



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Otěruvzdorné kompozitní materiály

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Lukáš Suchánek

VEDOUCÍ PRÁCE: prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2342 Teoretický základ strojního inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Suchánek** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **502361**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Otěruvzdorné kompozitní materiály

Název bakalářské práce anglicky:

Wear resistant composite materials

Pokyny pro vypracování:

Přehled o kompozitních materiálech s kovovou a polymerní maticí. Mechanické vlastnosti, odolnost proti adhezivnímu a abrazivnímu opotřebením, aplikace.

Seznam doporučené literatury:

Časopisy - Wear, Tribology International, Tribology Letters, Composites a pod.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Jan Suchánek, CSc. ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **11.08.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolářik, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Jan Suchánek, CSc., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití mého školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Rád bych upřímně poděkoval mému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Janu Suchánkovi, CSc. za cenné rady, odborné vedení a trpělivost během celého procesu realizace bakalářské práce. Dále bych rád vyjádřil své díky konzultantům Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D. a Ing. Tomáši Panáčkovi, kteří mi poskytli důležité informace, materiály a odborné konzultace. Jejich přínos mi pomohl k pochopení problematiky a realizaci experimentální části bakalářské práce.

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na otěruvzdorné kompozitní materiály. V teoretické části popisuje obecné vlastnosti, výhody, nevýhody, možnosti výroby a rozdělení kompozitu. Dále chemické úpravy povrchu a otěruvzdorné povlaky. V experimentální části je zahrnut vlastní projekt zabývající se výsledky technologických zkoušek zkoumajících otěruvzdornost konkrétního druhu kompozitu.

Název diplomové práce: Otěruvzdorné kompozitní materiály

Autor práce: Lukáš Suchánek

Vedoucí práce: prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.

Konzultant: Ing. Pavel Rohan, Ph.D., Ing. Tomáš Panáček

Akademický rok: 2022/23

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: 12133 – Ústav strojírenské technologie

Vedoucí ústavu: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Rozsah práce: 61 stránek, 2 tabulky, 41 obrázků

Klíčová slova: Kompozit, plnivo, pojivo, matrice, otěruvzdornost

Annotation

The bachelor thesis is focused on abrasion resistant composite materials. In the theoretical part it describes general properties, advantages, disadvantages, production possibilities and composite classification. Furthermore, chemical surface treatments and abrasion resistant coatings. The experimental part includes an actual project dealing with the results of technological tests investigating the abrasion resistance of a particular type of composite.

Title of the final thesis: Wear-resistant composite materials
Author: Lukáš Suchánek
Supervisor: prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.
Consultant: Ing. Pavel Rohan, Ph.D., Ing. Tomáš Panáček
Academic year: 2022/23
University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department: 12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Extent: 61 pages, 2 tables, 41 pictures
Keywords: Composite, filler, binder, matrix, wear-resistance

Obsah

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE	9
2. Kompozitní materiál	10
Výhody.....	10
Nevýhody.....	10
2.1 Plnivo.....	11
2.2 Pojivo (matrice).....	11
2.3 Pomocné prvky (přísady)	12
2.4 Dělení kompozitních materiálů	12
2.5 Kompozity dle typu matrice	13
2.5.1 Kompozity s polymerní matricí (PMC)	13
2.5.2 Kompozity s kovovou matricí (MMC)	13
2.5.2.1 Typy kompozitu s kovovou matricí	14
2.5.3 Kompozity s keramickou matricí.....	14
2.5.4 Kompozity s uhlíkovou matricí (CFC, C/C).....	14
2.6 Výroba kompozitních materiálů	15
2.7 Synergický efekt	19
2.8 Možnosti zvýšení otěruvzdornosti.....	19
3. Chemické úpravy povrchu	20
3.1. Galvanické pokovování	20
3.1.1. Chromování	21
3.1.2. Niklování.....	22
3.2. Anodická oxidace	22
3.3. Sol-gelové vrstvy.....	23
3.4. PECVD.....	23
4. Otěruvzdorné povlaky	24

4.1	Metoda PVD	24
4.2	Metoda CVD	26
4.3	Metoda DLC.....	26
4.4	Další technické povlaky a nástřiky.....	27
4.4.1	Polyuretanové nástřiky	27
4.4.2	Keramické povlaky	28
4.5	Povlaky nanesené svařovacími technologiemi	29
4.5.1	Plazmové navařování	29
4.5.2	Svařování v ochranném plynu (MIG/MAG)	29
4.5.3	Elektrostatické nástřiky	30
5.	Materiál a metody použité v experimentální části.....	31
5.1.	Hadfieldova ocel (austenitická manganová ocel).....	31
5.2.	Karbid boru (B ₄ C)	32
5.3.	PTA – plazmově přenesený oblouk	32
5.4.	Nanášení tvrdých návarů (Hardfacing).....	33
5.5.	Abrazivní opotřebení	33
5.5.1.	Zkouška abrazivního opotřebení.....	33
5.5.2.	Konstrukce zařízení s pryžovým kotoučem	34
6.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	35
6.1.	Výroba vzorků.....	35
6.2.	Abrazivní zkouška zařízením s pryžovým kotoučem.....	42
6.2.1.	Příprava vzorků a konstrukce přístroje	42
6.2.2.	Průběh a zhodnocení zkoušky.....	46
7.	ZÁVĚR.....	49
	Bibliografie	50
	Seznam tabulek	59
	Seznam obrázků	60

