tvořena kubickou plošně středěnou modifikací niklu (γ nikl) a v této matici jsou rozprostřeny sloučeniny boru a niklu (Ni_4B_3 , BNi_2 , BNi_3), karbid křemíku (SiC) a karbid chromu (Cr_7C_3) spolu s dalšími minoritními sloučeninami (viz Obr. 16). Otěruvzdornost povrchu byla v případě všech tří variant nástřiku vyšší než u základního materiálu a rostla s rostoucím podílem karbidu křemíku, (viz Obr. 17) což je zároveň i známka růstu tvrdosti, jak je patrné z obrázku 18. [13]

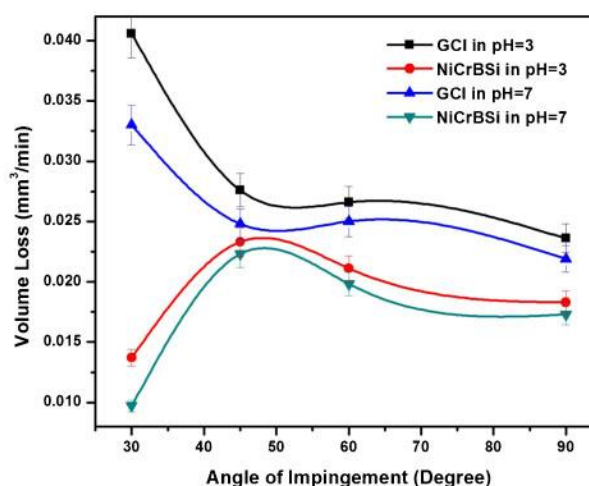
Stejně sloučeniny jako Buytoz a kol. [13] zjistili v nástřiku NiCrBSi (přesné složení viz Tab. 5) aplikovaném metodou HVOF i Yoganandh a kol. [14] v roce 2013 při výzkumu chování povlaku v erozivním prostředí při důlních podmínkách. Shodující se výsledky jsou zobrazeny na obrázku 19. Základní materiál tvořila litina GCI FG260. Erozní prostředí bylo nasimulováno vodním paprskem s abrazivními částicemi. Pokus probíhal v lázni roztoku s pH 3 a 7, aby byla zjištěna odlišná míra eroze v prostředí s nižším (kyselějším) pH, jaké je v dolech typické.



Obr. 19 Výsledky měření rentgenovou difrakční metodou XRD [14]



Obr. 20 Míra eroze při různém pH a rychlosti proudu [14]



Obr. 21 Míra eroze při různém pH a úhlu proudu [14]

Obrázek 20 ukazuje, že míra eroze byla jak v případě neošetřené litiny, tak v případě nástřiku NiCrBSi vyšší v prostředí s nižším pH. Tento jev připisují Yoganandh a kol. přítomnosti většího množství vodíkových iontů v kyselém prostředí, které podporují erozní korozi. Míra eroze byla také ovlivněna úhlem, pod kterým působily abrazivní částice na povrch. U tohoto jevu byl pozorován zrcadlově opačný průběh u vzorků s nástřikem a bez něj (viz Obr. 21). Zatímco největší opotřebení bylo u litiny zaznamenáno při ostrém úhlu dopadu 30°, u vzorků opatřených nástřikem došlo k největšímu opotřebení při úhlu dopadu 90°. Rozdíl byl způsoben odlišným mechanismem erozivního opotřebení, který byl u houževnatější

litiny především abrazivní, zatímco u tvrdého NiCrBSi šlo o praskání a vymílání. Při vyhodnocení výzkumu se potvrdilo, že využití žárového nástřiku NiCrBSi ke zpomalení erozivní koroze v důlních podmínkách je opodstatněné. [14]

Tab. 5 Chemické složení nástřiku NiCrBSi [14]

Slitina	Ni	Cr	Si	C	Fe	B
NiCrBSi	Základ	14	4	0,5	4	3

Pozn.: Hodnoty zastoupení jednotlivých prvků jsou uvedeny v hmotnostních procentech.

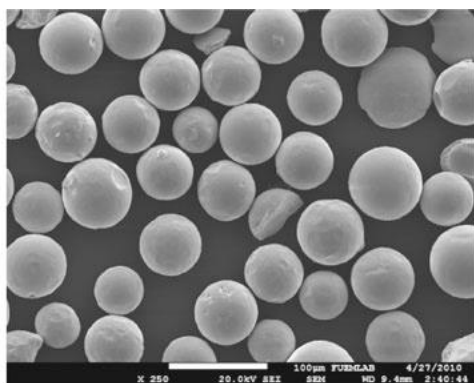
5 Další nástřiky na bázi niklu

Krom již zmíněného nástřiku NiCrBSi existují i další nástřiky, v nichž má majoritní podíl nikl. Ten předurčuje společné vlastnosti všech těchto nástřiků – tedy korozivzdornost a oteruvzdornost, nicméně přidáním dalších prvků se mohou výsledné vlastnosti jednotlivých směsí a slitin lišit.

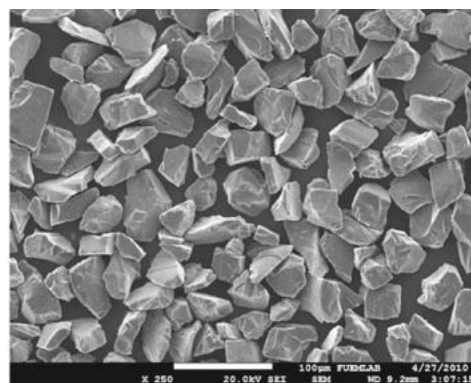
5.1 Nástřik NiCrBSi-SiC

Jedná se o mechanickou směs prášků slitiny NiCrBSi a karbidu křemíku (SiC). Karbid křemíku je ve směsi obsažen za účelem zvýšení tvrdosti výsledného nástřiku. Směs umožňuje při nástřiku dosažení vyšší tvrdosti povlaku se značným zachováním jeho původní houževnatosti. Tato kombinace protichůdných vlastností je realizovatelná díky tomu, že karbid křemíku bude usazen pouze lokálně, čímž vytvoří zrna s vysokou tvrdostí, ale tato zrna budou uložena ve stále stejné matici z nikl chrom bor křemíku. Uskutečnění tohoto ideálního scénáře může bránit rozdílná hustota částic NiCrBSi a SiC, která může vést k nerovnoměrnému rozložení jednotlivých složek v rámci nástřiku. [13, 15]

Krom odlišnosti v hustotě jednotlivých složek nástřiku je rozdílná také jejich materiálová příslušnost, jelikož zatímco NiCrBSi spadá do kovových slitin, SiC je keramický materiál. Tato odlišnost je patrná na morfologii jednotlivých prášků, kdy prášek NiCrBSi bylo možné (díky nižší teplotě tavení) vyrábět rozstřikováním, a tedy vytvořit pravidelné globulární částice, zatímco prášek SiC musel být zpracován mechanickým mletím, a proto vytvořil nepravidelné mnohoúhelníkové částice (viz Obr. 22 a 23). Nástřik NiCrBSi-SiC zkoumali ve svém článku Buytoz a kol. [13]



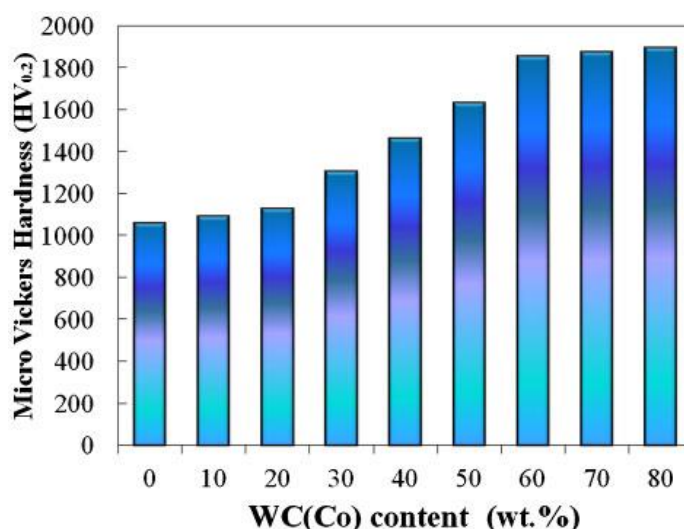
Obr. 22 Morfologie prášku NiCrBSi [13]



Obr. 23 Morfologie prášku SiC [13]

5.2 Nástřík NiCrBSi-WC

Směs slitin NiCrBSi a WC je využívána v případech, kdy je nutno dále zvyšovat tvrdost a otěruvzdornost nástříku NiCrBSi. Karbid wolframu (WC) je velmi tvrdá sloučenina často využívána při výrobě obráběcích nástrojů. Její tvrdost dosahuje na Mohsově stupnici až hodnoty 9, což je méně než u SiC používaném u předchozí nástříkové směsi. SiC dosahuje tvrdosti až 9,5. [16] Pro úspěšnější aplikaci je složka karbidu wolframu doplněna ještě příměsí kobaltu. Ten slouží jako matrice pro WC, aby došlo k lepšímu promísení se složkou NiCrBSi. Pomocí příměsí různého objemového procenta WC(Co) do prášku NiCrBSi dokázali Yao a kol. [17] zvýšit mikrotvrdost nástříku NiCrBSi o 80 % (viz Obr. 24). Směs NiCrBSi-WC je, obdobně jako směs obsahující SiC, náchylná k tvorbě heterogenní vrstvy, kvůli rozdílné hustotě složek.



