

VŠB – Technická universita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

HVOF nástřiky odolné proti abrazi za vyšších teplot

HVOF Coatings Resistant to Abrasion at High Temperatures

Student:

Bc. Karel Hunčík

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Karel Hunčík**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **HVOF nástřiky odolné proti abrazi za vyšších teplot
HVOF Coatings Resistant to Abrasion at High Temperatures**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte charakteristiku technologie HVOF se zaměřením na konzoli JP 5000.
2. Proveďte studii vhodných prášků odolných proti abrazi za vyšších teplot.
3. Navrhněte a realizujte zkušební povlaky, proveďte vyhodnocení vybraných užitných vlastností.
4. Proveďte diskusi dosažených výsledků porovnáním s literárními prameny.

Seznam doporučené odborné literatury:

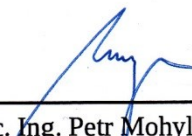
ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.
ASM. *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM 2004.
PAWLOWSKI, L. *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*.
Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd., 2008, ISBN: 978-0-471-49049-4

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladislav Ochodek**


Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015



doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.
vedoucí katedry





doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

13.5. 2015

Karel Hrušák

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická universita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užívat dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užití své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 13.5.2015

Karel Hunčík

.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Karel Hunčík

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Nová 392, Postřelmov 789 69

Anotace diplomové práce

HUNČÍK, K. *HVOF nástřiky odolné proti abrazi za vyšších teplot: Diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2015, Vedoucí práce: Ing. Ochodek, V.

Náplní diplomové práce je rozbor HVOF nástřiků odolných proti abrazi za vyšších teplot. V první fázi práce pojednává o metodě vysokorychlostního nástřiku, tedy o metodě HVOF. Teoreticky je přiblížen pohled na způsob aplikace nástřiku, jeho možnosti a využití. Další část je zaměřena na popis konzole JP-5000 použitého pro aplikaci a prášků vhodných proti abrazi při zvýšeném teplotním namáhání. Jedná se o prášky WC-Co 88/12, WC-Co 88/17, WC-Co-Cr 86/10/4, Cr₃C₂-NiCr 75/25. Následná experimentální část zahrnuje přípravu vzorků a jejich analýzu. Zaměření je především na metalografickou analýzu vzorků, měření tloušťky a tvrdosti nástřiku a podrobení vzorků ohybové zkoušce a zkoušce krutem.

The annotation of thesis

Hunčík, K. *HVOF Coatings Resistant to Abrasion at High Temperatures: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2015, Thesis head: Ing. Ochodek, V.

The aim of this thesis is to analyze HVOF coatings resistant to abrasion at higher temperatures. The first part of the work deals with the high velocity spraying method, a method called HVOF. In theory, it introduces the view of the spray application method, its potential and its use. Another part is focused on the console of JP-5000 torch used for application and the description of powders suitable against abrasion at elevated temperature stress. These are powders WC-Co 88/12, WC-Co 88/17, WC-Co-Cr 86/10/4, Cr₃C₂-NiCr 75/25. The experimental part includes the sample preparation and their analysis. The focus is primarily set on the metallographic analysis of samples, the thickness measurement, the hardness of spraying and the submission of samples to bend test and twist test.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	8
Úvod	9
1 Charakteristika HVOF technologie	11
1.1 Vazby mezi povlakem a základním materiálem.....	12
1.2 Výhody a nevýhody HVOF povlaků.....	13
1.3 Charakteristické vlastnosti povlaku.....	13
2 Dokončovací operace	15
2.1 Broušení.....	15
2.2 Leštění a lapování.....	15
3 Systémy pro tvorbu HVOF povlaků	16
3.1 Rozdělení komponentů.....	16
3.2 Hořák.....	17
3.3 Systém JP-5000.....	19
3.4 Podavač prášku model 1264.....	20
4 Materiály.....	21
4.1 Rozdělení materiálů.....	21
4.2 Výroba prášků.....	22
4.2.1 Atomizace	23
4.2.2 Slinování a tavení.....	24
4.2.3 Aglomerace	24
4.2.4 Opláštění	25
4.3 Prášky vhodné proti abrazi za vyšších teplot.....	25
4.3.1 Rozbor materiálu WC-Co 88/12	25
4.3.2 Rozbor materiálu WC-Co 83/17	26
4.3.3 Rozbor materiálu WC-Co-Cr 86/10/4.....	27
4.3.4 Rozbor materiálu Cr ₃ C ₂ -NiCr 75/25.....	28
4.4 Parametry pro aplikaci nástřiků.....	28

5	Příprava vzorků	29
5.1	Zařízení pro přípravu vzorků.....	29
5.1.1	Dělicí zařízení	30
5.1.2	Zařízení k zapékání vzorků.....	30
5.1.3	Zařízení k broušení a leštění	31
6	Metody zkoušení HVOF povlaků	32
6.1	Metalografická analýza.....	32
6.1.1	Mikrostruktura prášku WC-Co-Cr 86/10/4.....	33
6.1.2	Mikrostruktura prášku Cr ₃ C ₂ -NiCr 75/25.....	35
6.1.3	Mikrostruktura prášku WC-Co 83/17	36
6.1.4	Vzorek prášku WC-Co 88/12.....	37
6.2	Vyhodnocení metalografické analýzy.....	38
6.3	Měření tloušťky HVOF vrstvy.....	39
6.4	Vyhodnocení tloušťky.....	41
6.5	Měření tvrdosti.....	41
6.5.1	Měření mikrotvrdosti dle Vickerse	42
6.5.2	Výsledky měření tvrdosti.....	42
6.6	Vyhodnocení mikrotvrdosti.....	45
6.7	Stanovení podílu pórů v nástřiku.....	45
6.8	Vyhodnocení pórovitosti.....	47
6.9	Zkouška ohybem.....	47
6.9.1	Výsledek ohybové zkoušky	48
6.10	Princip zkoušky krutem.....	49
6.10.1	Výsledek zkoušky krutem.....	49
6.11	Vyhodnocení zkoušek ohybem a krutem.....	50
	Závěr	52
	Použité prameny	55

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Název	Jednotka
HVOF	high velocity oxygen fuel	[-]
s	tloušťka nástřiku	[μm , mm]
v	rychlost nanášení	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
\dot{m}	hmotnostní tok	[$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$, $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$]
Q_v	objemový průtok	[$\text{l}\cdot\text{h}^{-1}$, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]
t	teplota	[$^{\circ}\text{C}$]
A	adheze	[kPa, Pa]
p	pórovitost	[%]
w	hmotnostní procento	[hm%]
η	účinnost	[%]
l	vzdálenost	[mm]
v_f	rychlost posuvu	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
p	tlak	[MPa, kPa, Pa]
WC	wolfram karbid	[-]

Úvod

Aplikační metoda povlakových vrstev pomocí žárového stříkání, konkrétně metoda vysokorychlostního nástřiku, zkráceně HVOF (High Velocity Oxygen Fuel), existuje na trhu přibližně již 35 let. Patří tedy mezi novější technologie z kategorie žárových nástřiků. K objevení došlo již dříve v roce 1958 firmou Union Carbide. Technologie měla značné nedostatky, proto nedošlo k rozšíření v průmyslu, jak je to znatelné nyní. Po zdokonalení systému nástřiku a výroby materiálů použitelných k realizování vrstvy se metoda HVOF nástřiku rychle rozšířila v mnoha aplikacích. ²

Dalo by se říct, že v dnešní době je malé množství odvětví v průmyslu, do kterého by nějakým způsobem nezasahovala technologie HVOF nástřiku. Dáno je to především tím, že lze kombinovat různé druhy kovů a vytvářet pomocí nich značně odolné vrstvy, zlepšující vlastnosti substrátu. Tato technologie se využívá také k renovaci různých součástí. K nejčastějším přednostem, kvůli kterým se upřednostňuje zmíněná metoda, patří mimo vysokou hustotu nástřiků a nízký obsah oxidů, také vysoká odolnost proti opotřebení a korozní odolnost. Dosahuje se i značně vysokých hodnot tvrdosti a nabízí se využití v prostředí se zvýšenými teplotními nároky na součásti.

Jedny z nejrozšířenějších firem ve světě zabývajících se HVOF žárovými nástřiky, co se týče výroby prášku nebo nabídky zařízení a jejich servisu, jsou H.C. Stark, Praxair a Schulzer. Především díky firmám H.C. Stark a Praxair je možné vybírat z velkého množství prověřených přídavných materiálů. V České republice se přímo výrobou materiálů a zařízení žádná firma nezabývá. Nachází se tu pouze malé množství firem, které provozují aplikační metody spojené s vysokorychlostním nástřikem.

Možnost výběru z mnoha druhů materiálů souvisí s širokou možností aplikace v průmyslu. Celosvětově nejčastější využití HVOF systému společně s vhodným práškem je možné na trhu s elektronikou, v energetice, letectví, automobilovém průmyslu, také v lékařství a průmyslovém inženýrství. Konkrétněji se jedná například o využití na lopatky turbín, válce hydraulických zařízení nebo kulové ventily. V některých případech se jedná o průlomové možnosti aplikace. V dalších to pak napomáhá k výraznému zvýšení spolehlivosti a prodloužení životnosti různých součástí.

Zaměření této diplomové práce je především na oblast HVOF nástřiků odolných proti abrazi za vysokých teplot. To znamená, že pojednává o rozboru HVOF technologie nástřiků, přídavných materiálů a o oblasti jejich využití. Cílem praktické části je ověření některých z vlastností vybraných materiálů používaných k nástřiku a posouzení jejich technických možností.

1 Charakteristika HVOF technologie

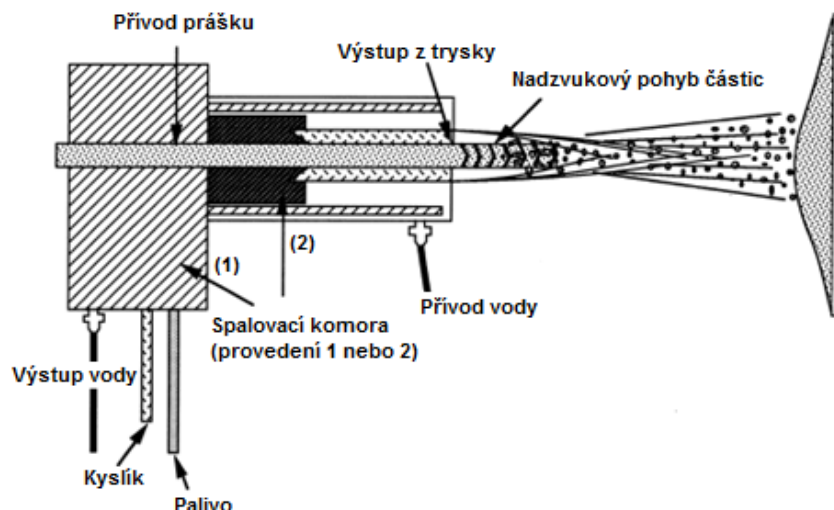
Technologie HVOF je charakterizovaná procesem probíhajícím v hořáku, který je součástí systému vytvářející požadovaný povlak. V principu se jedná o to, že ve spalovací komoře hořáku probíhá proces spalování paliva. Následně dochází k uvolnění vzniklých plynů a jejich urychlení konvergentně divergentní tryskou, do které se přivádí radiálně nebo axiálně přídavný materiál, směrem k povrchu podkladové vrstvy. Při spalování paliva vznikají vysoké teploty a tlaky, které iniciují tavení prášků. Palivo bývá tvořeno dvěma složkami, jednou z nich je kyslík a druhou mohou být plyny vodík, propylen, propan, acetylen nebo petrolej. Při výstupu z trysky se rychlost proudu částic pohybuje v rozmezí hodnot 1 525 – 1 825 m/s (v některých případech až 2 000 m/s). Vzdálenost trysky od povrchu součástí se pohybuje v rozmezí 150 až 300 mm. Celé zařízení musí být intenzivně chlazené vodou.^{1,2}

Podle tlaku tvořících se ve spalovací komoře se dělí hořáky do dvou tříd. Daly by se také označit jako:

- vysokorychlostní (tlak v komoře nad 241 kPa, tepelný výstup 527 MJ),
- hyperrychlostní (tlak v komoře 620 – 827 kPa, tepelný výstup asi 1 GJ).¹

Většinou se jedná o petrolejem poháněné hořáky, kde kyslík slouží jako podpůrný plyn při hoření. Tlak vzniklý ve spalovací komoře a tryska navazující na komoru mají za úkol urychlit plamen na výstupu z trysky. Prášek přiváděný do trysky je poháněn nosným plynem, který nemá další význam v procesu. Rychlost plamene metody HVOF je mnohem vyšší než obvyklé rychlosti při tvoření nástřiku plamenem nebo plazmou. Teplota plamene se podle výpočtů odhaduje na 2 775°C až 3 275°C.