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

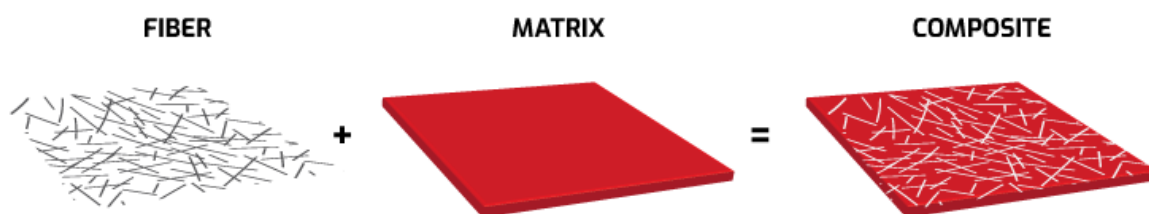
Bakalářská práce zkoumá otěruvzdornost kompozitních materiálů. Schopnost kompozitních materiálů odolávat opotřebení je zásadní v aplikacích, kde dochází k abrazivnímu kontaktu nebo mechanickému tření. Kompozity mají potenciál vytvářet materiály s dlouhou životností s výjimečnou odolností proti oděru díky svým odlišným vlastnostem a schopnosti míchat různé komponenty dohromady. Cílem práce je provést rozsáhlé zkoumání různých kompozitních materiálů se zaměřením na analýzu jejich mechanických vlastností, složení a mikrostruktury. Prostřednictvím této studie bude dosaženo komplexního pochopení odolnosti materiálů vůči opotřebení. Dále bude provedena analýza faktorů, které ovlivňují otěruvzdornost kompozitních materiálů. Následně bude pozornost zaměřena na experimentální zkoušky a budou použity vhodné zkušební metody k vyhodnocení otěruvzdornosti kompozitních materiálů.

Výsledky práce budou pomáhat k lepšímu porozumění a pochopení otěruvzdornosti kompozitních materiálů.

2. Kompozitní materiál

Jde o složený, progresivní materiál, který se skládá ze dvou homogenních systémů s odlišnými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi – materiál je tvořený matricí (spojitá fáze), která funguje jako pojivo, a plnivo (většinou nespojitá fáze), které představuje výztuž kompozitu (Obrázek 1). [1] [2] [3] [4]

Ve zkratce jde o umělé spojení jednodušších směsí (materiálů), díky jejich kombinaci získává kompozit nové vlastnosti oproti vlastnostem jednotlivých komponentů. [5] [6]



Obrázek 1 Složení kompozitu na bázi polymerů (výztuž + matrice) [2]

Výhody

Mezi největší výhody kompozitních materiálů patří pevnost a tuhost vůči hmotnosti. Kompozity mají výrazné využití ve stavebnictví díky velmi přijatelné tepelné roztažnosti. Další výhodou kompozitu je využitelnost v technice například „Lightweight“ konstrukce. Hlavní perspektivou je tvorba úplně nových materiálů a možnost splnění různých požadavků na materiál. Kompozity mohou dosáhnout snížení počtu dílů, tím pádem minimalizování výrobních nákladů. Kompozitní materiál je většinou špatný vodič tepla a elektřiny, což z něj dělá skvělý izolátor. [1] [2] [4] [7] [8]

Nevýhody

Kompozitní materiály mají samozřejmě i řadu nevýhod, mezi největší patří větší křehkost ve srovnání s tvářenými materiály a tím pádem snadnější poškození a zároveň složitá oprava. Další nevýhodou je složitě skladování z důvodu nutnosti

uchování kompozitu v chladnějším prostředí. Kompozitní materiály používají pryskyřice – nutnost opatření proti požáru. Při spalování složitého kompozitu dochází k uvolňování toxických výparů a částic, což může způsobit vážné zdravotní problémy a rizika. [4] [6] [7] [8]

Nejnámější příklad kompozitního materiálu je beton (vyztužený, průsvitný, savý, drátkobeton...). Další příklady mohou být dřevo (přírodní nebo umělé), kompozit s keramickou matricí, kovovou matricí, kevlar, umělý bambus, sklolaminát, bahenní cihly, polymer vyztužený uhlíkovými vlákny, sendvičový panel... [9] [10]

2.1 Plnivo

Plnivo neboli výztuž kompozitu je sekundární fáze zajišťující pevnost materiálu. Může být skleněná, uhlíková, aramidová nebo čedičová. Každá výztuž má své využití: skleněná – standardní mechanické vlastnosti, uhlíková – požadavky na materiál jsou dynamické namáhání a vysoký modul pružnosti, aramidová a čedičová výztuž je využívána ve speciálních případech. [6] [8] [11]

2.2 Pojivo (matrice)

Hlavní úlohou pojiva (spojitá fáze) je zajištění mechanické adheze (přilnutí) mezi materiály a zvýšení elektrické vodivosti. [6] [8] [12]