Obr. 24 Změna mikrotvrdosti nástříku NiCrBSi přidáním WC(Co) [17]

5.3 Nástřík NiCrBSi-Cr₃C₂-NiCr

Tento žárový nástřík spojuje dvě jinak individuálně stříkané slitiny v jednu. Obě složky (NiCrBSi i Cr₃C₂-NiCr) poskytují velmi dobrou korozivzdornost a žáruvzdornost. Proto lze tento nástřík využít ve vysoce korozivním prostředí. Výsledný nástřík vykazuje také vysokou tvrdost (> 1000 HV) díky čemuž může být využit i v mechanicky agresivním prostředí. Kombinace těchto vlastností využili Yang a kol. [18] při zkoumání navýšení odolnosti součástí vůči kavitační erozi. [18]

5.4 Nástřík NiTi

Žárové nástříky vrstvou NiTi se vyznačují, podobně jako další nástříky na bázi niklu, velmi dobrou korozivzdorností a otěruvzdorností. Mimo tyto typické vlastnosti, ale nabízí slitina NiTi mezi niklovými nástříky ojedinělou tvarovou paměť. Povlaky NiTi jsou poměrně problematické jak z hlediska výroby směsi, tak z hlediska nanášení. Jako jedno z neekonomičtějších řešení se nabízí jejich aplikace žárovým stříkáním metodou HVOF, která, na rozdíl například od laser claddingu nebo TIG claddingu, nevyžaduje prášek se slitinou na úrovni molekul, ale dokáže pracovat i s pouhou mechanikou směsi niklových a titanových globulí. Směs musí být ovšem velmi důkladně promíchána. Vlastnostmi nástříku NiTi se ve svém výzkumu z let 2010 a 2014 zabírali Verdian a kol. [19, 20].

5.5 Nástřík Ni5Al

Nástřík Ni5Al je využíván často jako mezivrstva v případech kdy se mechanické vlastnosti základního materiálu a materiálu nástříku liší. Může se jednat například o aplikace kovového žárového nástříku na keramický základní materiál, nebo o opačný scénář. V takovéto situaci by vlivem odlišných teplotních dilatací mohlo při chladnutí dojít k popraskání, nebo až delaminace nástříku od základního materiálu. Nástřík Ni5Al je dobře plasticky deformovatelný i za nižších teplot, a proto je schopen rozdílné dilatace vyrovnávat. Zároveň nabízí dobrou chemickou kompatibilitu v případech, kdy by bez jeho aplikace hrozilo nedostatečné přilnutí nástříku k základnímu materiálu a zachovává si korozní odolnost niklu, díky čemuž vykazuje výsledný nástřík nízkou oxidaci, což dále zlepšuje podmínky pro přilnutí další vrstvy. Za účelem uzavření vnějších pórů 3D výtisku z INCONELu 718 a následnému vysokotlakému spečení využili nástřík Ni5Al aplikovaný metodou HVOF Tillmann a kol. [21]. Pro lepšího přilnutí finálního nástříku Fe17Cr2Ni0,2C využili vrstvu NiAl Liborius a kol. [9] při výzkumu podmínek soustružení nástříku Fe17Cr2Ni0,2C.

5.6 Nástřík Ni20Cr

Jako mezivrstva se využívá také nástřík NiCr. I ten se vyznačuje dobrou korozivzdorností, a to i za zvýšených teplot, díky čemuž vykazuje povlak po nástříku nízkou oxidaci a umožňuje lepší přilnutí finální vrstvy. Nástřík lze ovšem využít i samostatně, je-li od výsledku vyžadována především žáruvzdornost, nebo, v případě dle Tillmanna a kol., [21] je vhodné uzavřít povrchové póry dílu vytištěného SLM metodou kovového 3D tisku před jeho spečením.

6 Obrábění žárových nástříků

K problematice obrábění žárových nástříků na bázi niklu není v současné době k dispozici mnoho zdrojů. V akademických kruzích nejspíš nepřišla ještě na tuto problematiku řada a v praxi si firmy nechávají své know-how pro sebe.

Jedny z mála dostupných zdrojů pochází z RTI Západočeské univerzity v Plzni, nebo jsou na tamní výzkumný program navázány.

Na frézování kulové plochy opatřené nástříkem NiCrBSi aplikovaným metodou HVOF se v článku z roku 2020 zaměřil Valíček a kol. [2, 22]. Jako základní materiál byla zvolena ocel EN 10060 (nebo také 34CrNiMo6, nebo ČSN 16 343). Jak bylo řečeno, předmětem článku bylo frézování kulové plochy (přesněji kulové úseče o průměru 50 mm a výšce 15 mm [22]). Tato plocha je díky svému tvaru náročnější na proces nanášení nástříku, má-li být výsledný povlak stejnoměrný. Je proto nezbytné provádět nástřík pomocí robota. Zkoumané parametry byly: posuv na zub - f_z ; řezná rychlost - v_c a hloubka řezu - a_p . Hodnotícími kritérii byla drsnost obrobené plochy, tvrdost a adheze zbylého povlaku. Celkem bylo provedeno 15 zkušebních řezů na 15-ti obrocích. Těchto 15 řezů bylo rozděleno do 5 experimentů, z nichž každý experiment byl prováděn novým břitem vyměnitelné břitové destičky, aby byla ve výsledku zohledněna i životnost břitu za daných podmínek. Obrábění probíhalo po šroubovici s postupným nájezdem do řezu a se stoupáním 0,1 až 0,3 mm. [22] Za vyšších řezných rychlostí (nad 500 m/min) byly řezné síly příliš vysoké, což vedlo až k zastavení stroje. Při rychlostech pod 500 m/min docházelo naopak k nestabilnímu obrábění. Nestabilní obrábění mělo za následek vznik vrypů a obecně nerovností v obrobené ploše. Nejlepších hodnot drsnosti se zachováním požadované adheze povlaku bylo dosaženo, když se f_z a a_p pohybovali v rozmezí 0,2 – 0,3 mm. Krom určení nejvhodnějších řezných podmínek pro obrábění použitého žárového nástříku se článek zaměřoval z velké části také na vytvoření matematických modelů závislosti vlastností obrobené plochy na řezných podmínkách. Výsledkem bylo několik funkcí

popisujících vztah mezi řeznými podmínkami (f_z , v_c , a_p) a parametry obrobené plochy (drsnost, tvrdost a adheze), z nichž byla dále odvozena závislost pevnosti v tahu na proměnných parametrech. Výsledky jednotlivých pokusných řezů spolu s teoreticky vypočtenými výsledky jsou k vidění v tabulce 6. [2]

Tab. 6 Parametry obrobené plochy po jednotlivých řezech [2]

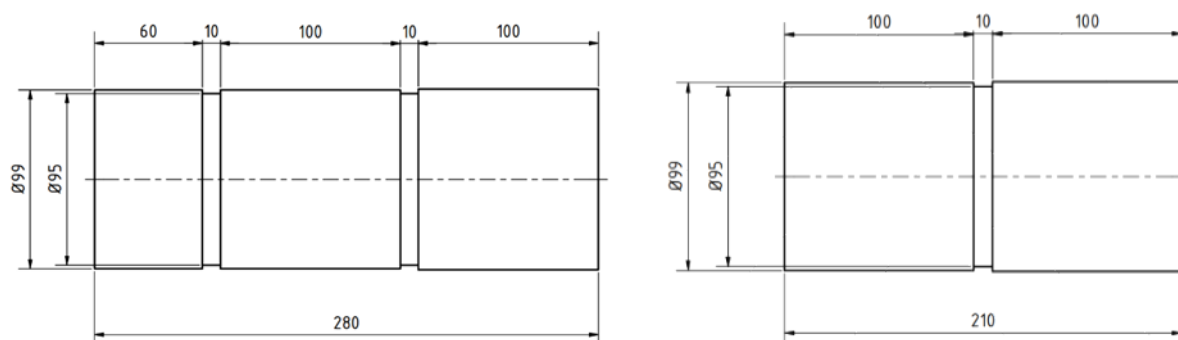
Číslo pokusu	v_c [m/min]	f_z [mm/ot]	a_p [mm]	R_a skut [μ m]	R_a teor. [μ m]	Adheze [MPa]
1	700	0,15	0,15	3,56	2,99	165
2	450	0,15	0,15	1,94	1,63	90
3	500	0,15	0,15	2,27	1,9	105
4	400	0,15	0,15	1,62	1,36	75
5	500	0,2	0,2	5,99	5,03	277
6	500	0,1	0,1	1,04	0,87	48
7	500	0,25	0,25	11,01	9,25	509
8	500	0,3	0,3	17,81	14,96	824
9	500	0,2	0,25	6,96	5,85	322
10	500	0,2	0,3	8,42	7,07	389
11	500	0,25	0,2	6,64	5,58	307
12	500	0,25	0,3	8,42	7,07	389
13	500	0,3	0,2	11,66	9,79	539
14	500	0,3	0,25	14,57	12,24	674
15	500	0,25	0,25	10,69	8,98	494

Soustružením povlaku NiCrBSi se zabíral v posledním výzkumu Řehoř a kol. [23]. Pro účely výzkumu obrábění žárových nástřiků byl využit speciálně navržený vícebřitý nástroj zhotovený pomocí technologie kovového 3D tisku. Nástroj byl navržen jako víceúčelovým pro použití při frézování i soustružení. Pro účely soustružení je nutné nástroj upnout do frézovacího vřetena soustružnicko-frézovacího centra, což na jednu stranu zužuje skupinu využitelných strojů pro účely soustružení, ale na druhou stranu umožňuje v případě opotřebení břitu rychlou výměnu využívané břitové destičky pouhým pootočením nástroje. Účelem tohoto výzkumu bylo zvýšení produktivity procesu obrábění žárového nástřiku o alespoň 30 % oproti předešlým výsledkům dosahovaným pomocí broušení. Hodnotícími kritérii řezných podmínek a vhodnosti nástroje byla drsnost obrobené plochy a životnost břitu nástroje. Materiálem nástřiku byla slitina NiCrBSi (chemické složení viz Tab. 7). Jako polotovár byl zvolen válec o průměru 100 mm (včetně nástřiku) a délce 500 mm (později rozdělen na díly 280 mm a 210 mm z důvodů nedostatečné tuhosti upnutí v místě podepření obrobku hrotem) z materiálu ČSN 12 050. Zkušební oblasti byly odděleny zápichy o šířce 10 mm. [23]