Vysoká kinetická energie dopadajících částic má za příčinu rovnoměrné rozložení a zakotvení částic k substrátu. Z části se kinetické energie přemění na teplo, čím dopomůže ke zvýšení přilnavosti a hustoty povlaku. Přilnavost k povrchu je podporována i mechanickou úpravou substrátu před nanášením nástřiku. Dochází k jeho čištění otryskáváním, zejména zbavování oxidů a nečistot, které by komplikovali adhezi. Mezi tím dochází ke zdrsňení povrchu. Díky povrchovým nerovnostem se tvořený nástřik lépe zakotví k podkladové vrstvě. Princip metody nanášení HVOF povlaků je znázorněn na obrázku č. 1.^{1,4}



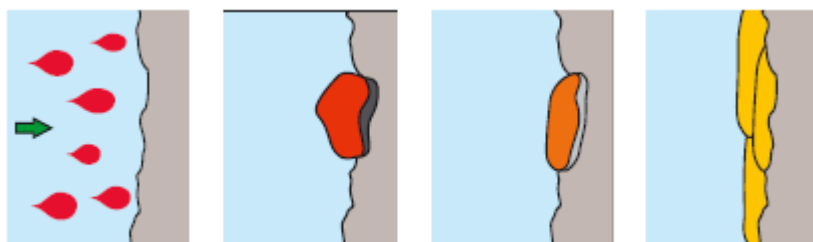
Obr. č. 1 – Princip metody HVOF ¹

1.1 Vazby mezi povlakem a základním materiálem

Vazby vznikající při nanášení HVOF povlaků jsou tvořeny stejným způsobem jako u ostatních žárových nástřiků. Dochází k vytváření jednotlivých deformačních vrstev a jejich kotvení na sebe. Deformované částice jsou vázány na povrch základního materiálu i na sebe a vytváří souvislou vrstvu. Schopnost přilnout k podkladové vrstvě je dána třemi základními vazbami, které působí mezi částicemi v povlaku a substrátem. Těmito vazbami jsou:

- fyzikální síly (adheze, koheze),
- chemické vazby,
- mechanické zakotvení. ²⁵

Utváření chemických vazeb je velice složitý proces. Záleží na chemickém složení podkladové vrstvy a tvořeného nástřiku. V případě HVOF nástřiku, pro který se používají převážně kovové povlaky, je tvorba chemických vazeb jednodušší. Mechanické zakotvení je ovlivněno předúpravou povrchu základního materiálu. Při předúpravě vzniká na povrchu podkladové vrstvy nepředvídatelný profil s různými krátery, ve kterých dochází k zakotvení nástřiku. ²⁵



Obr. č. 2 – Princip tvorby vrstvy nástřiku ¹⁰

1.2 Výhody a nevýhody HVOF povlaků

Co se týče srovnání aplikace s ostatními metodami žárových nástřiků, mají HVOF nástřiky výhody zejména ve vlastnostech konečného povlaku. Nevýhody se týkají spíše aplikace samotných prášků.

Mezi výhody HVOF nástřiků se řadí:

- vysoká hustota,
- vysoká soudržnost,
- nízká pórovitost,
- nízký obsah oxidů,
- nízká teplota podkladu (150°C),
- tlakové napětí v nanesené vrstvě,
- široké spektrum použitelných prášků. ⁴

Základními nevýhodami bývají:

- hlučnost (až 130 dB),
- omezená aplikace na vnitřní plochy,
- nemožné nanášení keramických povlaků. ⁴

1.3 Charakteristické vlastnosti povlaku

Technologie HVOF žárového stříkání se v průmyslu využívá z hlediska schopnosti tvorby povrchových vrstev o požadovaných vlastnostech. Každý ze zadavatelů tvorby nástřiku má představu o požadavcích, které by měl daný povlak splňovat. Konečné vlastnosti jsou ovlivněny zejména výběrem materiálu ke zhotovení nástřiku. Na výběr je

několik základních typů materiálu, které se dají upravovat různým poměrem chemického složení. V následující tabulce jsou znázorněny obecné vlastnosti pro daný typ nanášeného materiálu. Pro porovnání vlastností různých žárových nástřiků jsou k metodě HVOF vybrány ještě vlastnosti metody plazmového nástřiku.

Tabulka 1 – Srovnání vlastností HVOF a plazmového nástřiku⁵

Charakteristika	Typ materiálu	HVOF	Plazma
Teplota plynu [°C]	-	2 600 – 3 000	12 000 – 16 000
Rychlost nanášení [kg/h]	-	1 – 9	2 – 10
Rychlost částic [m/s]	-	až 700	až 450
Pevnost [MPa]	Slitiny železa	48 – 62	21 – 34
	Neželezné kovy	14 – 48	14 – 48
	Samo-tavitelné slitiny	15 – 50	-
	Keramika	-	21 – 41
	Karbidy	-	55 – 69
Tloušťka nástřiku [mm]	Slitiny železa	0,05 – 2,5	0,4 – 2,5
	Neželezné kovy	0,05 – 2,5	0,05 – 5
	Samo-tavitelné slitiny	0,05 – 2,5	-
	Keramika	-	0,1 – 2
	Karbidy	0,05 – 5	0,15 – 0,8
Tvrdość [HV]	Slitiny železa	446	392
	Neželezné kovy	595	513
	Samo-tavitelné slitiny	302 – 697	302 – 697
	Keramika	-	446 – 820
	Karbidy	595 – 1 245	513 – 820
Pórovitost [%]	Slitiny železa	< 2	2 – 5
	Neželezné kovy	< 2	2 – 5
	Samo-tavitelné slitiny	< 2	-
	Keramika	-	1 – 2
	Karbidy	< 1	2 – 3

2 Dokončovací operace

Dokončovací operace se do procesu zařazují, aby u nástřiku bylo dosaženo požadované toleranční přesnosti a drsnosti povrchu předepsané zadavatelem. Správné tolerance se docílí broušením povrchu. Pro vytvoření požadované drsnosti se používá leštění a lapování.

2.1 Broušení

Pomocí vysokorychlostních nástřiků se vytváří povlaky s kovovou maticí nebo kovovou maticí s karbidy. Nejpoužívanějším brusným kotoučem pro broušení těchto nástřiků bývá kotouč opatřen karbidy křemíku. Nejčastěji se při broušení HVOF nástřiků vybírá z těchto parametrů:

- typ abraziva,
- zrnitost,
- koncentrace brusiva,
- typ pojiva,
- rychlost otáčení,
- hloubka broušení.²

2.2 Leštění a lapování

Pro leštění se používají většinou stejné stroje jako pro broušení. Leštění probíhá s mnohem jemnějšími brusivy. Pro získání hodnot drsnosti Ra až 0,2 μm se musí pečlivě kontrolovat lešticí parametry. Pro zlepšení drsnosti se využívá také lapování. Při lapování působí abrazivum společně s olejem nebo směsí tuků. Doporučené je zařadit lapování, pokud při broušení nebo leštění vznikají vibrace, které by mohly zanechat stopy na povrchu.²

3 Systémy pro tvorbu HVOF povlaků

Nejdůležitější částí pro tvorbu povlaků je bezpochyby hořák. Ovšem samotný hořák sám o sobě nezajistí celý proces vysokorychlostního nástřiku. K tomu slouží řada dalších více či méně důležitých komponent.

3.1 Rozdělení komponentů

Komponenty jsou rozděleny do tří skupin z hlediska zásluhy na tvorbě povlaku v procesu. Nejdůležitější jsou tzv. klíčové komponenty. Tyto součásti systému se starají přímo o tvorbu povlakových vrstev a ovlivňují jejich vlastnosti. Další skupinu prvků vytváří pomocné komponenty zabezpečující manipulaci. Poslední, třetí skupinou jsou periferní komponenty systému sloužící z části i jako bezpečnostní prvky. Okolí je díky těmto prvkům chráněno před hlukem vzniklým při aplikaci nástřiku a životní prostředí před prachovými částicemi.

Klíčové komponenty:

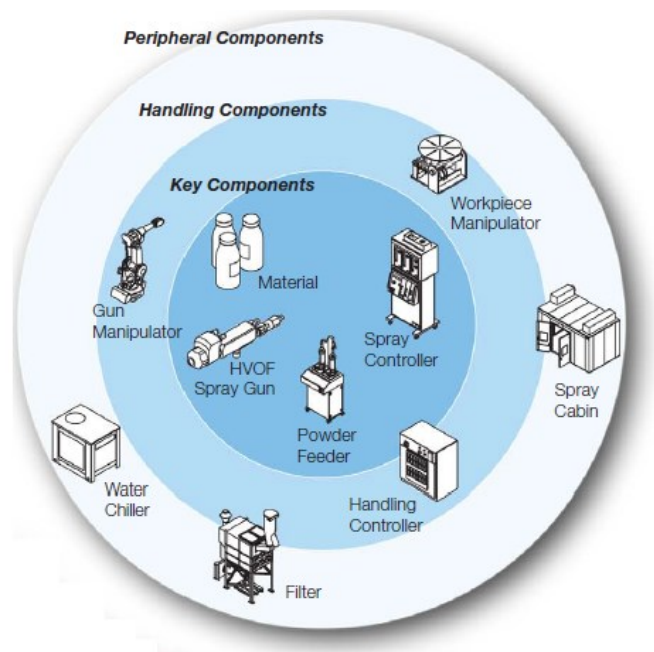
- řídicí konzole,
- hořák,
- podavač prášku,
- prášek.⁶

Periferní komponenty:

- pracovní komora,
- filtr,
- vodní chladič.⁶

Pomocné komponenty:

- manipulátor s obrokem,
- manipulátor s hořákem,
- řídicí konzole.⁶

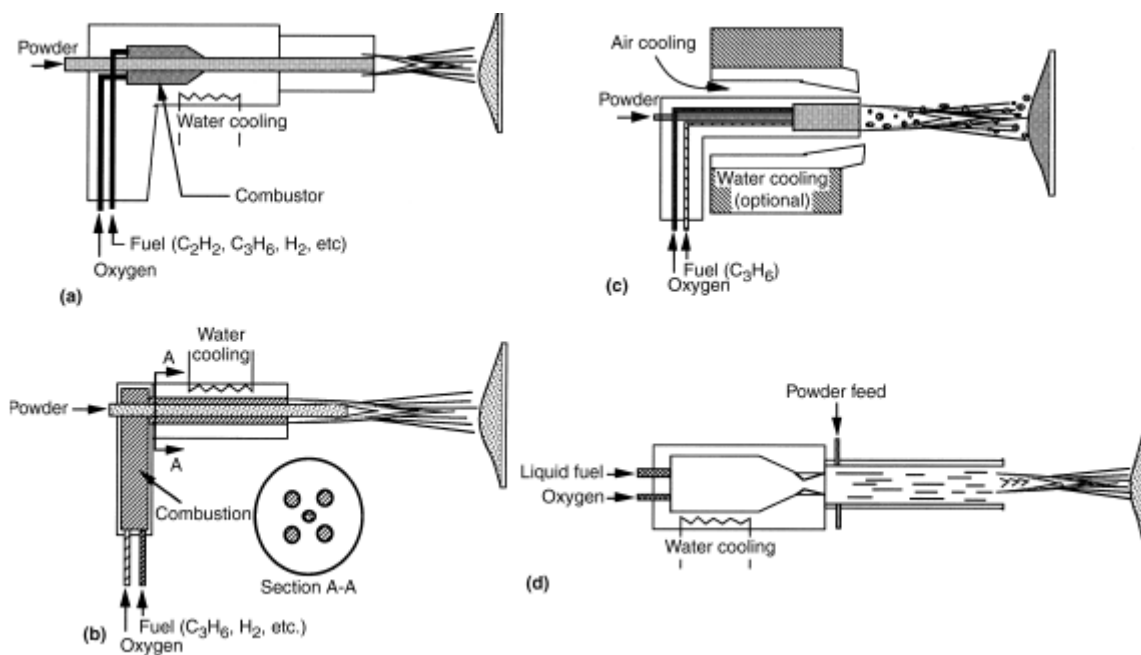


Obr. č. 3 – Rozdělení komponent pro metodu HVOF ⁶

3.2 Hořák

Jedná se o jednu z nejdůležitějších částí HVOF systému. Je tomu tak proto, že v hořáku dochází ke spalovacímu procesu, ve kterém je nataven prášek. Vytváří se tak směs horkých plynů a prášku, která je přes expanzní trysku vedena k substrátu. Další důležitou součástí hořáku je chladicí systém. Bez tohoto systému by hořák sám o sobě nemohl pracovat, protože při procesu vznikají poměrně vysoké teploty. Při působení vysoké teploty společně s vysokým tlakem vytvořeným uvnitř spalovací komory by došlo k zničení hořáku a riziku úrazu.

Existují různé druhy hořáků, které se od sebe liší svou konstrukcí. Konstrukce každého hořáku je ovlivněna polohou spalovací komory, přívodem prášku do procesu a také umístěním chladicího systému. Čtyři základní druhy provedení hořáků jsou znázorněny na obrázku č. 4.