Druhy matrice jsou polyesterové pryskyřice, epoxidové pryskyřice a vinylestery. Polyesterové pryskyřice se používají hlavně ve stavebnictví. Epoxidové pryskyřice jsou využívány při požadavcích na chemickou odolnost a mechanické a elektrické vlastnosti materiálu. Vinylestery jsou jako pojivo výhodné pro aplikace v náročnějším (chemickém) prostředí a pro více namáhaná (mechanicky a tepelně) zařízení. [11] [13]

2.3 Pomocné prvky (přísky) (přísky)

Pro výrobu kompozitu je potřeba použít nějaké pomocné prvky, které se přidávají do pryskyřice pro zlepšení materiálových, požárních nebo stabilizujících vlastností nebo pro zvýšení elektrické vodivosti. Nedoceněným prvkem kompozitu je podpovrchová rouška, která má kromě estetického významu uplatnění pro použití materiálu v chemicky agresivním prostředí nebo v prostředí namáhaném vysokým UV zářením. [11]

2.4 Dělení kompozitních materiálů

První možnost je podle typu disperze (plniva, výztuže) – kompozitní materiály prvního, druhého a třetího druhu. Mezi kompozity prvního druhu patří materiály s pevnou fází výztuže, které je možné dále dělit na tři druhy: s plastovou (PMC), kovovou (MMC) nebo keramickou (CMC) maticí (speciálním případem je skleněná matrice). Kompozity druhého druhu mají kapalnou fázi disperze, nejsou tak časté. Příkladem jsou některé materiály samomazných ložisek – spékáný kov, kde je plnivem olej. Častěji se vyskytují jako přírodní materiály – schránky mořských živočichů nebo dřevo (systém trubic s mízou). Kompozity třetího druhu se vyznačují plynnou fází výztuže – pěnové hmoty (pěnový polystyren, pěno keramika, kovové pěny – hliníková). [14]

Druhá možnost je podle tvaru disperze (plniva, výztuže) – částicové a vláknové. Částicová disperze má rovnoosý tvar a rozměry mají podobnou velikost. Další výhody jsou zlepšený přenos napětí, zlepšení obrobiteľnosti, zvýšení tuhosti a odolnosti vůči teplu. Vlákenná disperze zajišťuje vysokou pevnost a jeden rozměr je výrazně větší než ostatní. [5]

Kompozity lze dělit i podle typu matrice – v praxi existují kompozitní materiály s polymerní, kovovou, keramickou, uhlíkovou a skleněnou maticí, takový způsob dělení je pro účel práce nejspolehlivější. [3]

2.5 Kompozity dle typu matrice

2.5.1 Kompozity s polymerní matricí (PMC)

Dělí se podle geometrické výztuže na vláknové a částicové polymerní kompozity nebo podle druhu pojiva na kompozity s reaktoplastickou matricí a kompozity s termoplastickou matricí. Kompozity s polymerní matricí se vyznačují velkou měrnou pevností a vysokým modulem pružnosti. PMC disponuje nízkou hustotou a díky tomu je jednou z hlavních možností využití v automobilovém a leteckém průmyslu. [3] [6]

2.5.2 Kompozity s kovovou matricí (MMC)

Kompozit s kovovou matricí bude zkoušen v rámci experimentální části bakalářské práce, proto se mu věnuji podrobněji.

MMC jsou materiály, které se skládají z kovové matrice a vložených vláken nebo částic z jiných materiálů, jako jsou keramika, sklo nebo polymery. Kombinují výhody kovů, jako jsou pevnost, tvrdost a vysoká tepelná vodivost, s výhodami vložených vláken nebo částic, jako jsou lehkost, odolnost vůči korozi a tepelná izolace – jsou užitečné pro aplikace jako jsou letadla, automobily, lodě, brzdy, ložiska a nástroje. Výroba kompozitu s kovovou matricí je obvykle prováděna pomocí technologie lití za tepla nebo tlaku. V průběhu procesu se roztavený kov nalije do formy obsahující vložená vlákna nebo částice, a poté se materiál ochladí a ztuhne v požadované formě. Lze je rozdělit na dvě skupiny: kompozity s vláknovou výztuží a kompozity s částicovou výztuží. Nevýhoda kompozitu s kovovou matricí je vysoká cena. [13] [15] [16]

Existuje možnost zvýšení otěruvzdornosti MMC díky přítomnosti sekundárních fází v matrici. Povrch matrice kompozitu je možné chránit proti abrazivnímu opotřebením, díky zpevňujícím částicím. [16] [17]

2.5.2.1 Typy kompozitu s kovovou maticí

Existuje mnoho typů kompozitu s kovovou maticí. Hliníková matrice s vloženými keramickými vlákny – kompozit kombinující vysokou pevnost a nízkou hmotnost hliníku s vysokou teplotní odolností a pevností keramických vláken. Používá se například v leteckém a kosmickém průmyslu, kde se požaduje vysoká pevnost a odolnost vůči korozi a tepelným šokům. Dalším příkladem je titanová matrice s vloženými uhlíkovými vlákny, to je kompozit, který kombinuje vysokou pevnost a odolnost titanu s vysokou tuhostí a pevností uhlíkových vláken. Používá se například v automobilovém průmyslu, kde se požaduje vysoká pevnost a odolnost vůči opotřebení a korozi. Kovová matrice s vloženými skelnými vlákny – kompozit kombinující vysokou pevnost kovu s vysokou tuhostí a odolností vůči korozi skelných vláken. Používá se v konstrukci lodí a plavidel – odolnost vůči slané vodě a korozi. Niklová matrice s vloženými keramickými částicemi kombinuje vysokou pevnost a odolnost niklu s vysokou teplotní odolností a tvrdostí keramických částic. Nalézá využití v průmyslu zabývající se výrobou elektroniky, kde se požaduje vysoká tepelná odolnost a pevnost. [14] [18] [19] [20] [21]