Tab. 7 Chemické složení nástřiku NiCrBSi [23]

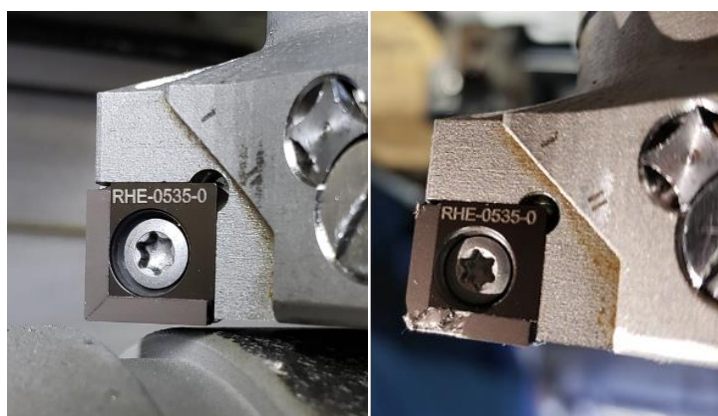
Slitina	Ni	Cr	Si	C	Fe	B	O
NiCrBSi	Základ	15,16	4,65	0,76	3,87	3,19	0,043

Pozn.: Hodnoty zastoupení jednotlivých prvků jsou uvedeny v hmotnostních procentech.



Obr. 25 Rozměry již rozděleného polotovaru před nástřikem [23]

Při pokusech bylo využito VBD čtvercového tvaru z materiálů: PCBN, CVD-D a SK IC20. Jelikož je nástřik NiCrBSi velmi tvrdý, je i jeho obrábění obtížné. Břit, a především špička nástroje, jsou vystaveny velkým řzným silám, což způsobovalo vylamování VBD, především u destiček z PCBN od firmy Rotana, které mají řznou část tvořenou pájenými segmenty z CBN. Segmenty se setkávají ve špičce (viz Obr. 26 vlevo), ale nejsou tam spojeny, čímž vzniká slabé místo, kde zpravidla došlo k vylomení (viz Obr. 26 vpravo). [23]

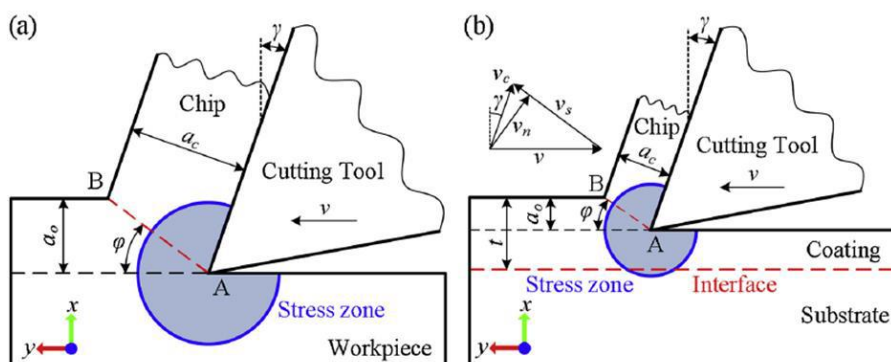


Obr. 26 Opotřebení VBD Rotana [23]

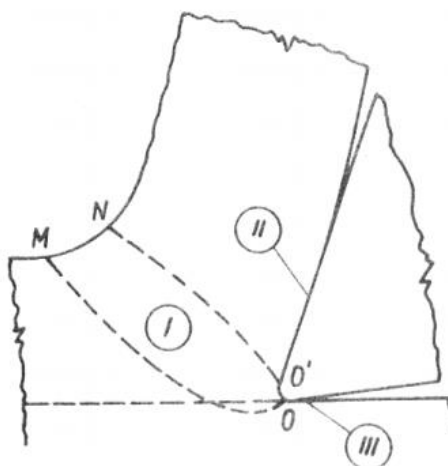
Za účelem přenosu zatížení, ze špičky na plochu ostří, byla zařazena korekce polohy osy Y. Tímto došlo k přechodu od obrábění špičkou nástroje k obrábění lineární řznou hranou. Dále bylo namáhání břitu rozloženo na větší část jeho délky pomocí progresivního posuvu v ose Y během řezu. [23]

Kromě namáhání špičky VBD docházelo u všech využívaných materiálů destičky k omílání a vyštipování břitu, a to především u VBD bez fazetky. U destiček, které měly na břitu vytvořenou fazetku, došlo k odstranění nejtenčí a nejslabší části břitu, a tím došlo k jeho zpevnění. Na druhou stranu může fazetka působit i negativně, neboť limituje minimální hloubku řezu svým vlastním rozměrem. Pokud není hloubka řezu a_p větší než rozměr fazetky, začne fazetka v řezu vystupovat jako čelo nástroje a jelikož má negativní úhel, dojde k znatelnému nárůstu řzného odporu. Toto omezení nemusí být problematické při obrábění běžných materiálů, kde se využívá větších hloubek řezu, nicméně u žárových nástřiků, které

jsou tvrdé a tenké, už hraje toto omezení roli. Je nutno zvolit a_p v takovém rozmezí, aby převyšovalo rozměr fazetky, a přitom nezpůsobovalo průnik oblasti terciální plastické deformace až do základního materiálu. Pokud by totiž zasáhla terciální plastická deformace za hranice nástřiku, mohlo by vlivem odlišné meze kluzu obou materiálů dojít k popraskání nástřiku, nebo dokonce k jeho oddělení. Při experimentech se využívalo fazetek o délce v rámci jedné až dvou a půl desetin mm se záporným úhlem 5° , 10° a 20° . [23, 24]



Obr. 27 Dosah oblastí plastické deformace [25]



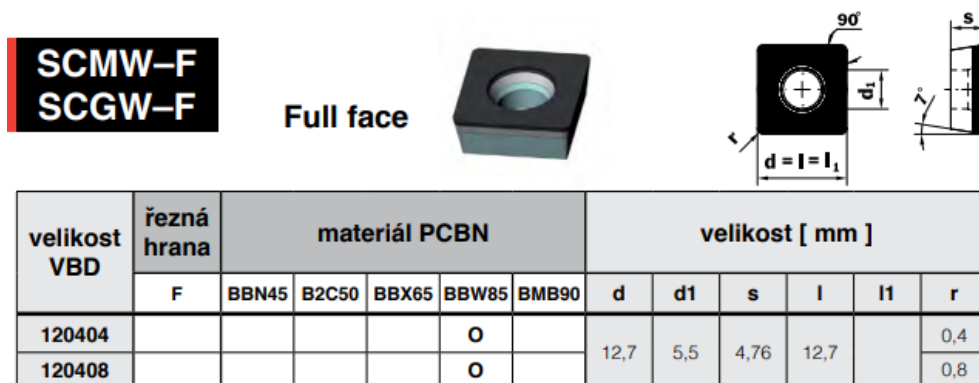
Obr. 28 Oblasti deformací při třískovém obrábění [26]

Ze všech zkoušených VBD bylo obecně nejlepších výsledků dosaženo s destičkou s full-face pájeným řezným segmentem z 80% kubického nitridu boru a fazetkou $0,1 \times 20^\circ$ od firmy Bonar (označení: SCMW-F 120408). Díky full-face provedení a využití fazetky je břit této destičky velice tuhý. S touto destičkou bylo dosaženo drsnosti obrobené plochy $R_a < 0,4 \mu\text{m}$ a úběru materiálu $491,5 \text{ cm}^2/\text{min}$. Srovnáme-li úběr při soustružení s úběrem při broušení ($U_{br} = 100 \text{ cm}^2/\text{min}$) vychází minimální uspokojující výsledek výzkumu na $130 \text{ cm}^2/\text{min}$ (navýšení o 30 %), nicméně skutečný výsledek převyšuje produktivitu při broušení téměř 4krát. Zmínovaných výsledků bylo dosaženo s řeznou rychlostí vyšší než $900 \text{ m}/\text{min}$, což zařazuje provedené obrábění do kategorie vysokorychlostního obrábění (HSC). Přesné podmínky obrábění jsou sepsány v tabulce 8. [23, 27]

Krom toho, že se zmíněná destička od firmy Bonar ukázala jako nejlepší z testovaných destiček vzhledem ke kvalitě obrobené plochy a trvanlivosti břitu, je to také jediná z použitých destiček, která má CBN segment po celé ploše čela (proto full-face) viz Obr. 29. Díky tomu a čtvercovému tvaru destičky ji lze jako jedinou v držáku otáčet a tím pádem využít všechny 4 její řezné hrany, což má pozitivní ekonomický a ekologický dopad.