Obr. č. 4 – Čtyři hlavní provedení hořáků ¹

Podrobnosti o provedení hořáků:

- a) Provedení hořáku je znázorněno tak, že se v jedné ose nachází spalovací komora, přívod prášku a tryska. Princip hořáku je takový, že dojde k zažehnutí plynů ve spalovací komoře, kam se následně přivede prášek. Spaliny dále přecházejí do trysky a následně opouštějí hořák. Konstrukce hořáku odpovídá provedení HV-2000.
- b) Tento typ hořáku je opatřen navíc konektorem. Konektor se nachází ve vodorovné poloze. Kolmo k němu přiléhá spalovací komora. Ke smísení spalín a směsi prášku dochází v konektoru. Prášek je do konektoru přiváděn axiálně. Na výstupu z konektoru se nachází tryska. Chlazení konstrukce je zajištěno vodou. V praxi je tento hořák pojmenován Jet Kote.
- c) Následující konstrukce je založena na principu plamenného hořáku. Natavení prášku se provádí v části trysky, která nahrazuje spalovací komoru. Jedná se o masivnější konstrukci chlazenou vzduchem i vodou. Typ hořáku, který se využívá v praxi, má označení Diamond Jet.
- d) Na rozdíl od předchozího hořáku, používá se v tomto případě kapalné palivo. Ke spalování směsi petroleje a kyslíku dochází ve spalovací komoře. Směs vzniklých plynů je vyvedena do trysky, kam se do proudu plynů radiálně přivádí prášek. K chlazení systému se využívá voda. Konstrukce tohoto hořáku se v praxi objevuje pod názvem JP-5000. ¹

3.3 Systém JP-5000

Z hlediska provedení experimentální části je vhodné si blíže rozebrat konzoli typu JP-5000. Návrhem tohoto modelu došlo k významnému pokroku v tvorbě povlaků. Především je to dáno tím, že v hlavní vznikají vyšší teploty a tlaky. Zdokonalila se injekce prášku do procesu, čím se zlepšilo promísení s plynnou fází. Ke spalování se využívá kapalného paliva a kyslíku, který podporuje hoření. Vzhledem k nízkým pořizovacím nákladům petroleje oproti ostatním palivům vzniká ekonomičtější provoz. Také skladování a manipulace s petrolejem je bezpečnější než s plynnými palivy.^{7,8}

Produkt JP-5000 byl vyvinut s představou kvalitnějšího povlaku, než byl dosud. Základním předpokladem ke zlepšení vlastností je samozřejmě zvýšení tlaku a rychlosti částic. Zvýšení rychlosti natavených částic má za důsledek vyšší hustotu povlaku. Také tím, že díky vyšší rychlosti tráví částice kratší dobu na vzduchu, dochází ke snížení oxidů v nástřiku. Těchto předpokladů se využívá především v oblastech, kde se požaduje korozní odolnost. Odlišnost tohoto povlaku spočívá především v tom, že dochází k tvorbě tlakových soudržných sil, přičemž v jiných systémech vznikají tahová napětí. Za důsledek to pak má zlepšení soudržnosti struktury a možnost dosažení vyšších tloušťek.^{7,24}

Systém JP-5000 obsahuje mimo hořák i další prvky. Jedná se o ovládací panel a dávkovač prášku. Tyto prvky byly navrženy tak, aby byla zaručena co nejvyšší kvalita s odpovídající spolehlivostí a opakovatelností. Díky všem částem systému se dosahuje těchto provozních parametrů:

- spalovací tlak až 120 kPa,
- rychlost plynu 2 190 m/s.⁷

Za kvalitu vznikajících nástřiků tedy může designové provedení hořáku, které zajišťuje tyto zvýhodnění:

- jednoduché a efektivnější natavení částic,
- mnohem vyšší rychlosti částic,
- žádné zachycení materiálu v hlavni,
- menší citlivost na vodní chlazení,
- použitím levného paliva dochází ke snížení nákladů,
- vyšší tvrdost vazby,

- lepší odolnost proti opotřebení a korozi,
- větší tloušťka povlaků s nižším obsahem oxidů,
- vyšší hustota a soudržnost povlaků,
- dvakrát vyšší účinnost při tavení prášku.^{7, 8}

3.4 Podavač prášku model 1264

Jedná se o ekonomicky nenáročný podavač používaný pro HVOF nástřiky na bázi prášku. Je to snadno ovladatelné zařízení, které zaručuje přesné a opakovatelné dávkování prášku. Podavač pracuje na objemovém principu. To znamená, že přesnost podávání prášku je řízena pomocí proměnlivé rychlosti kola, které slouží jako zásobník prášku. Z tohoto místa se prášek přivádí pomocí gravitace a nosného plynu hadicí k hořáku. Podavač prášku není citlivý na zpětný tlak, a proto může pracovat s tlakem až 610 kPa. Hlavními rysy tohoto zařízení jsou:

- přesné nastavení pro přesné dávkování prášku,
- vzduchem poháněné ventily pro okamžité zapnutí a vypnutí podávání prášku,
- rychlost podávání není závislá na množství prášku,
- vysokokapacitní zásobník prášku pro velké série,
- možnost nastavení zásobníku dalším zásobníkem,
- snadné plnění a čištění zásobníků,
- mobilní mezi různými operacemi,
- nepropustné těsnění pro zajištění bezprašného provozu,
- jednoduché ovládání pro bezporuchový provoz,
- možnost samostatného ovládání nebo ovládání pomocí externího zařízení.²⁶



Obrázek č. 5 – Podavač prášku model 1264 ²⁶

4 Materiály

Formou materiálu pro žárové nástřiky mohou být dráty nebo prášky. Co se týče vysokorychlostního nástřiku, je velmi omezené používání drátů a pracuje se především s prášky. Firmy, zabývající se výrobou prášků, se snaží dosáhnout co největší kvality a spolehlivosti. U prášků různě přizpůsobují složení příznivě k jejich aplikaci a spokojenosti zákazníků. I proto mají uživatelé na výběr z velkého množství klasifikací prášků. V posledních letech výrobci kladou důraz také na recyklovatelnost materiálů a snahu snižovat zatížení pro životní prostředí.

4.1 Rozdělení materiálů

Konečnou podobu povrchové vrstvy lze ovlivnit různými způsoby. Záleží na vlastnostech použitých prášku. Je na výrobcích, jaké udají vlastnosti práškům a dále na uživateli, jaký prášek si zvolí pro konkrétní aplikaci. Praktické je rozdělení materiálů z hlediska:

- chemického složení,
- velikosti částic (5 – 45 μm),
- využití pro danou kategorii žárového nástřiku.

Chemické složení je prakticky nejzásadnější rys každého materiálu, který ovlivňuje konečnou podobu nástřiku. Záleží především na výrobcí, jakým způsobem bude ovlivněné složení materiálu. Ve většině případů se objevují prášky vytvořené na bázi:

- slitin želez,
- neželezných kovů,
- samo-tavitelných slitin,
- karbidů.

4.2 Výroba prášků

S ohledem na chemické složení a ne jen na to, se vyrábějí prášky různými způsoby. V některých případech se výrobní proces příliš neliší. Použitý způsob zhotovení prášku má vliv na tvar jednotlivých zrn. Ty pak způsobují odlišné vlastnosti ve vytvořeném nástřiku. I to by mělo přispět k rozhodnutí, zda použít prášek v konkrétní aplikaci. V následující tabulce je ke každému typu prášku přiřazen způsob výroby a odpovídající tvar jednotlivých zrn.

Tabulka 2 (část 1) – Způsob výroby prášků a jejich charakteristika ¹¹

Typ prášku	Proces výroby	Charakteristika prášku
Tavený a drcený	Tavení v obloukové peci, ochlazení a drcení	Hranatý, nepravidelný, hustý
Slinutý a drcený	Slinování v pecích a následné drcení	Hranatý, nepravidelný, poměrně hustý
Aglomeračně slinutý	Rozprašování a sušení na jemný prášek, spékání s organickým pojivem	Kulový, porézní, homogenně rozdělené složky
Atomizovaný v plynu	Rozprašování roztaveného kovu ve vysokém tlaku plynu (Ar, N ₂)	Kulový, hustý, vysoce čistý, nízký obsah kyslíku
Atomizovaný ve vodě	Rozprašování ve vodě a následné sušení	Nepravidelný, hustý, zvýšený obsah kyslíku v porovnání s atomizací v plynu

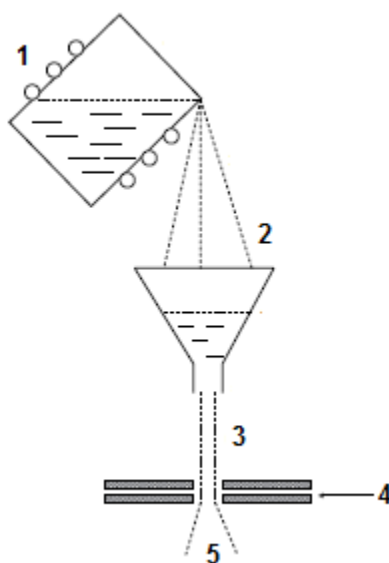
Tabulka 2 (část 2) – Způsob výroby prášků a jejich charakteristika ¹¹

Hustě potažený	Redukce kovu v roztoku soli a atmosféře vodíku	Hranatý nebo nepravidelně složený
Kulovitý	Rozprašování částic za pomoci plazmového plamene	Kulový, hustý, pórovitý nebo dutý, částečně otevřený
Míchaný	Míchání dvou nebo více prášků	Možné rozlišení odlišné morfologie

4.2.1 Atomizace

Atomizace je proces vytváření převážně prášků ze slitin kobaltu a niklu. Existují dva charakteristické postupy pro výrobu prášků. Jedná se o atomizaci vodou a atomizaci plynem. Proces výroby je tvořen:

- natavením kovu v indukční peci (1),
- přesunem taveniny do předehřáté nálevky (2),
- navedením taveniny přes atomizační trysku (3),
- výstupem atomizačního média (vody nebo plynu) z trysky do taveniny (4),
- tuhnutím kovu v prášek a volný pád do zásobníku (5). ²



Obrázek č. 6 – Proces atomizace ²

4.2.2 Slinování a tavení

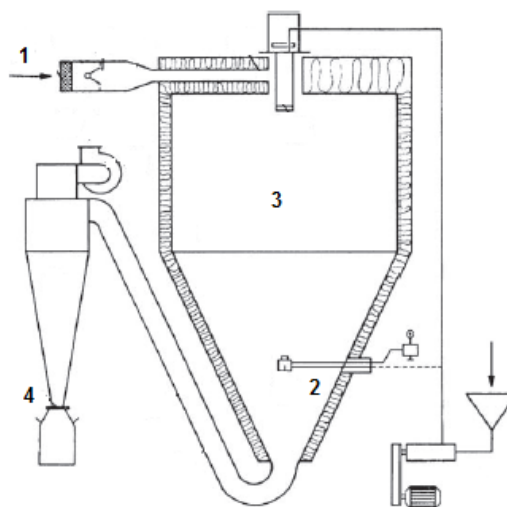
Jedná se o dvě metody výroby prášků s podobným průběhem. Výsledkem slinování a tavení jsou částice prášků nepravidelného tvaru. Typickými produkty těchto metod jsou oxidy chromu, cermety a karbidy wolframu s kobaltem. Výroba se provádí v tomto pořadí:

- míchání surovin,
- slinování nebo tavení,
- tuhnutí,
- drcení.²

4.2.3 Aglomerace

Aglomerace je výrobní proces, při kterém dochází k sušení prášku rozprašováním. Tímto způsobem se vyrábějí například prášky na bázi oxidů, nitridů a směsí oxidů s nitridy. V poslední době se dá pomocí aglomerace dosáhnout velmi jemného prášku. Díky těmto jemným práškům lze vytvořit nanostrukturní povlaky s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Proces aglomerace je složen z několika kroků:

- příprava směsi částic kovu, organického pojiva a vody
- zavedení směsi do odstředivého atomizéru (1),
- rozprašení suspenze ve vyčištěném a ohřátém vzduchu (2),
- vypaření vody a těkavých látek v komoře (3),
- shromáždění částic v zásobníku (4).²



Obrázek č. 7 – Proces aglomerace²

4.2.4 Opláštění

Typickým příkladem prášků vytvořených pomocí opláštění nebo potažení jsou cermety a kompozity. Dochází k potažení buď pevné, plynné nebo kapalné fáze. Nejčastěji probíhá opláštění v třech případech:

- ochrana základního materiálu před chemickými vlivy – potažení grafitového jádra niklem nebo jádro karbidu wolframu kobaltem,
- zvýšení adheze – jádro z hliníku opláštěné niklem
- zlepšení smáčivosti a tekutosti keramických prášků – keramické jádro potažené kovovou vrstvou.²

4.3 Prášky vhodné proti abrazi za vyšších teplot

Tyto prášky jsou vyrobeny na předpokladu, že jejich využití bude směřovat na aplikace v oblastech s nároky na odolnost proti vysokým teplotám, abrazi, erozi, kavitaci. Tímto způsobem odolné nástřiky jsou založeny na bázi karbidu wolframu s kobaltovou a niklovou maticí. Často se ve směsi prášku objevuje chrom, který podporuje jejich charakteristické vlastnosti.¹¹

Oblast využití tímto způsobem odolných prášků se soustřeďuje na části turbín a čerpadel. Nástřiky se často objevují i v leteckém a automobilovém průmyslu nebo při výrobě papírů na vysoušecích válcích. Prášky použité pro experiment jsou rozebrány v následujících bodech.¹¹

4.3.1 Rozbor materiálu WC-Co 88/12

Tento produkt na bázi karbidu wolframu (88 %) je vyroben metodou slinování. Obsahuje poměrně nízkou hodnotu uhlíku, přibližně 4 % a dále kobalt asi 10 – 12 %. Lze ho získat ve dvou provedeních, která souvisejí s velikostí částic. Jedná se o WC-Co 88/12 s velikostí částic 45/15 μm a s velikostí částic 30/5 μm .¹⁵

WC-Co 88/12 byl vytvořen speciálně pro metodu HVOF a zaručuje nástřiku nízkou pórovitost. Ta snižuje náchylnost substrátu k poškození. Obsahuje fázi W-Co-C, která vykazuje menší reaktivitu s roztavenými kovy, ve srovnání s jinými stříkanými prášky, které zahrnují volné částice Co. Zmíněná fáze tedy zvyšuje odolnost proti korozi tvořenou tekutými kovy. Aby zhotovený povlak měl zaručené vlastnosti uvedené výrobcem (Tabulka 3), musíme při procesu stříkání dodržet zadané parametry.¹⁵

Tabulka 3 – Typické vlastnosti HVOF nástřiku (JP-5000)¹⁵

Mikrotvrdost	1 100 – 1 300 HV 0,3
Drsnost Ra	5 -7 μm
Účinnost nanášení	Cca. 42 %
Nosnost	30 – 40 mg
Kavitační rychlost	20 – 30 mg/h