2.5.3 Kompozity s keramickou maticí

Základní požadavky pro kompozitní materiály s keramickou maticí jsou zpevnění, zvýšení houževnatosti, dosažení obrobiteľnosti a zvýšení oteruvzdornosti. Lze je rozdělit podle geometrického tvaru výztuže na částicové, zpevněné vlákny, funkčně gradientní materiály a vrstevnaté kompozity. [22]

2.5.4 Kompozity s uhlíkovou maticí (CFC, C/C)

Kompozit s uhlíkovou maticí je sofistikovaný materiál složený z vrstev uhlíkových vláken, která jsou pečlivě uspořádána tak, aby vytvořila maticí. Využití uhlíkových vláken v těchto kompozitech těží z jejich výjimečných fyzikálních vlastností, včetně vysoké pevnosti a pružnosti, což vede k vynikajícímu konečnému produktu. Uhlík má obecně vlastní vlastnosti, jako je odolnost proti chemické korozi a teplu, takže je vysoce žádoucí pro různé aplikace, jako je letecký průmysl, automobilový průmysl, lékařství a sportovní

zboží, jako jsou golfové hole a tenisové rakety. Výrobní proces zahrnuje impregnaci uhlíkových vláken organickou látkou, následovanou vysokoteplotním tepelným zpracováním k odstranění vody a organických materiálů. Následně je materiál vystaven vysokému tlaku a teplotě, což usnadňuje vytvoření struktury s působivou pevností a tuhostí. Nevýhodou CFC je vysoká cena výroby a složitá oprava, pokud dojde k porušení struktury. [23]

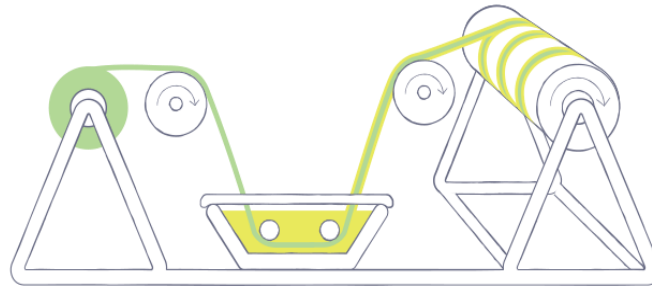
2.6 Výroba kompozitních materiálů

Pro výrobu kompozitních materiálů je možné využít širokou škálu procesů a metod. Při výběru správné metody bude záležet na složení materiálu, konstrukci součásti a použití. [23]

Proces výroby většinou zahrnuje nějakou formu lisování, která zajišťuje vytvarování pryskyřice (matrice) a výztuže (plnivo). Existují tři základní obecné procesy výroby kompozitu – otevřené formování (ruční kladení, stříkání, navíjení vláknové výztuže), uzavřené formování (pultruze, lisování vakuových sáčků, pryskyřičné lisování, zesílené reakční vstřikování, odstředivé lití) a lití polymeru (lisování na pevném povrchu, gelem potažený kámen). Během otevřeného formování se kompozitní materiály umístí do otevřené formy – využití vzduchu, který zajistí vytvrzování nebo tvrdnutí surovin (pryskyřice a vláknová výztuž), proces je většinou levnější díky levnějším nástrojům, proto se používá pro výrobu prototypů a menších sérií. Naopak uzavřené formování probíhá v uzavřené oboustranné formě nebo ve vakuových sáčcích. Takový proces dává smysl, pokud je prioritou použití oboustranné úpravy povrchu nebo jde o velkosériovou výrobu. Lití polymeru se dá zařadit pod otevřené i uzavřené formování, protože se může tato metoda objevit u obou procesů. Podstata spočívá v nalití směsi do formy, kde se nechá vytvrdnout. [11] [24]

Nejzákladnější proces otevřeného formování se nazývá ruční kladení. Princip spočívá v kladení vrstev pryskyřice (většinou polyesterová) a výztuže do formy, kde tvoří vrstvený svazek. Ruční kladení (laminování) se používá například při výrobě ploch a hran poklopů. Další možností otevřeného formování je proces stříkání – technologie, během které je nanášena směs krátkých vláken a pryskyřice (pomocí stříkací aparatury) přímo na povrch nebo formu – výroba