Tab. 8 Řezné podmínky při HSC soustružení [23, 27]

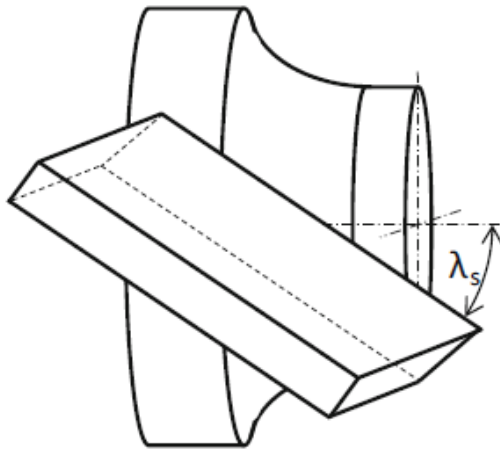
Typ VBD	CBN 0,1 x (-20°)
Řezná rychlost	$v_c = 983$ m/min
Posuv na otáčku	$f_{ot} = 0,05$ mm
Úhel sklonu ostří	$\lambda_s = 70^\circ$
Typ chlazení	Vzduch
Dosažená drsnost povrchu	$Ra < 0,4$ μ m
Opotřebení po 500 mm	0,082 mm
Zvýšení účinnosti procesu	391,5 %



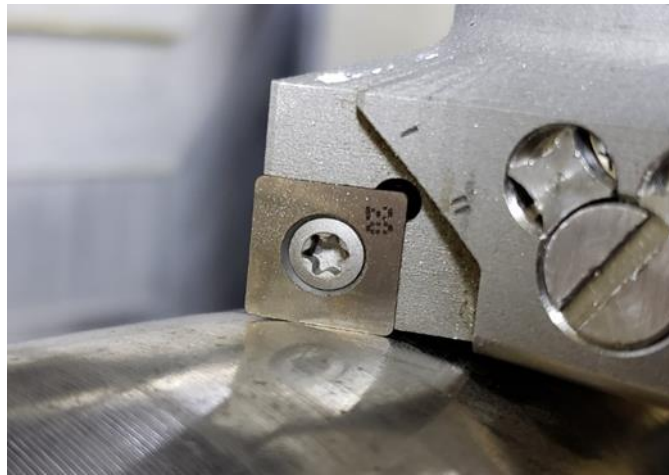
Obr. 29 Bonar SCMW-F 120408 [28]

6.1 Obrábění lineární řeznou hranou

Obrábění lineární řeznou hranou je v současné době nepříliš konvenční způsob obrábění, respektive způsob polohování břitu nástroje do řezu. Zatímco v běžné praxi se při řezání využívá špička a část břitu nástroje, u obrábění lineární řeznou hranou špička do řezu nevstupuje. Obě špičky (tedy přechodové body mezi hlavním a vedlejším ostřím) břitové destičky, nebo segmentu, se nachází mimo oblast oddělování třísky (viz Obr. 31). Takového stavu je dosaženo pomocí napolohování břitu nástroje tangenciálně k obráběné ploše s tím, že břit je s osou obrobku mimoběžný a svírá s ní úhel λ_s (viz Obr. 30, 31).



Obr. 30 Úhel λ_s při obrábění lineární řeznou hranou [29]



Obr. 31 Poloha VBD při obrábění lineární řeznou hranou; $\lambda_s \neq 0$ [23]

Fakt, že je nástroj zatížen v rámci břítu, a ne na jeho koncích značně přispívá k jeho tuhosti a lepšímu rozložení řezné síly, ale zároveň i k jejímu nárůstu. Ten by byl nejvyšší v případě, kdy by byl úhel nastavení hlavního ostří λ_s roven 0° - břit nástroje zabírá v celé své délce a je rovnoběžný s osou obrobku. V této situaci by vlivem řezných sil došlo s největší pravděpodobností k destabilizaci a rozvibrování nástroje.

Nástroje s lineární řeznou hranou jsou vhodné pro koncepci vysokoposuvového obrábění (HFM). Vysoká posuvová rychlost poskytuje nástroji dostatečnou tloušťku třísky, díky čemuž se nástroj stabilizuje a nedochází k jeho rozkmitání. [29]

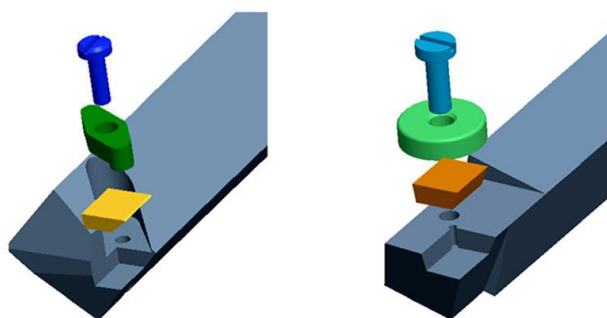
Další výhodou obrábění lineární řeznou hranou je možnost postupného posouvání aktivní části břítu. Díky tomu lze dosáhnout rovnoměrného opotřebení a úplného využití VBD, čehož nelze u konvenčního obrábění špičkou nástroje dosáhnout, pokud nezvolíme extrémní případ, kdy se šířka odebírané vrstvy bude rovnat délce břítu. V tomto krajním případě je sice do řezu zapojen celý břit, ale na rozdíl od případu lineární řezné hrany zabírá celý břit najednou, což razantně zvýší řezné síly a tím pádem i nároky na tuhost celé soustavy SNOP (Stroj, Nástroj, Obrobek, Přípravek). Obrábění lineární řeznou hranou umožňuje postupné posouvání oblasti řezu po břítu nástroje pomocí pohybu v ose Y. Tato strategie byla aplikována při obrábění nástřiku NiCrBSi v článku Řehoř a kol. [23], nicméně její využití je podmíněno tím, že obrábění musí být prováděno na stroji schopném pohybu i v ose Y (například soustružnicko-frézovací centrum).

Mezi další výhody obrábění lineární řeznou hranou patří snadné broušení nástroje, který díky tomu, že neobrábí špičkou, stačí brousit pouze na hřbetě (není nutno brousit špičky). Naopak poměrně významnou překážkou při využití této koncepce obrábění může být fakt, že lze obrábět pouze vnější válcové plochy, které nenavazují na osazení s větším průměrem. Obrábění jiných, než válcových ploch je problematické z hlediska nájezdu a výjezdu z řezu. [29]

Monka a kol. [29] se ve svém článku z roku 2016 zaměřovali na srovnání výsledků komerčních nástrojů s nástroji s lineární řeznou hranou. Testovány byly 4 nástroje. Dva s lineární řeznou hranou (viz Obr. 32) a dva s VBD (kosodélníkového a trojúhelníkového tvaru). Zkušební řezy byly prováděny na válcovém polotovaru o průměru 170 mm vyrobeném z oceli ČSN 12 050.1. Článek konkrétně porovnával jednotlivé nástroje z hlediska maximálního profilu drsnosti obrobenej plochy (R_z), velikosti řezných sil a trvanlivosti břítu nástroje (tomuto poslednímu testu byly podrobeny jen dva nástroje, které z předešlých testů

vyšly jako nejlepší) za různých řezných podmínek. Velikost maximálního profilu drsnosti obrobeneé plochy byla zkoumána dvakrát, s tím, že druhý experiment byl proveden jen se dvěma nejúspěšnějšími nástroji a na ocelích třech různých tříd (ČSN 12 050.1; 14 109.3; 17 241).

Ve výsledku se potvrdilo, že nástroje s lineární řeznou hranou dosahují nejlepších výsledků za vyšších posuvových rychlostí a s vhodnou geometrií břitu svými výsledky značně předčí komerčně dostupné nástroje. Na druhou stranu působí při obrábění lineární řeznou hranou vyšší řezné síly, což má za následek větší energetickou spotřebu stroje a větší nároky na jeho konstrukci. Z hlediska trvanlivosti jsou na tom také komerční nástroje lépe, nicméně vezme-li se v potaz vyšší možný úběr materiálu, které je s nekomerčními nástroji možný, jsou na tom z hlediska množství odebraného materiálu za svou životnost oba druhy nástrojů zhruba stejně. Krom samotného srovnání je výsledkem článku i odvozená sada rovnic vyjadřujících závislost maximálního profilu drsnosti obrobeneé plochy a velikosti jednotlivých složek řezné síly na řezných podmínkách (konkrétně v_c a f). Nástroje s lineární řeznou hranou byly navrženy přímo v ústavu, kde autor působí a jejich geometrické parametry jsou zaznamenány v tabulce 9. [29]



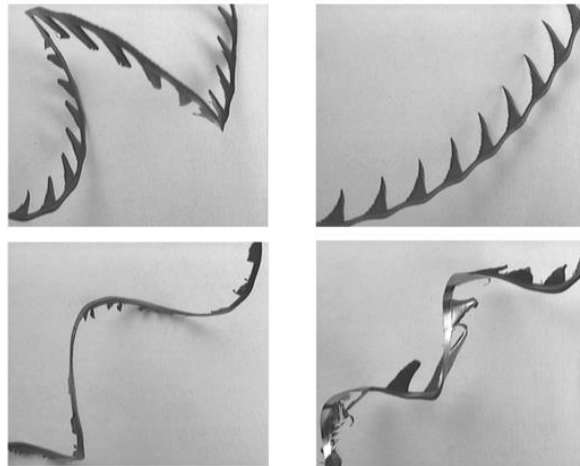
Obr. 32 Nástroje s lineární řeznou hranou [29]

Tab. 9 Parametry nástrojů s lineární řeznou hranou [29]

Parametry	Nástroj A	Nástroj B
Úhel čela v rovině ortogonální; Břit 1	0°	0°
Úhel čela v rovině ortogonální; Břit 2	40°	45°
Úhel hřbetu v rovině ortogonální; Břit 1	20°	20°
Úhel hřbetu v rovině ortogonální; Břit 2	10°	10°
Úhel sklonu Ostří 1	40°	45°
Úhel sklonu Ostří 2	0°	0°
Rádus špičky	0,5 mm	0 mm
Rádus ostří	0,05 mm	0,03 mm
Fazetka	0,2 mm	0 mm

Pozn.: Nástrojové úhly jsou rozděleny do skupin pro břit jedna a dva, neboť oběma břity těchto nástrojů lze obrábět a nelze říct, který je hlavní a který vedlejší.