4.3.2 Rozbor materiálu WC-Co 83/17

Jedná se o vysoce kvalitní a univerzální prášek používaný po celém světě. Univerzálnost prášku je dána tím, že se dá nanášet různými způsoby a při různých parametrech. Povlaku je možné dosáhnout pomocí plazmy a systému HVOF s kapalným nebo plynným palivem. Prášek je k dostání v pěti různých velikostech zrn a to 62/32 μm , 53/20 μm , 53/10 μm , 45/15 μm a 30/5 μm . V následující tabulce se nachází chemické složení tohoto prášku.¹⁶

Tabulka 4 – Chemické složení prášku WC-Co 83/17¹⁶

W	Co [%]	C [%]	Fe [%]
báze	15 - 18	4,9 – 5,3	max. 0,2

Povlak vykazuje homogenní rozložení WC v kobaltové matici. Parametry při aplikaci prášku jsou rozdílné v závislosti na použití v průmyslu. Povlaky tvořené tímto práškem nalezneme v leteckém nebo sklářském průmyslu, v částech čerpadel a turbín. Mezi hlavní výhody patří povrch s jemnou mikrostrukturou a vysokou pevností, odolnost proti otěru. Naopak nevýhodou je nízká odolnost proti korozi a oxidaci.^{16,3}

Tabulka 5 – Typické vlastnosti povlaku WC-Co 83/17 ¹⁶

Mikrotvrdost	1 200 – 1 400 HV 0,3
Drsnost Ra	3 – 4,5 μm
Účinnost nanášení	45 – 80 %
Pórovitost	méně než 2 %
Pevnost vazby	> 75 MPa
Maximální pracovní teplota	500 °C na vzduchu

4.3.3 Rozbor materiálu WC-Co-Cr 86/10/4

Pomocí tohoto prášku vzniká univerzální vysoce kvalitní nástřík přibližně se 4 % Cr. Jeho jemné částice jsou rozloženy v Co – Cr matici o průměrné velikosti 1 μm. Tvorbu povlaku obstarává plazmový nástřík nebo HVOF metoda s kapalným nebo plynným palivem. ¹⁷

Tabulka 6 – Chemické složení prášku WC-Co-Cr 86/10/4 ¹⁷

W [%]	Co [%]	C [%]	Cr [%]	Fe [%]	O [%]
báze	8,8 - 11	5 - 6	3 – 5	max. 0,3	max. 0,2

Co-Cr matrice díky přidavku Cr vykazuje vyšší korozní odolnost než klasická Co matrice, proto je možné využití v korozním prostředí na bázi vody. WC-Co-Cr 86/10/4 poskytuje výbornou ochranu proti kavitaci, dobrou odolnost proti tření, opotřebení a erozi. Prášek je aplikován na povrch kulových ventilů, hydraulických válců nebo také na vysoušecí válce v papírnickém průmyslu. ^{17,3}

Tabulka 7 – Typické vlastnosti povlaku WC-Co-Cr 86/10/4 ¹⁷

Mikrotvrdost	1 170 – 1 350 HV 0,3
Drsnost Ra	3,5 – 6 μm
Účinnost nanášení	45 – 60 %
Pórovitost	méně než 2 %
Pevnost vazby	> 75 MPa
Maximální pracovní teplota	500 °C

4.3.4 Rozbor materiálu Cr₃C₂-NiCr 75/25

Cr₃C₂-NiCr 75/25 prášek stejně jako při plazmovém nástřiku, tak i při nástřiku metodou HVOF vykazuje zlepšení v oblasti účinnosti nanášení a homogenity, především ve srovnání s míchanými prášky.¹⁸

Tabulka 8 – Chemické složení prášku Cr₃C₂-NiCr 75/25¹⁸

Cr [%]	Ni [%]	C [%]	O [%]
báze	18 - 22	9 – 11	max. 0,6

Prášek se využívá v prostředích s vysokými teplotami do 870 °C, kde standardní povlaky na bázi WC oxidují. Povlaky nabízejí vysokou teplotní stabilitu a díky homogenní NiCr matici také odolnost proti opotřebení a erozi při vyšších teplotách. Poskytuje i ochranu proti kavitaci. WC-Co-Cr 86/10/4 je určen pro použití v mořské vodě, na válce v pecích v ocelářském průmyslu a různé součásti čerpadel a kotlů.^{3, 18}

Tabulka 9 – Typické vlastnosti povlaku Cr₃C₂-NiCr 75/25¹⁸

Mikrotvrdost	750 – 1 000 HV 0,3
Drsnost Ra	5 – 7 μm
Účinnost nanášení	30 – 40 %
Pórovitost	méně než 2 %
Pevnost vazby	> 70 MPa
Maximální pracovní teplota	870 °C na vzduchu

4.4 Parametry pro aplikaci nástřiků

Pro tvorbu všech vzorků byly použity stejné parametry nanášení nástřiků. Aplikace prášků byla zajištěna konzolí s označením JP-5000. Předepsané hodnoty by měly zajistit opakovatelnost a konstantní parametry vrstvy povlaku uváděné výrobcem. Potom je tedy možné i doporučené využití nástřiků v uvedených aplikacích.

Tabulka 10 – Parametry nástřiku pro systém JP-5000 ¹⁵

Tryska	101,6 mm
Petrolej	22,7 l/h
Kyslík	792 nl/min
Plnění prášku	75 g/min
Nanášecí vzdálenost	380 mm

5 Příprava vzorků

Příprava vzorků zahrnuje čtyři fáze, které předcházejí analýze nástřiků. Nejdříve se vyrábí vzorky potřebné velikosti, pomocí vhodného dělicího zařízení. Řezný nástroj a řezné parametry se volí v závislosti na použitém nástřiku tak, aby nedošlo k jeho poškození. Následuje zakotvení vzorků v bakelitu. To slouží k lepšímu zacházení při další manipulaci se vzorky. Nejdůležitější částí je broušení a leštění vzorků. V závislosti na materiálu se používá několika druhů brousících cyklů zakončených cyklem leštění. Nástroje mají postupně různou velikost a hustotu zrn, aby se dosáhlo potřebné drsnosti povrchu. Broušení vzorků se v případě žárového nástřiku provádí ve směru přes nástřik do substrátu, tak aby se eliminovala možnost odtržení nástřiku od základního materiálu. Pokud je to nutné, tak se v poslední fázi přípravy zdůrazňuje struktura vzorku leptáním. Roztok se připravuje ze směsi kyseliny, vody a dalších látek, které jsou namíchané v závislosti na chemickém složení povlakové vrstvy.

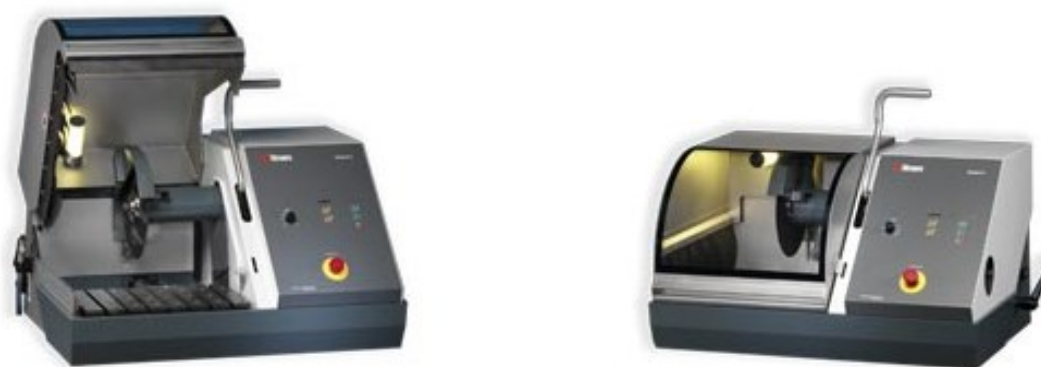
5.1 Zařízení pro přípravu vzorků

Při volbě zařízení pro přípravu vzorků se vycházelo z dostupnosti zařízení. Ty pak byly použity s ohledem na použité žárové nástřiky a jejich složení tak, aby pokud možno nedošlo k žádnému ovlivnění pozorovaného obrazu.

5.1.1 Dělicí zařízení

Dělení materiálu s nástřikem na vzorky vhodné velikosti se provádělo na přístroji značky Struers Discotom-6. Velikost polotovaru, na kterém byly tvořeny nástřiky, je poměrně malá, průměru 60 mm a šířky 30 mm. Manipulační prostor tohoto zařízení je tedy dostačující. Toto zařízení využívá k dělení materiálu brusný kotouč.

Vzhledem k povaze žárových nástřiků byl pro práci zvolen kotouč tvrdší řady. Pracovalo malou posuvovou rychlostí a za intenzivního chlazení. Rychlost posuvu se mohla pohybovat v rozmezí 0,1 mm/s až 0,5 mm/s. Důvodem pro volbu nižších hodnot posuvu bylo také zohlednění možnosti ovlivnění vzorku a jeho struktury vneseným teplem v průběhu procesu dělení materiálu. To by mohlo mít za důsledek zkreslení výsledků.



Obr. č. 8 – Zařízení Struers Discotom-6¹²

5.1.2 Zařízení k zapékání vzorků

K zapékání docházelo za působení síly 20 kN a teploty 180 °C na přístroji firmy Struers s názvem ProntoPress-20. Jedná se o přístroj se dvěma pracovními komorami. Každou z komor je možné v závislosti na průměru vzorků vyjmout a zaměnit za další komoru s odlišným průměrem pracovního prostoru. Z důvodu lepší manipulace byly vzorky zapečeny do prášku na bázi bakelitu s označením MultyFast Red. Výsledný vzorek měl tedy válcovitý tvar o průměru 25 mm. Na jeho čele se nacházela plocha, která se dále podrobovala analýze.



Obr. č. 9 – Zařízení ProntoPress-20 ¹³

5.1.3 Zařízení k broušení a leštění

Jelikož k metalografické analýze těchto vzorků nebylo potřebné naleptání sledované plochy, bylo posledním úkolem při přípravě vzorků broušení a leštění pozorované plochy. Obě operace, jak broušení, tak leštění, se prováděly na jednom přístroji s názvem Struers TegraForce-5 v kombinaci s TegraPol-35. Na tomto zařízení se pracovalo s třemi typy brusných papírů a jedním druhem pro leštění.

Pro broušení se využily brusné papíry řady zrnitosti 1 800, 2 400 a 4 000. Při broušení se do procesu ze systému neustále přiváděla voda za účelem chlazení a odvádění třísky, aby nedocházelo k dalšímu poškození broušené plochy zbylými částicemi. Ty by se mohly zarývat do povrchu a zanechávat nežádoucí rysy. Při broušení se postupovalo tak, aby brusné síly vstupovaly nejprve do vrstvy nástřiku a dále pak do základního materiálu. V opačném případě by mnohem více hrozilo porušení hranice mezi nástřikem a substrátem. U každého z brusných papírů se proces broušení opakoval v několika cyklech, dle potřeby. Aby se dosáhlo potřebné kvality povrchu pro pozorování struktury, následoval po cyklech broušení také cyklus leštění. V případě leštění se jako procesní medium používala voda v kombinaci se saponátem.



Obr. č. 10 – Zařízení TegraForce-5 v kombinaci s TegraPol-35 ¹⁴

6 Metody zkoušení HVOF povlaků

Existují různé možnosti zkoušení HVOF povlaků. Typ zkoušky se volí zejména podle toho, co se od ošetřené součásti očekává a v jakém prostředí se využívá. Zkoušení bývá součástí i při vývoji a zdokonalování nových druhů nástřiků. V každé aplikaci je důležitá spolehlivost a kvalita vyrobeného povlaku, která se těmito způsoby zajišťuje. Všeobecně patří mezi hlavní způsoby kontroly povlakových vrstev:

- metalografická analýza,
- měření mikrotvrdomosti,
- mechanické zkoušky. ^{9,10}

Do kategorie metalografické analýzy lze zařadit vyhodnocení tloušťky, pórovitosti, obsahu nečistot, trhlin a obsah neroztavených částic. Pod pojmem mechanické zkoušky je možné si představit kontrolu soudržnosti a adheze pomocí ohybové zkoušky. ⁹

6.1 Metalografická analýza

Velmi důležitou součástí metalografické analýzy je příprava vzorků. V případě výskytu chyby při přípravě vzorků dochází ve výsledném pozorování ke zkreslení výsledků a chybnému vyhodnocení. Důraz se tedy klade na správný výběr zařízení a nástrojů pro zpracování vzorků.

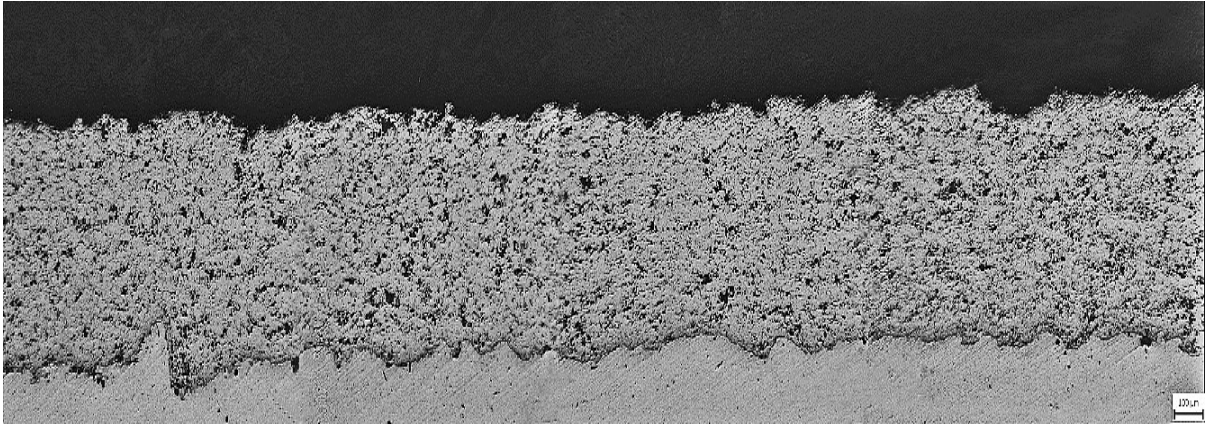
V případě, že při přípravě nedošlo k poškození vzorků, je za použití potřebného zvětšení dán obraz struktury základního materiálu a vytvořeného povlaku. Cílem je získat přehled o chybách, vadách a nedostatecích, na kterých je nutné zapracovat. Ve struktuře jsou rozpoznatelné různé obsahy vměstků, oxidů, póru a trhlin. Znatelná je také velikost fází a hustota povlaku. Pro analýzu struktury a pozorování různých vad se pro účely této diplomové práce využilo přístroje s názvem Neophot 21. Jedná se o metalografický mikroskop.