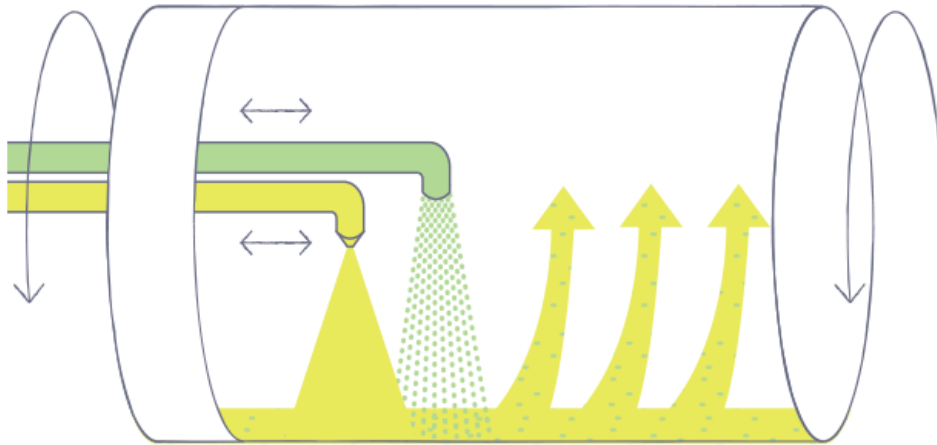
větších dílů nebo oprava povrchu různých materiálů (např. beton a kov). Pro využití automatizovaného procesu během otevřeného formování je možností navíjení vlákna (Obrázek 2). Forma je tvořena rotujícím trnem, na který jsou navíjena vlákna přes lázeň s pryskyřicí a po navinutí dostatečného počtu vrstev je laminát vytvrzen – díl se po tomto procesu z trnu stáhne. [11] [24]



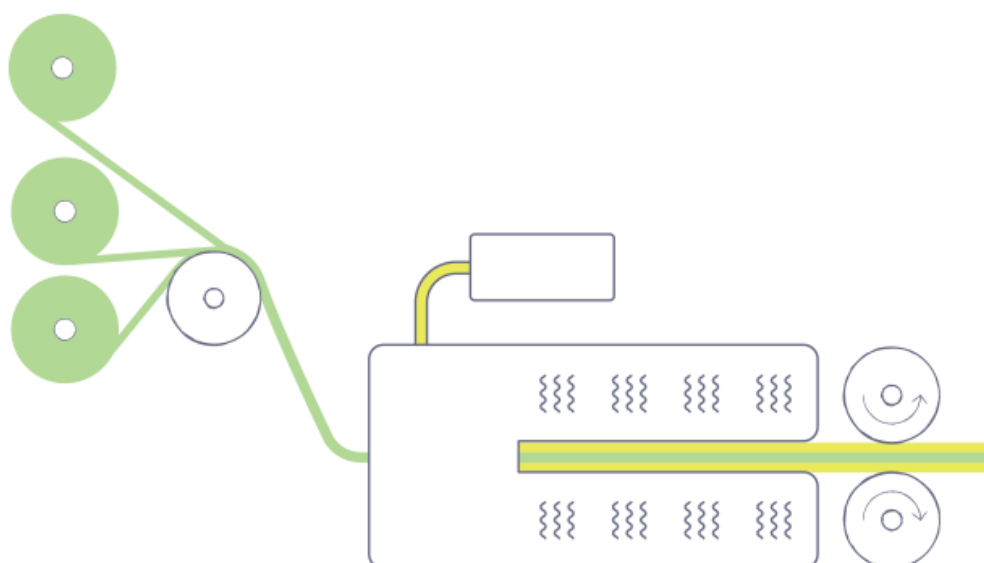
Obrázek 2 Proces navíjení vlákna [24]

Pultruze (tažení) (Obrázek 4) je typ uzavřeného formování – jde o kontinuální proces výroby, kde je vstupním materiálem směs vláknové výztuže a tekuté pryskyřice. Výroba spočívá v tažení směsi přes ohřívanou formu (ocelovou) s využitím tažného zařízení, je možné proces zautomatizovat. Během procesu může být využita povrchová rouška, která zabraňuje tomu, aby vlákna vyčnívala ven, pokud dojde k poškození povrchu. Tažení se využívá při výrobě dlouhých tvarů (trubky, tyče, nosníky atd.). Dalším typem uzavřeného formování je lisování vakuových sáčků – snaha zlepšit mechanické vlastnosti laminátu, spojení více vrstev výztuže pryskyřicí. Vytvořením vakua, které vytlačuje přebytek pryskyřice a zachycený vzduch, dojde k zhutnění laminátu. Metoda pryskyřičného lisování (někdy nazývané tekuté formování) je použita při snaze vytvořit složité díly s hladkým povrchem, při této metodě se do uzavřené formy vkládá výztužný materiál, po opnutí formy se pryskyřice vstříkuje (přes vstřikovací otvory) dovnitř – možnost zautomatizovat. V automobilovém průmyslu se využívá metoda zesíleného reakčního vstřikování – metoda uzavřeného formování během které se dvě oddělené zahřáté pryskyřice spojí s mletou vláknovou výztuží. Směs se poté vstříkne do formy, dojde ke stlačení a rychlému vytvrzení pryskyřice. Pro uskutečnění procesu výroby je zapotřebí použít speciálních výztuží a pryskyřic (vysoké náklady). Další metodou uzavřeného formování je odstředivé lití (Obrázek 3). Jde o využití rotující formy