Článek obsahoval také fotodokumentaci tvaru vytvořené třísky pro všechny použité nástroje a kombinace řezných podmínek. Nástrojem A byla tvořena ve většině případů dlouhá šroubovitá tříska. Tvoření dlouhých třísek není z hlediska třískového hospodářství v praxi žádoucí, a proto by za účelem zlepšení bylo nutno zařadit nějaký mechanismus dělení třísky (např. vytvoření utvařeče třísky na čele řezného nástroje). Pozoruhodný byl tvar třísek tvořených při většině řezů nástrojem B. Třísky vykazovaly stužkovitý, až šroubovitý tvar s pravidelným a mnohdy i markantním zubovým vzorem ve směru šířky třísky (viz Obr. 33), nicméně příčina ani rozbor tvaru třísek nebyly v článku bohužel uvedeny.



Obr. 33 Ukázka tvaru třísky tvořené nástrojem B [29]

Na právě zmíněný výzkum volně navazuje článek od K. Monkové [30], který řešil drsnost obrobené plochy (R_a , R_z) po obrábění válcového polotovaru (průměr 200 mm) z polyamidu APA nástrojem s lineární řeznou hranou. Při těchto experimentech bylo nejlepšího výsledku dosaženo za nejvyšší zkoušené řezné rychlosti $v_c = 70$ m/min a nejnižšího posuvu $f = 0,18$ mm/ot. Za těchto podmínek byla drsnost obrobené plochy $R_a = 1,03$ μ m. Řezná rychlost vystupovala v případě tohoto experimentu jako limitující faktor z důvodu generovaného tepla v místě řezu, které by mohlo způsobit natavování obráběného materiálu a tím pádem razantní zhoršení podmínek v místě řezu. Posuv je na první pohled v rozporu se zjištěním předchozího článku a sice, že za vyšších hodnot posuvů je řez stabilnější a je dosahováno lepších výsledků, ale tato nesrovnalost by se dala odůvodnit změnou obráběného materiálu, který je v tomto případě houževnatější a poddajnější, a tedy bude klást i nižší řezný odpor. Geometrie použitého nástroje je téměř stejná jako v případě nástroje A z předešlého článku s tím rozdílem, že úhly γ_0 a λ_s byly zvýšeny na 45°. [30] Zvýšení úhlu γ je žádoucí při obrábění houževnatých materiálu s nízkou teplotou tavení, jelikož snižuje míru tření mezi třískou a čelem nástroje a tím pádem umožňuje lepší odchod třísky.

6.2 Vysokorychlostní obrábění - HSC

Režim obrábění HSC neboli vysokorychlostní obrábění (z angl. High Speed Cutting), spočívá v obrábění řeznými a posuvovými rychlostmi několikanásobně vyššími než při klasickém obrábění. Řezné rychlosti se pro představu pohybují od 600 m/min až do 18 000 m/min (v krajních případech). Stroje určené pro tento režim obrábění lze poznat rychle podle poměru výkonu a maximálních otáček vřetena. Tento poměr bude u strojů pro HSC obrábění výrazně nižší než u strojů pro konvenční obrábění. [31, 32]

Cílem HSC obrábění je zvýšení produktivity a možností procesu obrábění. Zvýšením posuvových a řezných rychlostí dojde ke snížení hlavních časů obrábění, ale zároveň je zachována, nebo dokonce zlepšena kvalita obrobené plochy. Po překročení konkrétní hodnoty

řezné rychlosti (závislé na druhu obráběného materiálu) dojde k náhlé změně fyzikálních a chemických vlastností, která vyústí v to, že se materiál začne dělit v třísku přímo v rovině stříhu, a to za působení vysoké teploty, která ještě přispívá k lepšímu oddělování třísky (řezný odpor obráběného materiálu v místě řezu s rostoucí teplotou klesá). Dochází také k menšímu pěchování třísky a zmenšení jejího průřezu, díky čemuž klesají velikosti řezných sil, a to až o jednu třetinu. V třísce také odchází naprostá většina vyprodukovaného tepla, díky čemuž nedochází k tepelnému ovlivnění nástroje, ani obrobené plochy, a tedy nedochází ke vzniku zbytkových pnutí, či hrubnutí zrna. Množství tepla v třísce je tak vysoké, že se její teplota blíží, nebo je dokonce rovna teplotě tavení (viz barva třísky na obrázku 34). Pokud dosáhne teplota třísky teploty tavení, dojde na její vnitřní straně ke vzniku tekuté vrstvy, která klouže po čele nástroje, a dále snižuje velikost součinitele tření mezi třískou a čelem nástroje. [31, 33, 34]



Obr. 34 HSC soustružení nástrojem s VBD z CBN [35]

Díky snížení řezných sil a lepšímu odchodu třísky způsobeným zvýšenou teplotou v místě řezu je možné obrábět v režimu HSC i materiály, které by jinak bylo možné úspěšně obrábět pouze broušením. Mezi takové materiály spadají právě žárové nástříky na bázi niklu, nebo také kalené oceli, nicméně si obrábění tvrzených materiálů vyžádá využití nástroje s řezným segmentem z kubického nitridu boru (CBN), nebo podobně tvrdým segmentem či povlakem. Kubický nitrid boru je díky své tvrdosti schopen obrábět materiály s tvrdostí vyšší než 60 HRC a tuto svou vlastnost si stabilně zachovává až do 2000 °C. Na rozdíl od diamantu je pomocí CBN možno obrábět i železné slitiny, které jsou diamantem kvůli vysoké afinitě uhlíku k železu neobrobitelné. Režim HSC je schopný do určité míry nahradit broušení, a to nejen z hlediska možnosti obrábět tvrzené materiály, ale i z hlediska dosahované drsnosti obrobené plochy, která může být až 0,25 μm (R_a). [31, 35]

Jelikož je při HSC obrábění vysoká teplota v místě řezu žádoucí, vyhovuje tento režim moderním trendům čistého a suchého obrábění, což jej činí velmi atraktivním jak z ekonomického, tak z ekologického hlediska. Náklady na řeznou kapalinu mohou totiž tvořit až 17 % ceny výsledného produktu a řezná kapalina bývá většinou poměrně ekologicky nebezpečná. [31]

Při řezných podmínkách příslušících k vysokorychlostnímu obrábění se nabízí myšlenka, že proces bude nestabilní a bude docházet k vibracím, ovšem k tomuto nedochází tak často jak by se mohlo zdát díky nižším řezným silám. Nicméně i v případě, že by ke vzniku vibrací došlo, byl by jejich dopad utlumen díky tomu, že s vyšší řeznou rychlostí (a tedy i otáčkami

obrobku/nástroje) je přímo spjatá vyšší frekvence vibrací, která bude od rezonanční frekvence dobře utlumeného a tuhého stroje značně vzdálená. K rezonanci stroje tedy nedojde. [31]

Mezi nevýhody vysokorychlostního obrábění bez pochyby spadají vysoké nároky na stroj. Ten nejen, že musí být velmi tuhý a přesný, ale musí být také konstrukčně schopen dosahovat řezných a posuvových rychlostí pro HSC obrábění nezbytně nutných. Konstrukce stroje musí umožňovat regulaci otáček vřetena u frézek v rozmezí od 10 000 do 80 000 ot/min, u soustruhů od 5 000 do 15 000 ot/min s výkonem až 60 kW. Suporty a polohovací zařízení musejí být schopné vyvinout rychlosti až 120 m/min při zrychlení až 2 g. [31]

7 Obrábění slitin na bázi niklu

Niklová báze a s ní spojené pozitivní materiálové vlastnosti nejsou využívány pouze v oboru žárových nástřiků, ale své místo našli také v oblasti moderních super-slitin (slitiny spadající do skupiny materiálů ISO S), mezi něž patří především INCONELY. Z tohoto důvodu budou nyní zmíněny i strategie obrábění niklových slitin obecně.

7.1 Obrábění slitin na bázi niklu vzniklých pomocí aditivní technologie

Právě zmíněné INCONELY jsou také často využívány jako materiál pro kovový 3D tisk, který, stejně jako technologie žárových nástřiků, spadá do skupiny aditivních technologií. Díly vzniklé pomocí aditivních technologií vykazují společné znaky, jako například pórovitost, a proto lze znalosti z obrábění kovových 3D výtisků z INCONELu do jisté míry využít i při obrábění žárových nástřiků na bázi niklu.