Obr. č. 11 – Mikroskop Neophot 21 ²¹

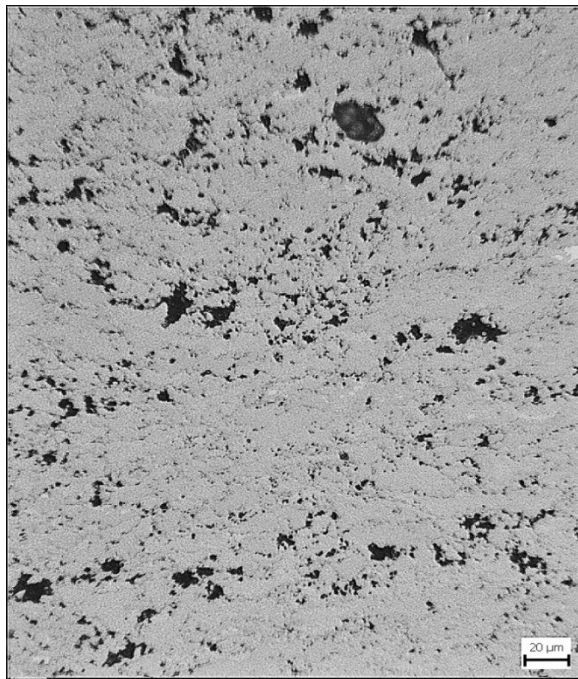
6.1.1 Mikrostruktura prášku WC-Co-Cr 86/10/4

Jedná se o kompaktní nástřik pevně přilnutý k povrchu substrátu. Nástřik vyplňuje i větší nerovnosti na základním materiálu, které byly způsobeny přípravou povrchu k nástřiku. Již na obrázku číslo 12 je pozorovatelný značný obsah póru v nástřiku a také malé množství na hranici se základním materiálem. Snímek dokazuje, že nedošlo k ovlivnění základního materiálu aplikací nástřiku a degradaci jeho vlastností.



Obr. č. 12 – Snímek hranice nástřiku WC-Co-Cr 86/10/4 a základního materiálu (Zv. 50x)

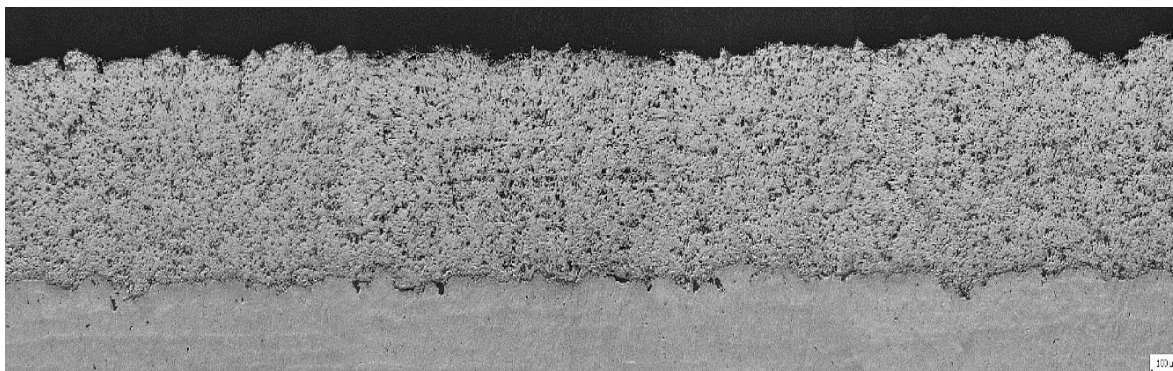
Vzorek vykazuje nepravidelnou strukturu nástřiku s viditelnými hranicemi tuhnutí eutektika. Ve struktuře nejsou pozorovatelné žádné vady v podobě trhlin. Malé tmavé částice mají spíše vlastnosti oxidyckých nečistot. Obsah oxidů v nástřiku není výrazný. Ve větším množství jsou obsaženy póry, které mají podobu větších černých fází. Póry jsou v nástřiku přítomny v přijatelném množství. V horní části snímku je zřetelná velká černá fáze se světlejšími odstíny. V tomto případě se nejedná o pór, ale nejspíše o vyloučený karbid.



Obr. č. 13 – Mikrostruktura nástřiku WC-Co-Cr 86/10/4 (Zv. 200x)

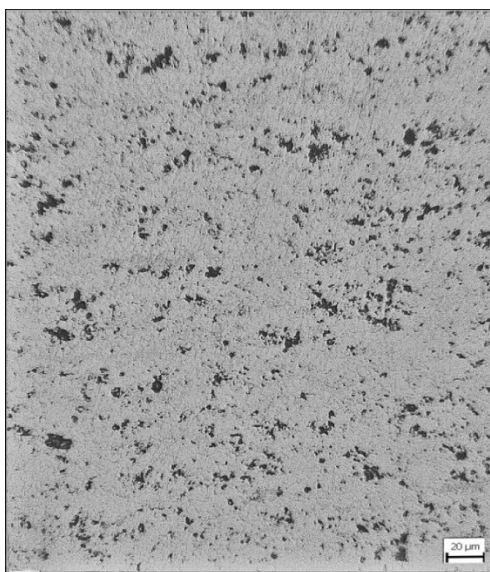
6.1.2 Mikrostruktura prášku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr 75/25}$

V porovnání s předchozím vzorkem povlaku prášku WC-Co-Cr 86/10/4 se dá pozorovat drobné snížení koncentrace pórů a rovnoměrnější rozdělení v nástřiku. Poměrně dobře se podařilo vyplnit i větší nerovnosti na povrchu základního materiálu. Až na výskyt malých dutin na hranici se substrátem, došlo k vytvoření souvislé vrstvy povlaku bez difuze do podkladové vrstvy. V celém průřezu nebyly odhaleny žádné trhliny.



Obr. č. 14 – Snímek hranice nástřiku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr 75/25}$ a základního materiálu (Zv. 50x)

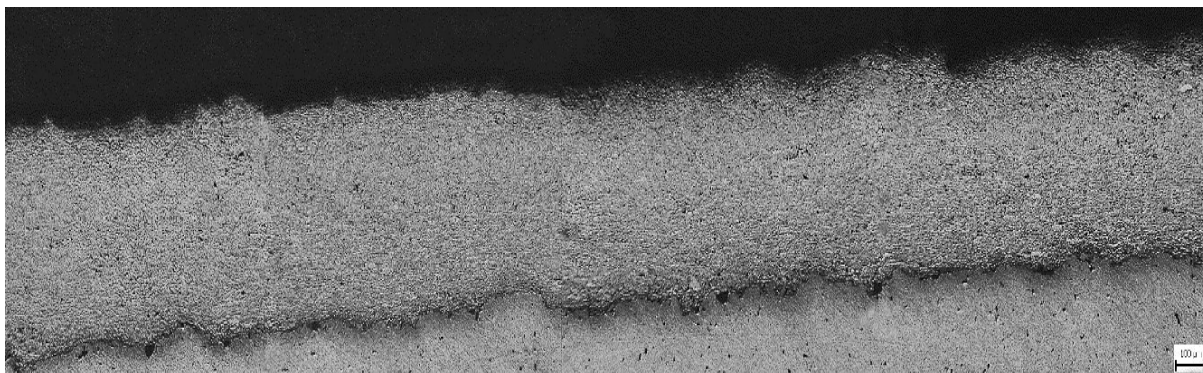
Z hlediska mikrostruktury je průřez nástřiku tvořen převážně roztavenými částicemi prášku. Objevují se v ní póry a oxidycké vměstky, které jsou doprovodným jevem při aplikaci nástřiku. Ohled je na ně brán již v materiálových listech, v nichž je předepsaná jejich předpokládaná dovolená hodnota. Eliminován je výskyt nenatavených částí a vměstků způsobených nečistotami.



Obr. č. 15 – Mikrostruktura nástřiku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr 75/25}$ (Zv. 200x)

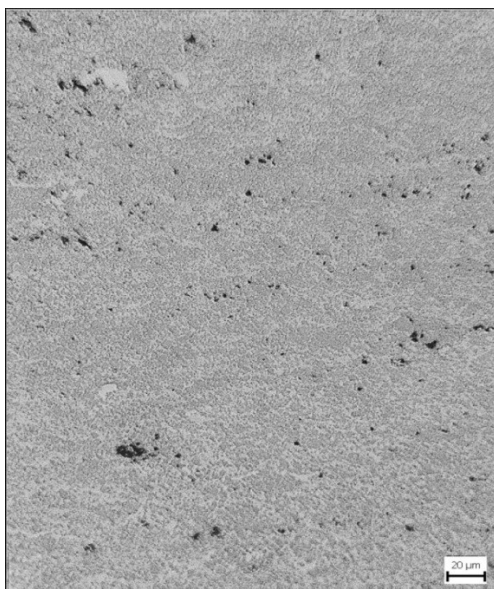
6.1.3 Mikrostruktura prášku WC-Co 83/17

Nástřík materiálu WC-Co 83/17 vykazuje řádově nižší obsah pórů než na snímcích předchozích materiálů. Relativně problematická místa vznikají na hranici nástřiku se substrátem. Vyskytuje se na ní sice malé množství, ale poměrně velikých nedostatků v podobě dutin, shluku pórů a nečistot. V konečném důsledku by při vyšších koncentracích těchto vad mohlo dojít až k odtržení vrstvy povlaku.



Obr. č. 16 – Snímek hranice nástřiku WC-Co 83/17 a základního materiálu (Zv. 50x)

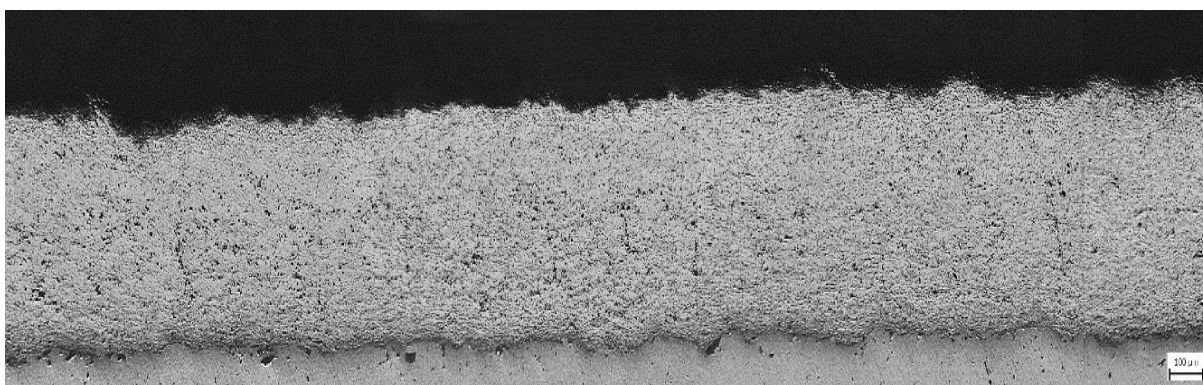
Mikrostruktura materiálu WC-Co 83/17 je jednoznačně tvořena dvěma různými fázemi v šedém a v bílém zbarvení. Světlejší fázi představuje především kobalt, který má nižší teplotu tavení. Působí tedy do jisté míry jako pojivo pro zbylou fázi. Velmi nízký obsah pórů a nečistot vytváří dojem kompaktního nástřiku. Z pozorování mikrostruktury nebyly v povlaku znatelné žádné vady ani trhliny. Co se týče mikrostruktury, jedná se o nejkvalitnější z pozorovaných povlaků. V případě této vrstvy můžeme předpokládat kvalitní využití nástřiku v průmyslových aplikacích.



Obr. č. 17 – Mikrostruktura nástřiku WC-Co 83/17 (Zv. 200x)

6.1.4 Vzorek prášku WC-Co 88/12

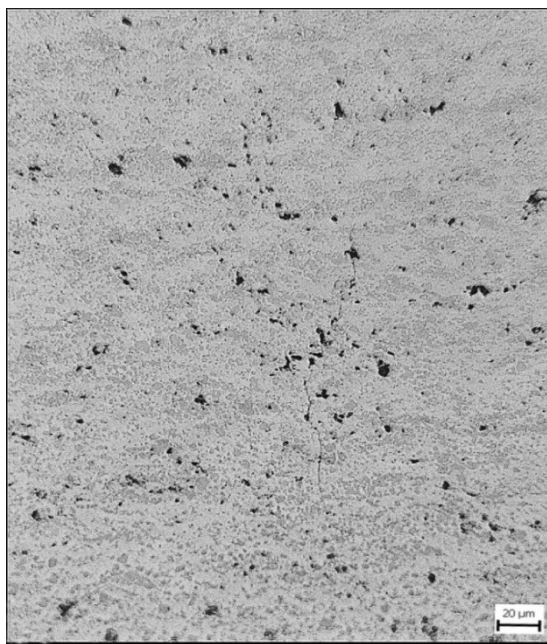
V některých oblastech vykazuje nástřik nedokonalosti v přilnutí k substrátu. Vytváří se oblasti, kde jsou viditelné malé dutinky. V jednom místě je na hranici pozorovatelný nejspíše kousek tryskacího média ulpělého v povrchu substrátu. Tyto nedokonalosti by vlastnosti nástřiku neměly výrazným způsobem ovlivnit. V zachyceném průřezu při padesátinásobném zvětšení je znázorněn povlak s celistvou strukturou a s malým obsahem pórů. Ve třech nebo čtyřech místech ovšem vznikají problematické oblasti, kde se několik pórů shlukuje.