(odstředivé síly) na jejímž vnitřním povrchu se ukládají výztuže a pryskyřice, směs se drží na povrchu, dokud neztvrdne nebo nevytverdne. Používá se při výrobě dutých dílů a je vhodný hlavně pro výrobu konstrukcí s velkým průměrem – využití v ropném a chemickém průmyslu (potrubí, nádrže). [11] [23] [24]



Obrázek 3 Odstředivé lití [24]



Obrázek 4 Proces pultruze [24]

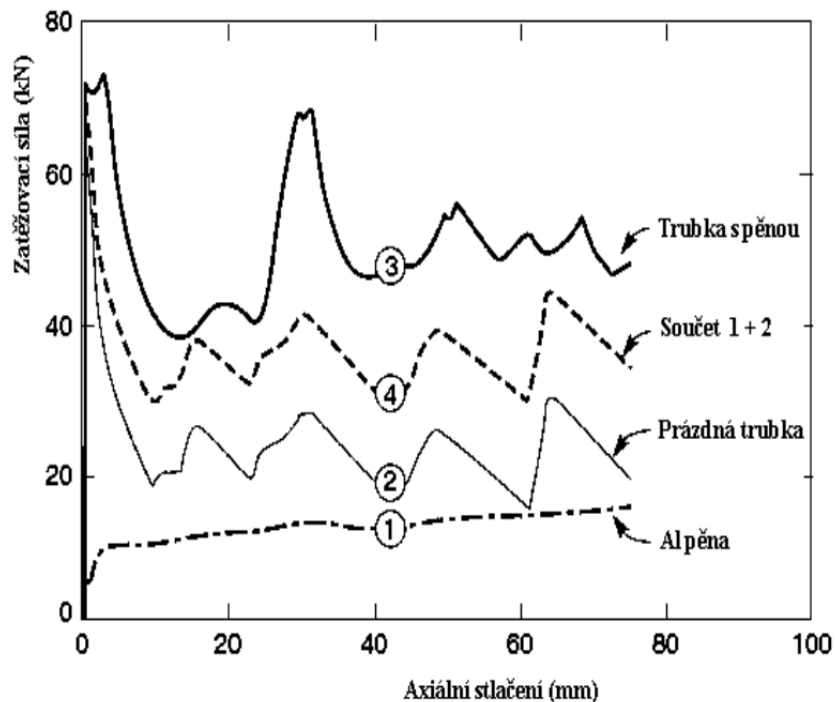
Lití polymerů je velmi specifická metoda ve výrobě kompozitních materiálů, která se dá použít k výrobě jakýchkoliv dílů (jakýkoliv tvar i velikost). Většinou není využita vláknitá výztuž a složení směsi je specifické v závislosti na požadované vlastnosti výsledného výrobku. První metoda se nazývá Gel coat (gelem potažený kultivovaný kámen) (Obrázek 5) – jde o polyesterovou pryskyřici (matrici) smíchanou s přísadami (pomocné prvky zajišťující změnu barvy), která se nanáší na formu, tak aby zajistila kosmetický povrch kompozitu a povrch odolný vůči venkovním vlivům (vítr), pokud jde o venkovní produkty. Rozpouštědlem může být akryl (methylmetakrylát) nebo styrenový monomer. Druhá možnost výroby kompozitu litím polymeru je lisování na pevném povrchu. Rozdíl oproti metodě Gel coat je ten, že jsou pevné části homogenní – možnost opravovat povrch a spojovat více vyrobených kusů za pomoci švů. K výrobě se využívá technika tzv. vakuového míchání, která zajišťuje matrici bez dutin – jednotný povrch. [24]



Obrázek 5 Metoda Gel coat (gelem potažený kultivovaný kámen) [24]

2.7 Synergický efekt

Jde o vhodnou kombinaci materiálů při výrobě kompozitu, díky které získá výrobek výhodné vlastnosti s větším účinkem jako celek než součet jednotlivých složek. Příkladem synergického efektu může být hliníková pěna (Obrázek 6), která je vložena do hliníkové tenkostěnné trubky – odolnější vůči tlakovému namáhání. [14]



Obrázek 6 Synergický účinek – hliníková pěna umístěná do tenkostěnné hliníkové trubky [14]

2.8 Možnosti zvýšení otěruvzdornosti

Existuje několik způsobů, jak zvýšit odolnost kompozitu. Počáteční přístup zahrnuje výběr vhodných materiálů, což je zásadní krok k dosažení potřebné odolnosti proti oděru. Vlákna, která mají vysokou pevnost a tuhost, mohou vydržet značné namáhání, zatímco matrice musí zajistit vlákna na místě a usnadnit přenos zatížení. Další možností je zlepšit vazbu mezi vlákny a pojivem, protože to výrazně ovlivňuje odolnost kompozitu proti opotřebení. Vazba může být zesílena začleněním adhezivních polymerů nebo různých přísad, které zlepšují přenos zatížení mezi vlákny a maticí. A konečně, další možností je zvýšení hustoty kompozitu. Toho lze dosáhnout přidáním více vrstev vláken nebo

zvýšením podílu vláken v kompozitu. Další z často používaných alternativ je použití povlaků, které jsou odolné vůči oděru, jako jsou diamantové vrstvy nebo keramické materiály. Povlaky lze nanášet na povrch kompozitu, čímž účinně posilují jeho schopnost odolávat otěru. Další možností je provedení konstrukčních úprav, jako je začlenění dutých součástí nebo změna tvaru kompozitu. Úpravy slouží k přerozdělení zatížení na konkrétní oblasti kompozitu, což v konečném důsledku zvyšuje jeho odolnost. [25]