Soustružením INCONELu 718 vzniklého pomocí metody kovového 3D tisku se zabývali ve výzkumu v roce 2020 Řehoř a kol. [36]. Předmětem jejich výzkumu bylo navrhnout postup soustružení 3D tištěného INCONELu 718 tak, aby byla zachována, nebo zvýšena doposud dosahovaná kvalita obrobeného povrchu, a přitom aby došlo ke zvýšení produktivity obrábění. Za účelem splnění těchto cílů bylo rozhodnuto využít VBD ze slinutého karbidu s aplikovanou vrstvou ta-C v režimu vysokoposuvového obrábění (HFM) pomocí lineární řezné hrany. Kombinace vyšší posuvové rychlosti a obrábění lineární řeznou hranou se ukázala jako vhodná i podle dalších zdrojů [29]. Vrstva ta-C byla na VBD aplikována pomocí fyzikální depozice z plynné fáze (PVD) po upravení mikro-geometrie břitů. Úprava mikro-geometrie spočívala ve zvýšení úhlu čela (z 0° na +10°) a omletí ostří za účelem dosažení přesného a většího rádiusu ostří. Ta-C vrstva neboli vrstva diamantu podobného uhlíku, byla využita za účelem zvýšení tvrdosti a otěruvzdornosti břitů a za účelem snížení koeficientu tření především na čele VBD. Krom úprav VBD musel být pro účely HFM obrábění lineární řeznou hranou navržen unašeč VBD. Ten byl navržen jako soustružnicko-frézovací hlava s možností upnutí 4 destiček současně a s možností nastavit proud chladicí kapaliny nezávisle pro každou VBD. Nástroj byl zhotoven pomocí technologie kovového 3D tisku metodou DMLS stejně jako byly zhotoveny i polotovary. Ve výsledku bylo dosaženo 20% nárůstu produktivity obrábění INCONELu 718. Také se ukázalo, že navržená technologie předčí dostupné komerční možnosti třískového obrábění INCONELu (srovnání bylo provedeno s nástroji od firmy Iscar) a to především ve velikosti možného posuvu, který byl s navrženým systémem až 8krát vyšší, a také v možnosti obrábět malými, až velmi malými hloubkami řezu (v rámci setin mm). Navržený nástroj a využití VBD tvaru S (čtvercový tvar) umožnili oproti komerčním možnostem obrábění čtyřmi, respektive osmi řeznými hranami (jelikož při obrábění lineární řeznou hranou šlo každý břit VBD použít 2krát). Navíc lze vzhledem ke čtyřem osazeným destičkám v navrženém nástroji obrábět prakticky nepřetržitě po dobu životnosti čtyř břitů (po otupení jednoho břítu stačí nástroj ve vřeteni pootočit, k čemuž není zapotřebí zásah obsluhy stroje). Z kombinací řezných podmínek se jako nejlepší z hlediska kombinace rozměrové přesnosti obrobené plochy,

její drsnosti a z hlediska opotřebení ukázali hodnoty uvedené v tabulce 10. S těmito parametry bylo dosaženo střední hodnoty drsnosti $R_a = 1,2 \mu\text{m}$ a střední rozměrové přesnosti $0,024 \text{ mm}$. [36]

Tab. 10 Nejvhodnější řezné podmínky [36]

Řezná rychlosti v_c [m/min]	Hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na otáčku f_{ot} [mm/ot]	Úhel sklonu ostří λ_s [°]	Rádius ostří r_n [μm]
60	0,05	0,8	50	20

7.2 Broušení slitin na bázi niklu

Slitiny na bázi niklu, mezi které patří především INCONELové slitiny, vykazují stejné klíčové vlastnosti jako žárové nástřiky na stejné bázi, tedy korozivzdornost, žáruvzdornost a oteruvzdornost spolu s relativně vysokou tvrdostí a tendencí k deformačnímu zpevnování. Z tohoto důvodu jsou, stejně jako zmíněné žárové nástřiky, těžko obrobitelné a stejně jako nástřiky jsou hojně obráběny nástrojem s nedefinovanou geometrií břitu – nejčastěji přímo broušením. Problémem technologie broušení je její nízká produktivita způsobená typickou malou hloubkou řezu a vysokou náročností stroje (tuhost, přesnost...) v kombinaci s velkým množstvím vyprodukovaného tepla, které vytváří v obrobené ploše tahová zbytková napětí. Taková napětí jsou u obrobeného dílu nežádoucí, neboť mají tendenci zvětšovat případné formující se trhliny, místo toho, aby je uzavírali (jako se tomu děje u tlakových zbytkových napětí vzniklých při obrábění nástrojem s definovanou geometrií břitu), což vede ke snížení únavové pevnosti, a tedy i k poklesu životnosti dílu. Na druhou stranu je nespornou výhodou technologie broušení kvalita obrobené plochy a její rozměrová přesnost, které lze nástroji s definovanou geometrií břitu dosáhnout hůře (nicméně dosáhnout ji lze, jak dokázali Řehoř a kol., při soustružení nástřiku NiCrBSi [23]). [37]

Vliv parametrů broušení na výslednou kvalitu obrobené plochy INCONELu 718 zkoumal Ruzzi a kol. [38]. Při výzkumu se zaměřovali na sledování změn topografických vlastností obrobené plochy (konkrétní sledované hodnoty viz Tab. 11) v závislosti na změně hloubky řezu (a_e), posuvu obrobku (v_w), obvodové rychlosti kotouče (v_s) a zrnitosti brusného kotouče. Polotovary byly broušeny na rovinné brusce obvodem kotouče z karbidu křemíku (SiC). Rozsah variování řezných podmínek je k vidění v tabulce 12. Parametry byly variovány vždy jednotlivě, tzn. jeden parametr je postupně měněn v celém svém rozsahu, zatímco ostatní parametry jsou zachovávány konstantní.

Tab. 11 Sledované veličiny [38]

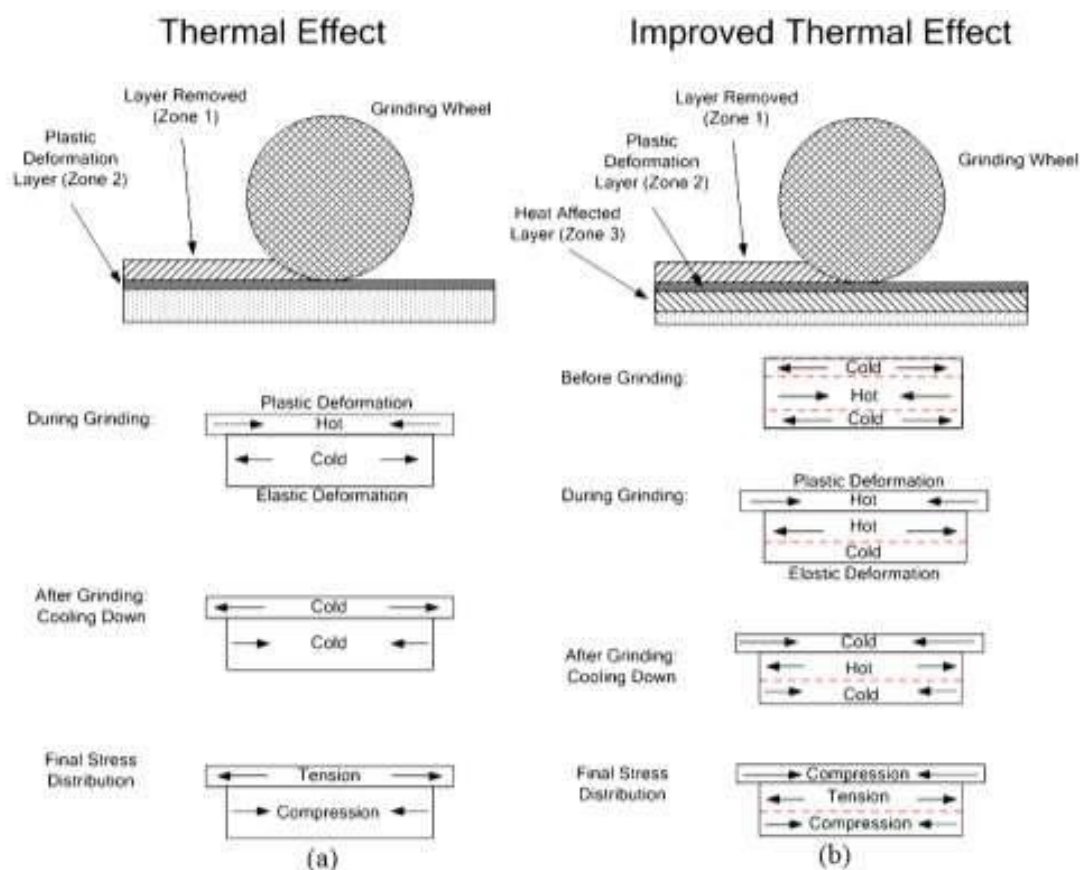
Veličina (zkratka)	Definice
R_a	Střední aritmetická odchylka profilu
R_z	Maximální výška profilu drsnosti
R_{sk}	Rozložení amplitudy - Zkreslenost
R_{ku}	Rozložení amplitudy - Strmost
R_{pk}	Redukovaná výška vrcholů
R_k	Drsnost jádra
R_{vk}	Redukovaná hloubka údolí

Tab. 12 Variované parametry broušení [38]

Parametr	Variační rozsah
Hloubka řezu (a_e)	0,01 – 0,03 mm (po jednotkách setin mm)
Posuv obrobku (v_w)	5 000 – 10 000 mm/min (po 2500 mm/min)
Obvodová rychlost kotouče (v_s)	10 - 30 m/s (po 10 m/s)
Zrnitost kotouče	60; 80; 100

Po provedení všech experimentů se ukázalo, že hloubka řezu má obecně negativní vliv na kvalitu obrobené plochy. Navýšením a_e došlo k nárůstu řezných sil a zhoršení drsnosti. Docházelo také k rychlejšímu otupování zrn brusného kotouče. Zvyšování rychlosti posuvu obrobku způsobilo jen mírný nárůst řezných sil daný zvýšeným úběrem materiálu. Při dosažení hraniční hodnoty posuvu (10 000 mm/min) došlo ke zvýšení drsnosti obrobené plochy. Nejlepších hodnot drsnosti bylo dosaženo při posuvu obrobku rychlostí 7 500 mm/min. Zvyšování obvodové rychlosti kotouče vedlo k dosažení lepších hodnot drsnosti obrobené plochy, ale také k nečekanému nárůstu řezných sil. Nárůst řezných sil byl spojený s materiálovými vlastnostmi niklových slitin vlivem deformačního zpevnění. Jelikož přicházela zrna kotouče do kontaktu s plochou řezu častěji, vkládala do ní více plastické deformace, čímž došlo k deformačnímu zpevnění obráběného materiálu a nárůstu řezných sil (a to především tangenciální složky řezné síly, téměř o 300 %). Velké množství deformace vložené do obráběné plochy je typické pro metody obrábění nástrojem s nedefinovanou geometrií břitu, jelikož geometrie zrn bývá často negativní a tím klade při obrábění velký odpor, který se projevuje jak ve formě tepla, tak ve formě plastické deformace vložené do obrobku. Jako nejvhodnější kombinace podmínek z hlediska drsnosti obrobené plochy se ukázalo zachování nejnižších hodnot hloubky řezu a posuvu ($a_e = 0,1$ mm; $v_w = 5 000$ mm/min) ve spojení s nejvyšší obvodovou rychlostí ($v_s = 30$ m/s) a střední zrnitostí (80) kotouče. [38]