Obr. č. 18 – Snímek hranice nástřiku WC-Co 88/12 a základního materiálu (Zv. 50x)

Ze snímku číslo 19 je pozorovatelné, že částice prášku při tvorbě povlaku tvořily eutektikum. Ve vzorku se proto vytvořila struktura, která znázorňuje průběh tuhnutí

taveniny. V povlaku se vyskytují četné trhliny, které lze vidět na přiloženém snímku. Není jisté, zda trhliny vznikly v průběhu tuhnutí nebo zda jsou doprovodným jevem při procesu vytváření vzorku. Trhliny jsou rozšířené především v oblasti mezi póry. Proto, aby bylo zcela jisté, v důsledku čeho trhliny vznikly, bylo by nutné vytvořit více vzorků a provést další pozorování. Ovšem při měření mikrotvrdomosti se na jednom z míst objevila další trhlina. To by mohlo značit, že pozorovaný povlak má poměrně křehkou strukturu a trhliny viditelné při pozorování mikrostruktury vznikly v průběhu úpravy vzorku. Proto by se při jeho aplikaci mělo postupovat jiným způsobem, který by zajistil spolehlivější vlastnosti povlaku.



Obr. č. 19 – Mikrostruktura nástřiku WC-Co 88/12 (Zv. 200x)

6.2 Vyhodnocení metalografické analýzy

Metalografická analýza byla provedena na čtyřech vzorcích. Tři ze čtyř vzorků vykazují celistvý průřez nástřiku bez vad a poruch. Místy se objevují větší póry na hranici mezi podkladovou vrstvou a nástřikem, které jsou přijatelné. Pouze vzorek WC-Co 88/12 má na snímku viditelné trhliny v nástřiku. Pro objasnění jejich vzniku by bylo vhodné vytvořit další vzorky a pozorovat změny v nástřiku.

6.3 Měření tloušťky HVOF vrstvy

Tloušťka vrstvy se měří na vzorku připraveném k metalografické analýze. Využilo se tedy stejného metalografického mikroskopu ve spojení s vhodným softwarem. U těchto vzorků je výrazně rozeznatelná hranice mezi substrátem a vrstvou nástřiku. Je tedy snadné změřit tloušťku povlaku.

Měření bylo provedeno na několika místech tak, aby byla hodnota tloušťky nástřiku co nejvíce objektivní. Na každém z konkrétních povlaků se provedlo deset měření. Po přepočítání a zprůměrování hodnot jsou výsledné hodnoty měření uvedeny v tabulkách 11 až 14 pod označením střední hodnota.

Tabulka 11 – Měření tloušťky povlaku WC-Co-Cr 86/10/4

Č. měření	Hodnota		
1	559 μm		
2	579 μm		
3	539 μm		
4	516 μm		
5	561 μm	Statistika	
6	501 μm	Počet měření	10
7	520 μm	Minimální hodnota	501 μm
8	502 μm	Maximální hodnota	579 μm
9	547 μm	Střední hodnota	532,6 μm
10	502 μm	Směrodatná odchylka	26,9 μm

Tabulka 12 – Měření tloušťky povlaku Cr₃C₂-NiCr 75/25

Č. měření	Hodnota		
1	514 μm		
2	537 μm		
3	577 μm		
4	592 μm		
5	555 μm	Statistika	
6	589 μm	Počet měření	10
7	550 μm	Minimální hodnota	514 μm
8	577 μm	Maximální hodnota	593 μm
9	547 μm	Střední hodnota	563,1 μm
10	593 μm	Směrodatná odchylka	25,2 μm

Tabulka 13 – Měření tloušťky povlaku WC-Co 83/17

Č. měření	Hodnota		
1	539 μm		
2	518 μm		
3	518 μm		
4	519 μm		
5	538 μm	Statistika	
6	542 μm	Počet měření	10
7	528 μm	Minimální hodnota	484 μm
8	522 μm	Maximální hodnota	542 μm
9	507 μm	Střední hodnota	521,5 μm
10	484 μm	Směrodatná odchylka	16,4 μm

Tabulka 14 – Měření tloušťky povlaku WC-Co 88/12

Č. měření	Hodnota		
1	475 μm		
2	491 μm		
3	517 μm		
4	502 μm		
5	508 μm	Statistika	
6	522 μm	Počet měření	10
7	507 μm	Minimální hodnota	475 μm
8	532 μm	Maximální hodnota	535 μm
9	483 μm	Střední hodnota	507,2 μm
10	535 μm	Směrodatná odchylka	19,0 μm

6.4 Vyhodnocení tloušťky

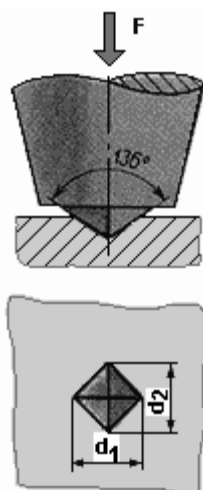
Hodnoty tloušťky jednotlivých povlaků jsou uvedeny před zbrúšením povrchové části. Ovšem je dosaženo takových hodnot, které zajišťují dostatečnou možnost úpravy povrchových nerovností. Nástřiky pak mohou být požadované drsnosti pro danou aplikaci. Povrchová vrstva nevykazuje výrazné vrcholy nebo krátery, které by značily možnost vad v podobě trhlin. Ty by se při broušení povrchu mohly šířit a zničit povlak. Vše tedy nasvědčuje tomu, že nástřik z pohledu makrostruktury vykazuje celistvý povrch.

6.5 Měření tvrdosti

V případě žárových nástřiků se nabízí využít jednu z metod vnikání indentoru do materiálu. Do této kategorie spadají zkoušky podle Brinella, Knoop, Vickerse a Rockwella. V případě HVOF žárového nástřiku byla pro zjištění tvrdosti zvolena metoda měření podle Vickerse.

6.5.1 Měření mikrotvrlosti dle Vickerse

Jedná se o měření tvrdosti, kdy do zkoušeného materiálu vniká diamantové tělísko ve tvaru jehlanu o čtvercové základně a vrcholovém úhlu 136° . Indentor, tedy jehlan, vniká do materiálu pod určitým zatížením a po určitou dobu ve směru kolmém na povrch řezu vzorkem. Jelikož se jde o měření nástřiku malé tloušťky, je zvolen způsob měření mikrotvrlosti o zatížení HV 0,1. Jehlan zanechá v materiálu stopu s dvěma úhlopříčkami. Pomocí mikroskopu se úhlopříčky změří a díky přepočtu vytváří hodnotu mikrotvrlosti. Pro nástřiky pomocí metody HVOF je předepsán počet vpichů v povlaku na hodnotu 10. Vpichy mohou být rozmístěny různě v nástřiku. Každý z vpichů musí být ve vzdálenosti velikosti dvou vpichů od sebe tak, aby nedošlo k ovlivnění výsledků.¹⁹



Obr. č. 20 – Tvar hrotu a vpichu při zkoušce podle Vickerse²⁰

6.5.2 Výsledky měření tvrdosti

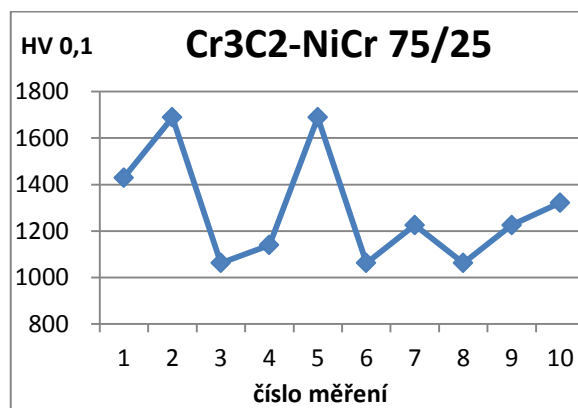
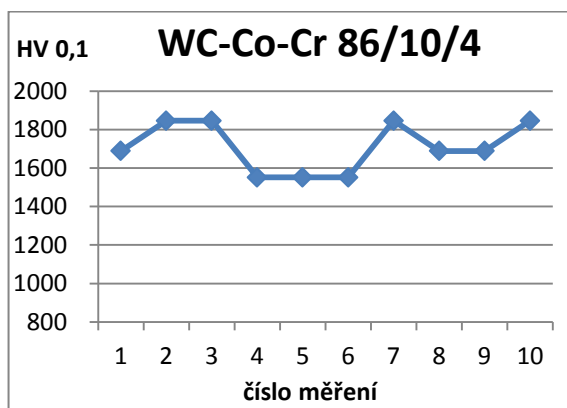
Měření mikrotvrlosti bylo provedeno na čtyřech vzorcích. Nejlépe, co se týče mikrotvrlosti, obstál nástřik prášku WC-Co-Cr 86/10/4. U tohoto povlaku měla mikrotvrdot průměrnou hodnotu 1 713 VH 0,1. Naopak nejnižší hodnoty dosahoval nástřik prášku Cr₃C₂-NiCr 75/25, jehož hodnota mikrotvrlosti je 1 275 HV 0,1. Hodnoty měření i průměrné hodnoty tvrdosti uvedených i zbylých prášků jsou zapsány níže v Tabulce 15.

Tabulka 15 – Měření mikrotvrdomosti nástřiků

Číslo měření	Hodnoty mikrotvrdomosti [HV 0,1]			
	WC-Co-Cr 86/10/4	Cr ₃ C ₂ -NiCr 75/25	WC-Co 83/17	WC-Co 88/12
1	1689	1430	1551	1551
2	1846	1689	1551	1551
3	1846	1062	1430	1430
4	1551	1140	1322	1322
5	1551	1689	1551	1551
6	1551	1062	1430	1430
7	1846	1226	1551	1551
8	1689	1062	1322	1322
9	1689	1226	1551	1551
10	1846	1322	1689	1689
Průměrná hodnota	1 713	1 275	1 547	1 488

V grafickém znázornění průběhu naměřených hodnot prášku WC-Co-Cr 86/10/4 je viditelný poměrně stálý obraz měřených hodnot. Dalo by se tedy říci, že se jedná o vytvořený povlak s konstantní hodnotou tvrdosti v celém průřezu.

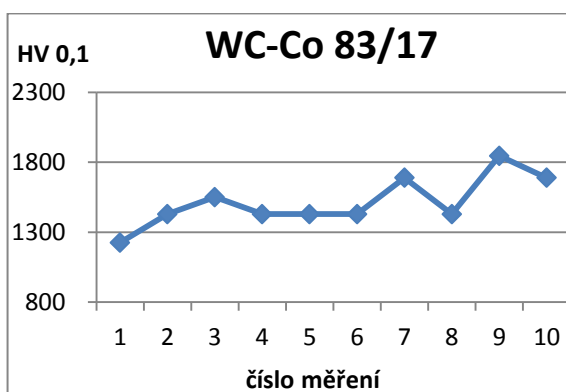
Z vedlejšího grafu prášku Cr₃C₂-NiCr 75/25 lze vyčíst mnohem větší rozptyl naměřených hodnot. Rozdílný průběh mikrotvrdomosti se mohl projevit na základě jiného chemického složení, kdy při tavbě vznikaly oblasti s vyšší a nižší tvrdostí. Svůj vliv na to má i citlivost zvolené metody měření mikrotvrdomosti s nízkým zatížením.



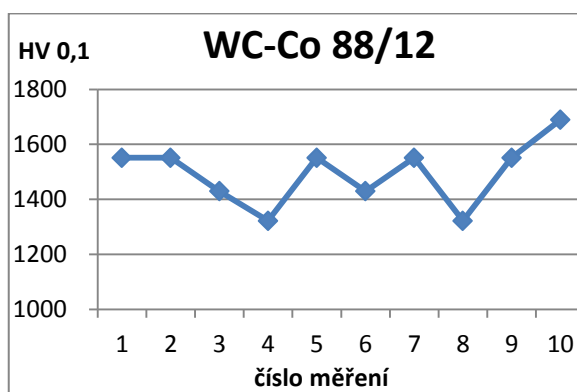
Obr. č. 21 – Mikrotvrdomost WC-Co-Cr 86/10/4 Obr. č. 22 – Mikrotvrdomost Cr₃C₂-NiCr 75/25

V případě nástřiku prášku WC-Co 83/17 není znatelný velký rozptyl naměřených hodnot. Ovšem mezi naměřenou nejvyšší a nejnižší hodnotou se vytvořil rozdíl docela výrazný. Tento rozdíl může vytvářet způsob tuhnutí vytvořeného eutektika při aplikaci nástřiku.

Prášek WC-Co 88/12 vykazuje konstantní a ne příliš velký rozptyl hodnot mikrotvrdomosti kolem průměru. Viditelné je vymezení jedné hodnoty od zbytku. Dalo by se to považovat za chybu měření, která se nedá vyloučit. Dalším důvodem by mohla být existence nepravidelné fáze tvrdší povahy.