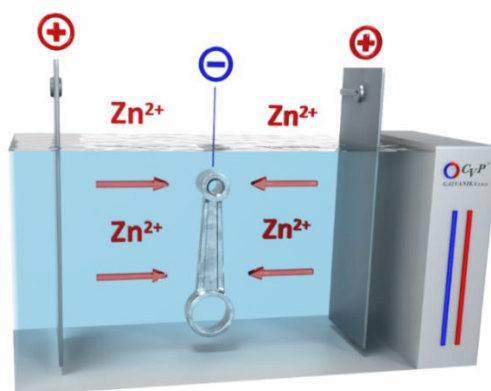
3. Chemické úpravy povrchu

Procesy, během kterých se používají chemické látky ke změně povrchových vlastností materiálů. Vytvořené vrstvy jsou extrémně tenké a úpravy mohou být provedeny na různých materiálech (kovy, keramika, sklo, polymery...). Jde o snahu docílit různých vlastností, jako jsou např. lepší přilnavost, odolnost proti korozi nebo změny barev. [26] [27]

Mezi často používané techniky chemické úpravy povrchu patří:

3.1. Galvanické pokovování

Galvanizace (Obrázek 7) zahrnuje aplikaci kovové vrstvy na povrch materiálu prostřednictvím elektrochemického procesu známého jako elektrolýza. Vytvořená vrstva nabízí zvýšenou odolnost proti korozi a zvyšuje celkovou estetiku materiálu. Chromování, niklování, zlcení, stříbření, měděné pokovování, cínování a zinkování jsou některé z široce používaných galvanizačních technik. [27]



Obrázek 7 Proces galvanického pokovování [74]

3.1.1. Chromování

Proces chromování zahrnuje aplikaci tenké vrstvy kovového chrómu na povrch kovového materiálu. Slouží k ochraně proti korozi a dosažení estetického vzhledu (Obrázek 8). Proces začíná ponořením materiálu do kyseliny chromové, což má za následek vytvoření vrstvy oxidu chromitého na povrchu. Následně je materiál ponořen do roztoku elektrolytu, který obsahuje ionty chrómu. V tomto elektrochemickém nastavení materiál působí jako anoda, zatímco kovový materiál slouží jako katoda. Procesem elektrolýzy se pak na povrch materiálu nanese tenká vrstva kovového chrómu. Chromování nabízí řadu výhod, včetně vylepšení vzhledu materiálu a zajištění vysoké tvrdosti a odolnosti proti opotřebení. Chromování nachází uplatnění v různých průmyslových odvětvích, jako je automobilový průmysl, letectví a zdravotnictví (ochrana chirurgických nástrojů a výroba zubních implantátů). Je však důležité si uvědomit, že chromování má také své nevýhody. Proces zahrnuje použití nebezpečných chemikálií, jako je kyselina chromová, která nejen přispívá ke znečištění, ale může také představovat zdravotní rizika. [28] [29]



Obrázek 8 Ukázky chromování [28]

3.1.2. Niklování

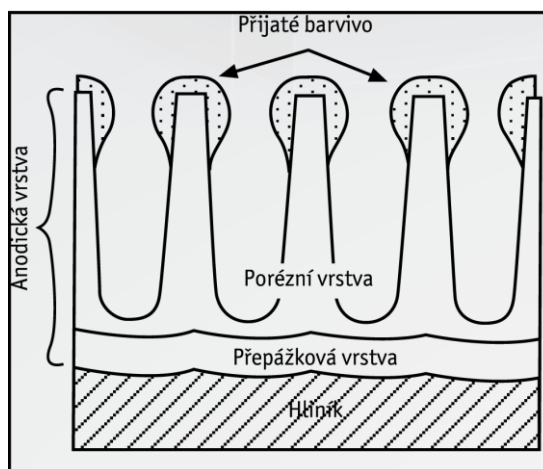
Chemický proces, při kterém se na povrch materiálu nanáší tenká vrstva niklu. Používá se k ochraně kovů proti korozi a k dosažení vylepšeného vzhledu (Obrázek 9). Při niklování se materiál vloží do elektrolytu obsahujícího niklové soli. Materiál se použije jako katoda a anodou je kovový nikl. Elektrolýzou se na povrch materiálu aplikuje tenká vrstva niklu. Niklování dává materiálu vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení. Používá se v automobilovém průmyslu, elektrotechnice, stavebnictví a dalších průmyslových odvětvích. Nevýhodou niklování je fakt, že nikl může být alergenní a může způsobovat kožní problémy. Při procesu se také používají nebezpečné chemikálie. [30] [31] [32]



Obrázek 9 Příklad využití niklování v praxi [75]