Problematiku broušení INCONELu 718, respektive přímo problematiku zbytkových napětí při tomto obrábění řešili Pei-zhuo a kol. v roce 2017 [37]. Jejich výzkum byl zaměřený na fyzikální nasimulování rozložení tepla v obrobku a návrh postupu, jakým by bylo možné dosáhnout po broušení přítomnosti tlakového zbytkového napětí. Vzhledem k mechanismu vzniku tahového napětí po broušení, který spočívá ve vysoké teplotě a následném rychlém chladnutí obrobené plochy navrhl Pei-zhuo a kol. využít lokálního indukčního ohřev polotovaru v místech před brusným kotoučem. Ohřev byl nastavený tak, aby došlo ke vzniku zdroje tepla v určité vzdálenosti pod povrchem obrobku. Teplo z tohoto zdroje odchází z materiálu pomaleji a umožňuje obrobené ploše po obroušení pomalejší chladnutí a tím pádem vznik tlakových zbytkových napětí. Princip tohoto opatření je patrný z obrázku 35. [37]

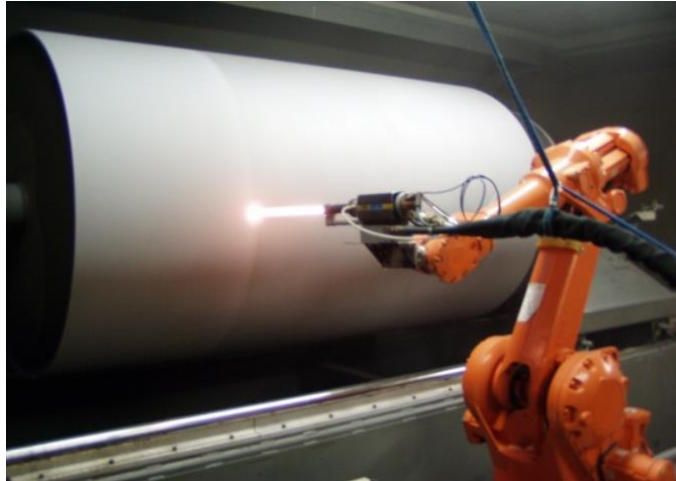


Obr. 35 Zbytková pnutí po broušení s a bez předehřevu [37]

8 Aplikace žárových nástřiků

Žárové nástřiky na bázi niklu v současné době v praxi pomalu nahrazují tvrdochromové vrstvy. Niklové nástřiky vykazují vyšší odolnost vůči opotřebení a otěru a nižší křehkost, přičemž si zachovávají schopnost korozivzdornosti. Mimo to jsou žárové nástřiky tolerantnější k připravenosti povrchu a je také možno aplikovat silnější vrstvy než u tvrdochromu. [15]

Díky těmto vlastnostem jsou v praxi pomocí niklových žárových nástřiků ošetřovány pístní tyče lineárních hydromotorů, které mohou být díky tomuto povlaku využívány v těžkých podmínkách, za zvýšených teplot, nebo v agresivním prostředí náchylném ke kavitační korozi (například pod hladinou moře, nebo v důlních podmínkách). Tyto nástřiky lze využít dále například pro ošetření pístních kroužků, nebo ploch pod ložiska ať už v případě renovací dílů, u kterých jsou vlivem opotřebení plochy pod ložisky vydřené, nebo otačené a kde lze využít i možnosti nástřiku tvořit silné vrstvy, ale i v prvovýrobě v případech, kdy je snaha zmíněným mechanismům opotřebení předejít a současně zajistit například snadnější montáž (zalisování) ložisek. Nástřiky na bázi niklu totiž obecně vykazují velmi dobrou odolnost vůči zadírání. Jako další aplikace žárových nástřiků na bázi niklu bychom mohli zmínit ložiskové výstelky nebo kluzná pouzdra, kde opět vynikne otěruvzdornost a korozivzdornost zmiňovaných povlaků. [15]



Obr. 36 Nástřik tiskařského válce [39]

Dále lze žárové nástřiky obecně využít v situacích, kdy je nutno dodat povrchu dílu tvrdost a ořevzdornost kvůli abrazivnímu prostředí jeho provozu, jako například u mlecích, nebo tiskařských válců, kde je zároveň důležitá i kvalita povrchu a jeho korozivzdornost. Žárové nástřiky jsou také aplikovány na rotory turbín a obecně mechanické díly využívané v energetickém průmyslu, díly stavebních, zemědělských a důlních strojů (radlice, pluhy...), pohybové šrouby, nápravy vlakových souprav, nebo dokonce v lékařství k ošetření kloubních hlavic a lůžek kloubních náhrad při totálních endoprotézách a při výrobě zubních implantátů. Některé žárové nástřiky jsou totiž biokompatibilní. [40–42]

Závěr

Bakalářská práce byla zaměřena na problematiku žárových nástřiků na bázi niklu a jejich obrábění. Klíčové body této problematiky byly: technologický proces výroby nástřiků metodou vysokorychlostního stříkání plamenem (HVOF), dále obrobiteľnosť žárových nástřiků na bázi niklu, obrobiteľnosť niklových slitin obecně, nejčastější typy žárových nástřiků na bázi niklu a aplikace žárových nástřiků. Doplňkově byla zpracována související problematika dalších metod žárových nástřiků, vysokorychlostního obrábění (HSC) a obrábění lineární řeznou hranou.

Ideovým cílem bylo obecně zkoncentrovat a analyzovat informace týkající se problematiky žárových nástřiků na bázi niklu aplikovaných metodou HVOF a jejich obrobiteľnosti a tento cíl se podařilo naplnit. Původní záměr práce, a sice doplnění teoretických postupů tvorby a zpracování nástřiků o záznamy hodnot podstatných činitelů přímo z praxe, nemohl být v důsledky zákazů a opatření zavedených kvůli globální pandemii onemocnění Covid-19 naplněn a kvalifikační práce zůstala tím pádem na čistě teoretické úrovni.

Nenaplněný původní záměr může být v budoucnu předmětem navazující diplomové práce. Ta by mohla vycházet z daných teoretických podkladů zpracovaných v této práci a doplnit tyto podklady o záznam skutečných procesních parametrů při tvorbě nástřiku a jejich vliv na obrobiteľnosť nástřikovaného dílu. Ve výsledku by poté mělo být možné zvolit nejvhodnější strategii obrábění žárového nástřiku v závislosti na podmínkách, za kterých nástřik vznikl.

Seznam použitých zdrojů

- [1] *Použití technologie | PLASMAMETAL, spol. s r.o.* [online]. [vid. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.plasmametal.cz/pouzite-technologie>
- [2] VALÍČEK, Jan, Marta HARNIČÁROVÁ, Jan ŘEHOŘ, Milena KUŠNEROVÁ, Jaroslava FULEMOVÁ, Miroslav GOMBÁR, Ludmila KUČEROVÁ, Jan FILIPENSKÝ a Jan HNÁTÍK. Milling of Complex Surfaces of EN 10060 Steel after HVOF Sprayed NiCrBSi Coatings. *Coatings* [online]. 2020, **10**(8), 744. Dostupné z: doi:10.3390/coatings10080744
- [3] LÍBAL, Martin. *Stanovení hlavních parametrů ovlivňujících přilnavost a odolnost povlaků žárových nástřiků vytvořených elektrickým obloukem* [online]. B.m., 2013. FST ZČU Plzeň. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/8629/1/DIPLOMOVA%20PRACE_LIBAL%20MARTIN.pdf
- [4] ŠILDBERGER, Radek. *Optimalizace parametrů nástřiku elektrickým obloukem*. Brno, nedatováno. VUT Brno.
- [5] KUBÍČEK, Jaroslav. *RENOVACE A POVRCHOVÉ ÚPRAVY* [online]. [vid. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/3079880-Renovace-a-povrchove-upravy-v-1-3.html>
- [6] YIN, Shuo, Pasquale CAVALIERE, Barry ALDWELL, Richard JENKINS, Hanlin LIAO, Wenya LI a Rocco LUPOI. Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, **21**, 628–650. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2018.04.017
- [7] AOUDIA, K., D. RETRAINT, C. VERDY, C. LANGLADE, J. CREUS a F. SANCHETTE. Enhancement of Mechanical Properties and Corrosion Resistance of HVOF-Sprayed NiCrBSi Coatings Through Mechanical Attrition Treatment (SMAT). *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2020, **29**(8), 2065–2079. ISSN 1059-9630, 1544-1016. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-020-01092-9
- [8] SHARMA, Vishal a Kazi SABIRUDDIN. A comparative study of sand-blasted and electro-discharge-machined surfaces of steel substrates. *Sādhanā* [online]. 2020, **45**(1), 50. ISSN 0256-2499, 0973-7677. Dostupné z: doi:10.1007/s12046-020-1267-x
- [9] LIBORIUS, H., A. NESTLER, G. PACZKOWSKI, A. SCHUBERT, T. GRUND a T. LAMPKE. SURFACE INTEGRITY IN TURNING OF FE17CR2NI0.2C IRON BASED THERMALLY SPRAYED COATINGS WITH SPECIAL RESPECT TO THE INFLUENCE OF THE FEED. *MM Science Journal* [online]. 2019, **2019**(04), 3220–3227. ISSN 18031269, 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2019_11_2019074
- [10] SAAEDI, J., T. W. COYLE, H. ARABI, S. MIRDAMADI a J. MOSTAGHIMI. Effects of HVOF Process Parameters on the Properties of Ni-Cr Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2010, **19**(3), 521–530. ISSN 1059-9630, 1544-1016. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-009-9464-5