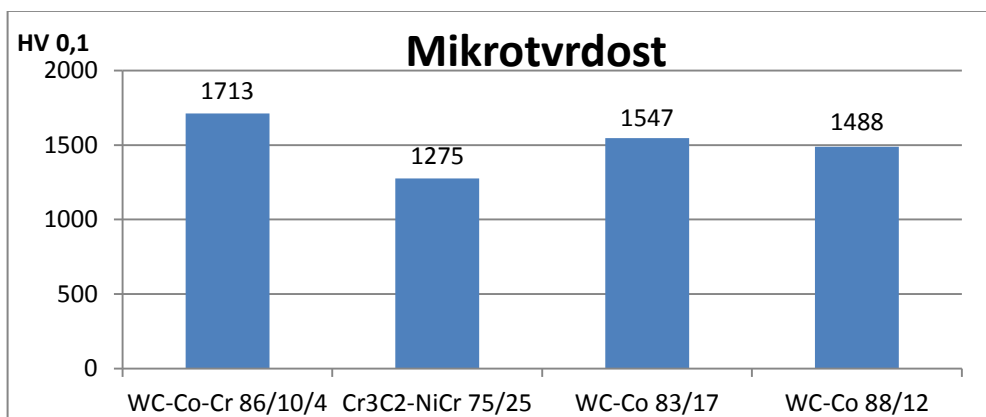


Obr. č. 23 – Tvrdomost prášku WC-Co 83/17



Obr. č. 24 – Tvrdomost prášku WC-Co 88/12

Pro přehlednost a lepší rozlišení průměrných hodnot mikrotvrdomosti slouží následující graf. Každá z naměřených hodnot se od tabulkových hodnot liší, konkrétně každá z hodnot je o něco vyšší, než hodnoty uvedené v materiálových listech. Rozdíl mezi těmito hodnotami může být dán parametry nástřiku, velikostí zrna prášku a částečně i zvoleným zatížením při měření mikrotvrdomosti. Hodnota zatížení při měření mikrotvrdomosti byla pro experiment zvolena nižší především z důvodu úzké vrstvy nástřiku.



Obr. č. 25 – Porovnání mikrotvrdomosti nástřiků

6.6 Vyhodnocení mikrotvrlosti

Jednotlivé nástřiky v měření mikrotvrlosti obstály. Každý z nástřiků dosahoval vyšších hodnot mikrotvrlosti, než je předepsáno. Nejvyšší hodnota 1713 HV 0,1 byla pozorována u nástřiku WC-Co-Cr 86/10/4. Nejnižší hodnotu mikrotvrlosti z těchto nástřiků vykazoval vzorek Cr₃C₂-NiCr 75/25. Její velikost je 1275 HV 0,1. Z tohoto hlediska není aplikace problematická a je možné ji doporučit pro průmyslové využití.

6.7 Stanovení podílu pórů v nástřiku

Ke stanovení množství pórů v jednotlivých povlacích se využil metalografický mikroskop Neothop 21. Postup analýzy byl následující. Nejprve došlo ke snímání mikrostruktury nástřiku v tmavém poli. To vedlo u vzorků k rozpoznání pórů od dalších fází vyskytujících se v povlaku. Póry, na rozdíl od ostatních fází, byly znázorněny v mnohem větším kontrastu. Následně byly pořízeny klasické snímky mikrostruktury stejného místa a porovnaly se se snímky tmavého pole. Pomocí softwaru se vyznačily místa tvořené póry. Výpočetní program přepočítal podíl mezi označenými póry a zbylými místy na snímku. Výsledkem pozorování bylo procentuální vyjádření podílu póru v nástřicích.

Tabulka 16 – Nástřik WC-Co-Cr 86/10/4

Měření	Podíl pórů [%]
1	2,87
2	2,65
3	2,58
Průměr	2,7

Tabulka 17 – Nástřik Cr₃C₂-NiCr 75/25

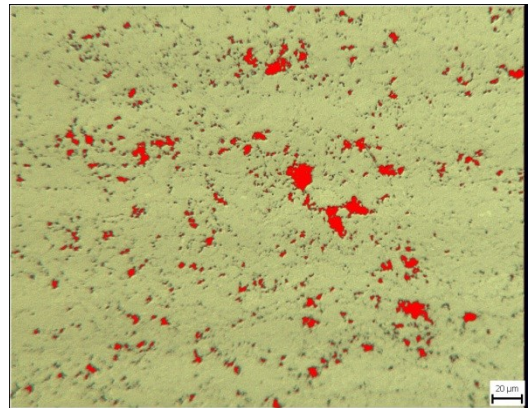
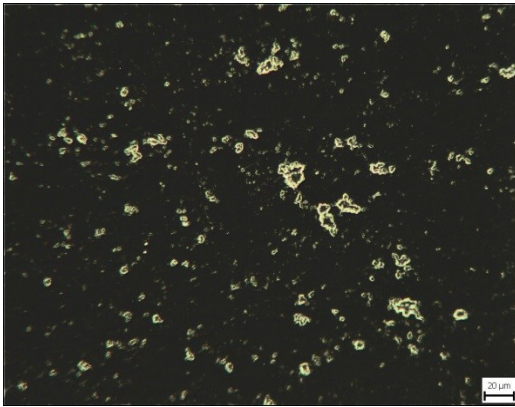
Měření	Podíl pórů [%]
1	1,50
2	1,75
3	1,82
Průměr	1,69

Tabulka 18 – Nástřik WC-Co 83/17

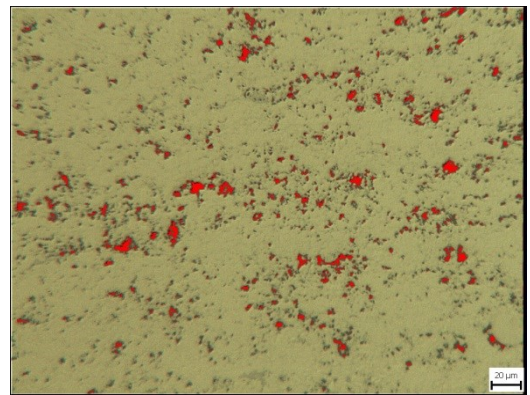
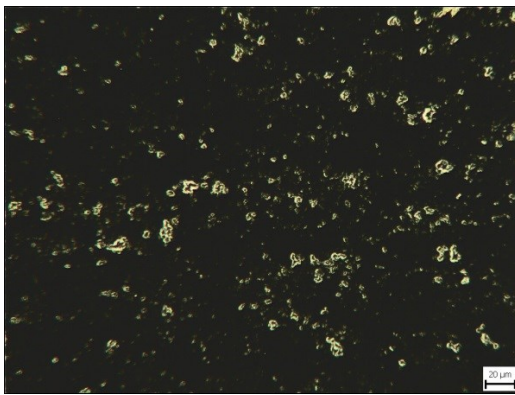
Měření	Podíl pórů [%]
1	0,05
2	0,12
3	0,16
Průměr	0,11

Tabulka 19 – Nástřik WC-Co 88/12

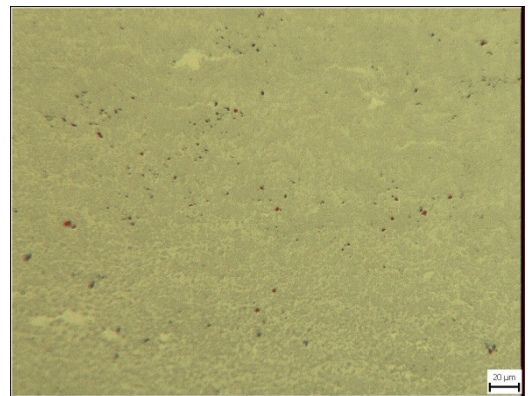
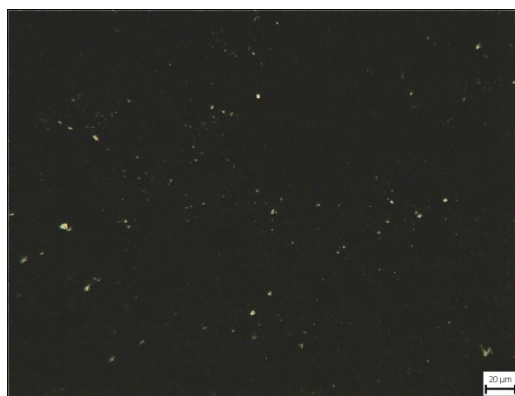
Měření	Podíl pórů [%]
1	0,30
2	0,34
3	0,3
Průměr	0,31



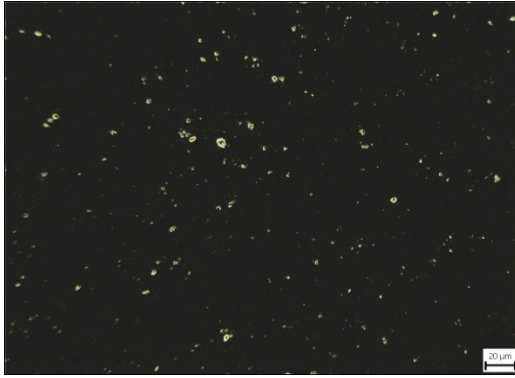
Obr. č. 26 – WC-Co-Cr 86/10/4 tmavé pole Obr. č. 27 – WC-Co-Cr 86/10/4 označení pórů



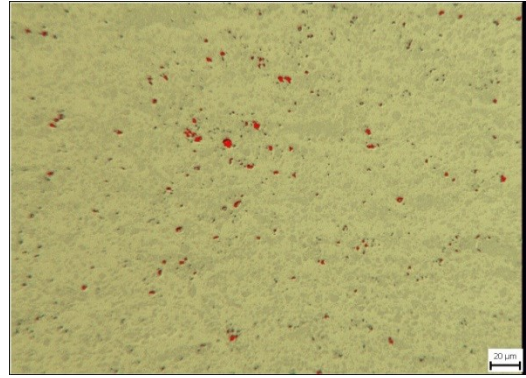
Obr. č. 28 – Cr₃C₂-NiCr 75/25 tmavé pole Obr. č. 29 – Cr₃C₂-NiCr 75/25 označení pórů



Obr. č. 30 – WC-Co 83/17 tmavé pole Obr. č. 31 – WC-Co 83/17 označení pórů



Obr. č. 32 – WC-Co 88/12 tmavé pole



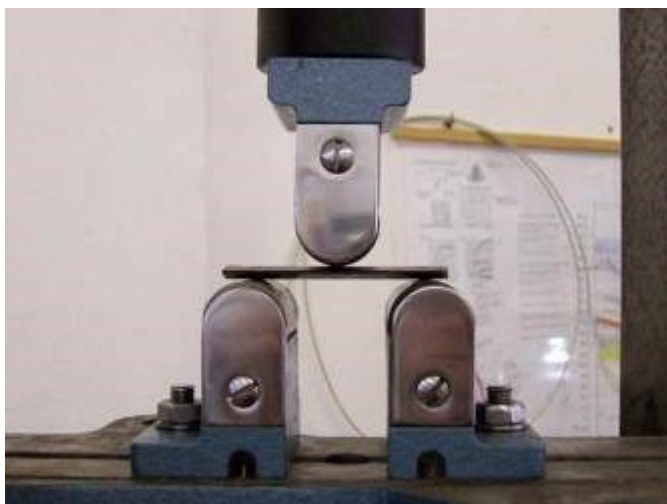
Obr. č. 33 – WC-Co 88/12 označení pórů

6.8 Vyhodnocení pórovitosti

Pro všechny použité nástřiky je předepsaná pórovitost do 2%. Tuto podmínku splňují nástřiky Cr₃C₂-NiCr 75/25 – 1,69%, WC-Co 83/17 – 0,11% a WC-Co 88/12 – 0,31%. Vzorek prášku WC-Co-Cr 86/10/4 vykazuje poměrně výraznou pórovitost 2,7%. Vysvětlením může to být použitá řada prášku s větší velikostí částic nebo zvolený způsob měřící metody.

6.9 Zkouška ohybem

V tomto případě testování HVOF nástřiků se nejedná o klasickou zkoušku ohybem. Průběh zkoušky je podobný. Připravený materiál ve tvaru ploché desky z jedné strany pokryté nástřikem se plynule ohýbá v rozsahu 180°. K ohybu dochází mezi dvěma hroty, o které je opřený vzorek. Třetí trn působí na vzorek ze shora tak, aby síla směřovala mezi opěrné trny. Poloměr ohybu dosahuje velikosti v závislosti na poloměru zatěžovacího trnu. Výsledkem zkoušky nejsou mechanické hodnoty, ale obrazový výstup místa ohybu, ve kterém může docházet k porušení nástřiku. Jedná se o jednu z metod, pomocí které se zjišťuje přilnavost nástřiku k substrátu. Vyhodnocování probíhá pouhým okem. Zkoušení se zaměřuje na četnost prasklin v místě ohybu a počet odchlípnutých šupin nástřiku od základního materiálu. Testování probíhá na zařízeních určených pro zkoušku ohybem nebo jim podobných.



Obr. č. 34 – Zařízení pro zkoušku ohybem ²²

6.9.1 Výsledek ohybové zkoušky

Zkouška ohybem byla provedena pro každý nástřík prášku na třech vzorcích. Protože jsou výsledky všech povlaků podobné, je pro názornou ukázkou uveden příklad zkoušky na vzorku WC-Co-Cr 86/10/4. Rozměry vzorku pro zkoušku ohybem dosahovaly hodnot 150 x 25 x 2 mm. Tloušťka nástříku byla minimálně 0,16 mm. Zkouška ohybem byla provedena v rozmezí 180°. K ohybu docházelo na trnu o průměru 12,5 mm.

Na vzorcích je znatelné porušení nástříku v podobě trhlin. Vyskytují se podél okraje vzorků v místě ohybu. Ve stejném místě došlo také ke zvrásnění nástříku na povrchu vzorku. Nedošlo k jeho výraznému poškození, ani k odtržení od podkladu. Po zkoušce ohybem zůstal nástřík kompaktní s přípustným porušením.



Obr. č. 35 – Výsledek zkoušky ohybem prášku WC-Co-Cr 86-10-4

6.10 Princip zkoušky krutem

Stejně jako v předchozím případě se jedná o mechanickou zkoušku. Výsledkem zkoušky opět bude obrazový výstup vzorku ve tvaru ploché desky, nikoli údaje o mechanických hodnotách. Průběh zkoušky je následující. Vzorek se ustaví mezi dvě čelisti. Jedna z čelistí je statická a druhá otočná. Upnutý vzorek se podrobí krutu jedním směrem o úhel 90° . Následně dojde k vrácení do výchozí polohy. Z té dojde ke krutu vzorku opačným směrem opět o hodnotu úhlu 90° . Nakonec se vrátí zpět do původní polohy. Výsledný vzorek po deformačním procesu nebude mít vlivem působení vnitřního napětí přímý tvar, ale bude zkroucený. Po zvětšení místa krutu se zkoumá totožné porušení jako při předchozí zkoušce ohybem. Zaměřený je na trhliny a schopnost soudržnosti povlaku se základním materiálem.

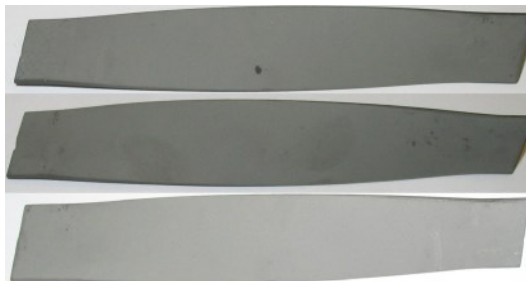


Obr. č. 36 – Zařízení pro zkoušku krutem²³

6.10.1 Výsledek zkoušky krutem

Pro zkoušku ohybem byly vytvořeny tři vzorky od každého nástřiku. Vzorky odpovídaly rozměru 150 x 25 x 2 mm. Tloušťka nástřiku na každém vzorku činila minimálně 0,16 mm. Příklad zkoušky byl proveden na vzorku opatřeném nástřikem prášku WC-Co-Cr 86/10/4. Zkouška byla uskutečněna v rozsahu 90° z výchozí polohy na obě strany.

Na následujících obrázcích je znázorněn stav vzorku po zkoušení a dále pak přiblížení povrchu vzorku po provedení zkoušky krutem. Na obrázcích není znatelné nepřípustné porušení povrchu nástřiku. Povlak vykazuje kompaktní vrstvu bez trhlin. Každý z nástřiků vykazoval podobné výsledky.



Obr. č. 37 – Stav vzorku po zkoušce krutem



Obr. č. 38 – Povrch po zkoušce krutem (Zv. 20x)

6.11 Vyhodnocení zkoušek ohybem a krutem

Vyhodnocení zkoušky ohybem i krutem je shrnuto v následujících tabulkách. V tabulkách je uveden druh nástřiku a způsob jeho poškození. Každý z nástřiků v těchto zkouškách obstál. Pro použití v průmyslných aplikacích je vyhovující.

Tabulka 20 – Vyhodnocení zkoušky ohybem

Typ prášku	Vyhodnocení zkoušky	Výsledek
WC-Co-Cr 86-10-4	Drobné přípustné trhliny bez odtržení	Vyhovuje
Cr3C2-NiCr 75/25	Drobné přípustné trhliny bez odtržení	Vyhovuje
WC-Co 83/17	Drobné přípustné trhliny bez odtržení	Vyhovuje
WC-Co 88/12	Drobné přípustné trhliny bez odtržení	Vyhovuje

Tabulka 21 – Vyhodnocení zkoušky krutem

Typ prášku	Vyhodnocení zkoušky	Výsledek
WC-Co-Cr 86-10-4	Bez trhlin a nepřípustného porušení	Vyhovuje
Cr3C2-NiCr 75/25	Bez trhlin a nepřípustného porušení	Vyhovuje
WC-Co 83/17	Bez trhlin a nepřípustného porušení	Vyhovuje
WC-Co 88/12	Bez trhlin a nepřípustného porušení	Vyhovuje

Závěr

Diplomová práce je zaměřena na studii HVOF nástřiků. Důraz se klade především na skupinu prášků odolávajících abrazi za vyšších teplot. Jedná se o čtyři různé prášky WC-Co-Cr 86/10/4, Cr₃C₂-NiCr 75/25, WC-Co 83/17, WC-Co 88/12. Tyto prášky mají podobné vlastnosti. Cílem bylo ověřit některé z těchto vlastností. Teoretická část diplomové práce je soustředěna na studii samotné metody vysokorychlostního nástřiku a rozbor zmíněných prášků použitých na vzorky. Experimentální část je tvořena různými měřeními k ověření vlastností tvořených nástřiků. Jedná se o analýzu mikrostruktury, měření tloušťky povlaku, měření mikrotvrdomosti, kontrolu pórovitosti a testy přilnavosti nástřiku k substrátu.

Mikrostruktura jednotlivých nástřiků vykazuje výskyt rozdílných fází, pórů a oxidů. Žádný z vytvořených nástřiků to nijak neohrožuje. Ve vzorcích WC-Co-Cr 86/10/4 a Cr₃C₂-NiCr 75/25 je jednoznačně vidět větší obsah pórů a oxidů než u zbylých dvou nástřiků. Problematická místa ovšem vznikají ve vzorku WC-Co 88/12. U tohoto vzorku se v mikrostrukturu vyskytují mikrotrhliny. Aby byly zjištěny jejich příčiny, měla by mu tedy být věnována zvýšená pozornost.

Co se týče tloušťky nástřiku, každý z uvedených vzorků vyhovuje údajům zadaným výrobcem. Na vzorcích je vytvořena dostatečně velká vrstva, aby mohlo dojít k jejímu zbroušení na požadovanou drsnost. Nejvyšší hodnoty tloušťky bylo dosaženo u prášku Cr₃C₂-NiCr a to 563,1 μm. Další hodnoty byly naměřeny u vzorku WC-Co 88/12 – 507,2 μm, WC-Co 83/17 – 521,5 μm, WC-Co-Cr 86/10/4 – 532,6 μm.

Měření mikrotvrdomosti proběhlo při zatížení HV 0,1. Některé z hodnot vykazovaly mírný rozptyl daný strukturou nástřiku. Žádná z minimálních hodnot neklesla pod hodnoty garantované výrobcem. Nástřik prášku WC-Co-Cr 86/10/4 měl nejvyšší hodnotu mikrotvrdomosti 1713 HV 0,1. Nejnižší mikrotvrdomost byla naměřena u vzorku prášku Cr₃C₂-NiCr 1275 HV 0,1. U dalšího prášku WC-Co 88/12 byla naměřena hodnota 1488 HV 0,1 a u prášku WC-Co 83/17 pak 1547 HV 0,1.

Následným hodnoceným kritériem byl obsah pórů v jednotlivých nástřicích. V povlacích WC-Co 88/12, WC-Co 83/17 a Cr₃C₂-NiCr bylo dosaženo pórovitosti pod

2 %. Výborný výsledek byl získán u nástřiku WC-Co 83/17, u kterého byla naměřena pórovitost 0,11%. Naopak jako problematický by se mohl jevit nástřik prášku WC-Co-Cr 86/10/4, u kterého byla zjištěna pórovitost 2,7 %. V tomto případě by bylo vhodné upravit parametry nástřiku nebo zvolit jemnější složení prášku.

Přilnavost povlaku k podkladové vrstvě a jeho soudržnost byla testována pomocí zkoušky ohybem a krutem. V případě zkoušky ohybem došlo v místě ohybu u všech typů nástřiku k výskytu trhlin na okraji vzorku. Povrch vzorků zůstal zvrásněný, bez známek porušení soudržnosti se základním materiálem. Vzhledem k tomu, že nedošlo k odloupení nástřiku od povrchu, je toto poškození přípustné. U zkoušky krutem byly pozorovány lepší výsledky. Nedošlo k výskytu žádných trhlin a povlak vykazoval celistvý povrch. Všechny vzorky ve zkoušce ohybem i krutem vyhověly.

HVOF nástřiky prášků WC-Co-Cr 86/10/4, Cr_3C_2 -NiCr 75/25, WC-Co 83/17, WC-Co 88/12 obstály v hodnocení vybraných vlastností. Problém s výskytem trhlin při pozorování mikrostruktury nástřiku prášku WC-Co 88/12 nebyl dán zřejmě povahou vzorku, ale jeho přípravou. V následné zkoušce ohybem i krutem obstál a nevykazoval problematická místa s nepřijatelnými trhlinami. Testované povlaky jsou tedy vyhovující a je možné je využít v průmyslových aplikacích.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Vladislavu Ochodkovi za konzultace a udělení odborných rad při psaní diplomové práce. Za odbornou pomoc a profesionální přístup při práci v laboratořích na přípravě vzorků a jejich analýze bych chtěl poděkovat Ing. Zdeňku Štorkánovi.

Použité prameny

- [1] DAVIS, J. R. ASM INTERNATIONAL. *Handbook of Thermal Spray Technology* [online]. USA: ASM International, 2004 [cit. 2015-01-06]. ISBN 978-0-87170-795-6. Dostupné z: www.asminternational.org
- [2] PAWŁOWSKI, L. *The science and engineering of thermal spray coatings*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2008, [cit. 2015-01-06], 626 p. ISBN 978-047-1490-494.
- [3] H.C. STARCK. *AMPERIT®: Thermal Spray Powders*. 32 s. [cit. 2015-01-18]. Dostupné z:
<http://www.hcstarck.com/hcs-admin/file/ae23e4b2316f58850131b30f364743f9.de.0/thermal-spray-powders-amperit-hcstarck.pdf;jsessionid=872DF6B50D5123FB1BCEC1F78E8F51C6.s1>
- [4] *SERVIS ARMATUR: VYSOKORYCHLOSTNÍ NÁSTRÍK HVOF (High Velocity Oxy-Fuel)* [online]. 2012 [cit. 2015-01-20]. Dostupné z:
<http://www.servisarmatur.cz/index.php?page=high-velocity-spray>
- [5] SULZER METCO. *An Introduction to Thermal Spray*. 2012, 24 s. [cit. 2015-01-22].
- [6] SULZER METCO. *High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Solutions*. 2012, 16 s. [cit. 2015-01-22].
- [7] PRAXAIR. *Model JP-5000 High Pressure/HVOF*. 7 s. [cit. 2015-02-05].
- [8] PRAXAIR. *Technical data Buletin*. Concord, USA, 1998, 6 s. [cit. 2015-01-27].
- [9] H.C. SARCK. *SPRAYTIME*. Texas, 2010, 28 s. [cit. 2015-01-28].
- [10] *Metallographic preparation of thermal spray coatings*. Denmark, 2005, 6 s. [cit. 2015-02-15].
- [11] *AMPERIT: Thermal Spray Powders*. Goslar, Germany, 2012, 28 s. [cit. 2015-02-15].

- [12] *Struers A/S: New Discotom-6* [online]. 2015 [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: http://www.struers.com/default.asp?top_id=0&main_id=0&sub_id=0&doc_id=653&admin_language=2
- [13] *OC Tester* [online]. 2009 [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: http://www.qctester.com/products/products_list?id=004003174
- [14] *Tepelné spracovanie kovov: TegraSystem* [online]. [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: <http://htsbb.eu/technik/tegrasystem/>
- [15] H.C. STARCK. *WC-Co 88/12*. 2011, 3 s. [cit. 2015-02-10].
- [16] H.C. STARCK. *WC-Co 83/17*. 2011, 3 s. [cit. 2015-02-10].
- [17] H.C. STARCK. *WC-Co-Cr 86/10/4*. 2011, 3 s. [cit. 2015-02-10].
- [18] H.C. STARCK. *Cr₃C₂-NiCr 75/25*. 2011, 3 s. [cit. 2015-02-10].
- [19] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. 1999.
- [20] *ConVERTER: Zkouška tvrdosti dle Vickerse* [online]. 2002 [cit. 2015-04-8]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-vickers.htm>
- [21] *KSP: Metalografická laboratoř* [online]. 2005 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/meta/meta.htm>
- [22] *Měřicí přístroje* [online]. 2014 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.drevo.naseskola.net/drevo/refreraty-2014-15/75-vz-n12014-15-2/681-merici-pristroje.html>

[23] *Zwick Roell* [online]. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.zwick.cz/cs/produkty/stroje-pro-dynamicke-zkouseni/servo-hydraulicke-zkusebni-stroje/vyrobni-rada-hc-od-10-do-25-kn.html>

[24] *HP/HVOF Equipment Solutions*. USA, 2011, [cit. 2015-02-05]. Dostupné z: [http://www.praxairsurfacetechologies.com/na/us/pst/pst.nsf/0/63270BECB14B701D852576A5005876F1/\\$file/HVOF+Brochure.pdf](http://www.praxairsurfacetechologies.com/na/us/pst/pst.nsf/0/63270BECB14B701D852576A5005876F1/$file/HVOF+Brochure.pdf)

[25] AMBROŽ, Oldřich, KAŠPAR, Jiří. *Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1990. 320 s. [cit. 2015-04-25], ISBN 80-03-00347-4.

[26] PRAXAIR. 1999. *Model 1264 Powder Feeder: Technical Data* [online]. Concord, USA, 2 s. [cit. 2015-04-28].