- [11] ARIF, A. F. M. a B. S. YILBAS. Laser melting of HVOF coating: effect of base material on residual stress formation. *Surface Engineering* [online]. 2009, **25**(3), 249–256. ISSN 0267-0844, 1743-2944. Dostupné z: doi:10.1179/174329408X326876
- [12] HOUDKOVÁ, Šárka, Eva SMAZALOVÁ, Marek VOSTŘÁK a Jan SCHUBERT. Properties of NiCrBSi coating, as sprayed and remelted by different technologies. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2014, **253**, 14–26. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2014.05.009
- [13] BUYTOZ, Soner, Mustafa ULUTAN, Serkan ISLAK, Bülent KURT a O. NURI ÇELIK. Microstructural and Wear Characteristics of High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) Sprayed NiCrBSi–SiC Composite Coating on SAE 1030 Steel. *Arabian Journal for Science and Engineering* [online]. 2013, **38**(6), 1481–1491. ISSN 1319-8025, 2191-4281. Dostupné z: doi:10.1007/s13369-013-0536-y
- [14] YOGANANDH, J., S. NATARAJAN a S. P. KUMARESH BABU. Erosion behaviour of NiCrBSi coating under mining conditions. *Surface Engineering* [online]. 2014, **30**(1), 71–77. ISSN 0267-0844, 1743-2944. Dostupné z: doi:10.1179/1743294413Y.0000000191
- [15] FILIPENSKÝ, Jan. Osobní konzultace problematiky. 3. květen 2021
- [16] *Karbid wolframu* [online]. 2021 [vid. 2021-05-10]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Karbid_wolframu&oldid=19404414
- [17] YAO, S. H. Tribological behaviour of NiCrBSi–WC(Co) coatings. *Materials Research Innovations* [online]. 2014, **18**(sup2), S2-332-S2-337. ISSN 1432-8917, 1433-075X. Dostupné z: doi:10.1179/1432891714Z.000000000436
- [18] YANG, X., J. ZHANG a G. LI. Cavitation erosion behaviour and mechanism of HVOF-sprayed NiCrBSi–(Cr₃C₂–NiCr) composite coatings. *Surface Engineering* [online]. 2018, **34**(3), 211–219. ISSN 0267-0844, 1743-2944. Dostupné z: doi:10.1080/02670844.2016.1258770
- [19] VERDIAN, M. M., M. SALEHI a K. RAEISSI. Microstructure formation and properties of HVOF sprayed NiTi coatings prepared from amorphous/nanocrystalline NiTi powders. *Surface Engineering* [online]. 2010, **26**(6), 491–496. ISSN 0267-0844, 1743-2944. Dostupné z: doi:10.1179/026708410X12593178265823
- [20] VERDIAN, M. M. Characterisation and corrosion performance of HVOF sprayed Ni–10 wt-%Ti coatings. *Surface Engineering* [online]. 2014, **30**(9), 670–674. ISSN 0267-0844, 1743-2944. Dostupné z: doi:10.1179/1743294414Y.0000000310
- [21] TILLMANN, W., C. SCHAAK, J. NELLESEN, M. SCHAPER, M. E. AYDINÖZ a T. NIENDORF. Functional encapsulation of laser melted Inconel 718 by Arc-PVD and HVOF for post compacting by hot isostatic pressing. *Powder Metallurgy* [online]. 2015, **58**(4), 259–264. ISSN 0032-5899, 1743-2901. Dostupné z: doi:10.1179/0032589915Z.000000000250
- [22] VALÍČEK, Jan, Marta HARNIČÁROVÁ, Jan ŘEHOŘ, Milena KUŠNEROVÁ, Ludmila KUČEROVÁ, Miroslav GOMBÁR, Jaroslava FULEMOVÁ, Jan FILIPENSKÝ a Jan HNÁTÍK. Thermodynamics and Mechanics of Thermal Spraying of Steel EN 10060

Katedra technologie obrábění

Jan Mezuliánik

- Substrate with NiCrBSi Alloy after Milling. *Materials* [online]. 2020, **13**(23), 5344. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13235344
- [23] ŘEHOŘ, Jan. *Závěrečná zpráva dílčího projektu NCK strojírenství TN01000015/08: Technologie žárových nástřiků a vývoj nástrojů pro jejich obrábění*. Plzeň: RTI ZČU v Plzni. 2020.
- [24] ZATLOUKAL, Tomáš. 31st DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. nedatováno, 6.
- [25] ZHANG, Peirong a Zhanqiang LIU. Plastic deformation and critical condition for orthogonal machining two-layered materials with laser clad Cr-Ni-based stainless steel onto AISI 1045. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2017, **149**, 1033–1044. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2017.02.167
- [26] MÁDL, Jan a Vilém SCHUBERT. *Základy experimentálních metod a optimalizace v teorii obrábění*. 2. vyd. Praha: ČVÚT, 1978.
- [27] ŘEHOŘ, Jan. Osobní konzultace problematiky. 12. květen 2021
- [28] *BONAR_KATALOG_DESTICKY_S_PAJENYM_PCBN_210x297_CZ_web.pdf* [online]. [vid. 2021-05-02]. Dostupné z: https://www.bonar-as.cz/wp-content/uploads/2019/11/BONAR_KATALOG_DESTICKY_S_PAJENYM_PCBN_210x297_CZ_web.pdf
- [29] MONKA, Peter, Katarina MONKOVA, Milan BALARA, Sergej HLOCH, Jan REHOR, Andrej ANDREJ a Matej SOMSAK. Design and experimental study of turning tools with linear cutting edges and comparison to commercial tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2016, **85**(9–12), 2325–2343. ISSN 0268-3768, 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-015-8065-3
- [30] MONKOVA, Katarina. Surface Roughness Characteristics of Polyamide APA after the Turning by Unconventional Cutting Tool. *Advanced Materials Research* [online]. 2013, **702**, 263–268. ISSN 1662-8985. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.702.263
- [31] KOČMAN, Karel, Jaroslav PROKOP a Alena KOČMANOVÁ. Ekologické a technologické aspekty HSC obrábění | MM Průmyslové spektrum. *www.mmspektrum.com* [online]. 2001, **2001**(6) [vid. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ekologicke-a-technologicke-aspekty-hsc-obrabeni>
- [32] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. 2. vyd. Praha: MMpublisher, 2010. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [33] SZLAUR, Vít. *ANALÝZA PROCESŮ OBRÁBĚNÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ SE ZAMĚŘENÍM NA ENERGETICKÉ ASPEKTY*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT Brno.
- [34] BRYCHTA, Josef, VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, a KATEDRA OBRÁBĚNÍ A MONTÁŽE. *Progresivní metody v obrábění:*

Katedra technologie obrábění

Jan Mezuliánik

studijní opora. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2513-7.

- [35] MAREK, Tomáš. *Možnosti využití vysokorychlostního obrábění při výrobě dílů pro stavbu obráběcích strojů*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Mendelova Univerzita.
- [36] ŘEHOŘ, Jan, Jiří VYSKOČIL, Luboš KROFT a Jakub BLAŽEK. *Aplikace ta-C vrstev a progresivních technologií pro vysoko-posuvové obrábění tištěného materiálu INCONEL 718*. Plzeň: RTI ZČU v Plzni. nedatováno.
- [37] PEI-ZHUO, Wang, He ZHAN-SHU, Zhang YUAN-XI a Zhao SHU-SEN. Control of Grinding Surface Residual Stress of Inconel 718. *Procedia Engineering* [online]. 2017, **174**, 504–511. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.01.174
- [38] RUZZI, Rodrigo de Souza, Raphael Lima DE PAIVA, Leonardo Rosa Ribeiro DA SILVA, Alexandre Mendes ABRÃO, Lincoln Cardoso BRANDÃO a Rosemar Batista DA SILVA. Comprehensive study on Inconel 718 surface topography after grinding. *Tribology International* [online]. 2021, **158**, 106919. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2021.106919
- [39] Nástřík tiskařských a jiných válců. *VZÚ Plzeň* [online]. [vid. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.vzuplzen.cz/case-study/nastrik-tiskarskych-a-jinych-valcu/>
- [40] TKACHENKO, Serhii, Karel DVOŘÁK, David JECH, Karel SLÁMEČKA, Lenka KLAČURKOVÁ, David PALOUŠEK a Ladislav ČELKO. Wear of grinding rotors with thermally-sprayed coatings in a high-speed mill. *Wear* [online]. 2018, **412–413**, 49–59. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2018.05.016
- [41] Žárové nástříky. *VZÚ Plzeň* [online]. [vid. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://www.vzuplzen.cz/sluzby/zarove-nastriky/>
- [42] *Technologie žárových nástříků: Aplikace, kvalita povlaků a rizika při jejich výrobě* [online]. [vid. 2021-05-10]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/technologie-zarovych-nastriku-aplikace-kvalita-povlaku-a-rizika-pri-jejich-vyrobe/>