3.2. Anodická oxidace

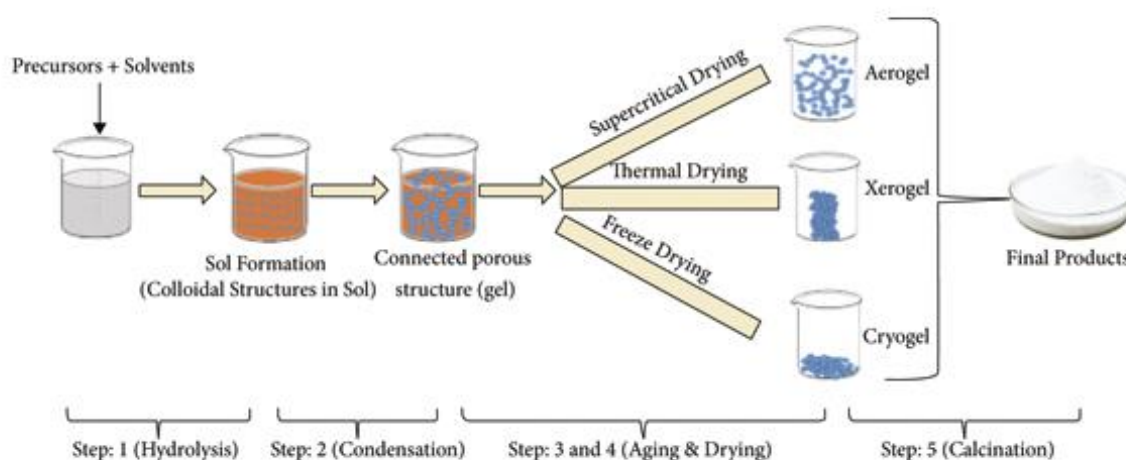
Elektrochemický proces, který převádí povrch kovu (kovové slitiny) na oxidovou vrstvu, která je odolná proti korozi (Obrázek 10). Princip procesu zahrnuje umístění kovu do elektrolytického roztoku a poté průchod stejnosměrného proudu skrz něj. Ionty kyslíku se spojí s kovovými ionty na povrchu a vytvoří vrstvu oxidu. [33]



Obrázek 10 Proces anodické oxidace [33]

3.3. Sol-gelové vrstvy

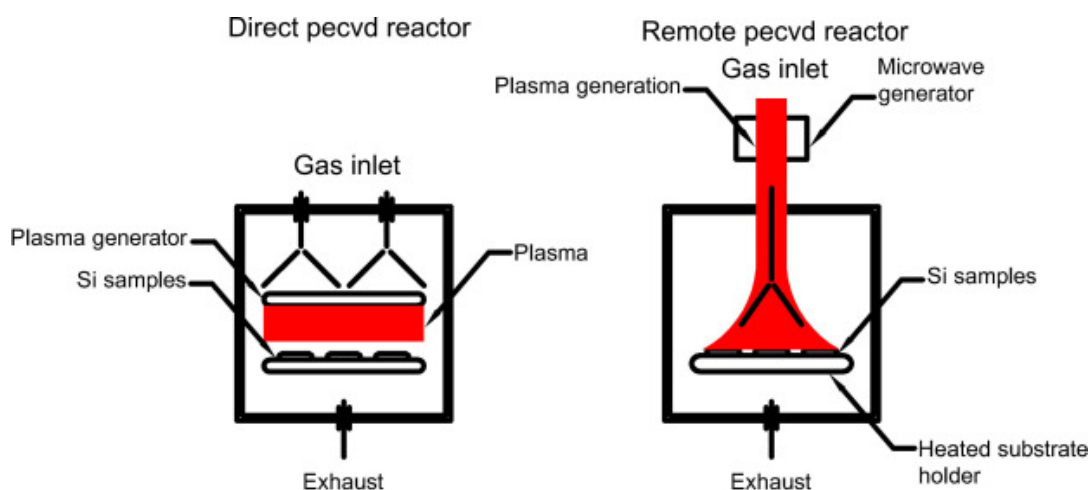
Vrstvy jsou vytvářeny aplikací sol-gelových sloučenin na povrch materiálu (Obrázek 11). Poskytují odolnost proti korozi a snižují přilnavost povrchu. Jedná se o chemickou metodu používanou pro syntézu nanostruktur (zejména nanočástic kovových oxidů) – prekurzor (většinou alkoxyd kovu) se rozpustí v alkoholu nebo vodě a zahříváním a mícháním se přemění na gel, který se vysuší. Sušené gely se poté dají využít v průmyslu – povrchové úpravy, izolace, speciální oděvy... [34]



Obrázek 11 Metoda Sol-Gel [34]

3.4. PECVD

Jedná se o techniku, při které se na povrch materiálu nanášou tenké vrstvy pomocí chemických reakcí v plazmatu (Obrázek 12). Vrstvy mohou zlepšit odolnost vůči korozi a přilnavost povrchu. Při PECVD (Plasma-enhanced chemical vapor deposition) se směs plynů zavádí do vakuové komory a plazma se vytváří za působení elektrického pole a směsi plynů. Plazma se skládá z molekul ionizovaného plynu, které reagují s materiálem za vzniku tenkého filmu. Mezi výhody patří schopnost ukládat jednotné vrstvy na různé materiály a geometrie. PECVD lze také použít k nanášení vrstev s přesnou kontrolou tloušťky a složení. Jde o relativně levnou a energeticky nenáročnou techniku nanášení. [35]



Obrázek 12 PECVD [35]

4. Otěruvzdorné povlaky

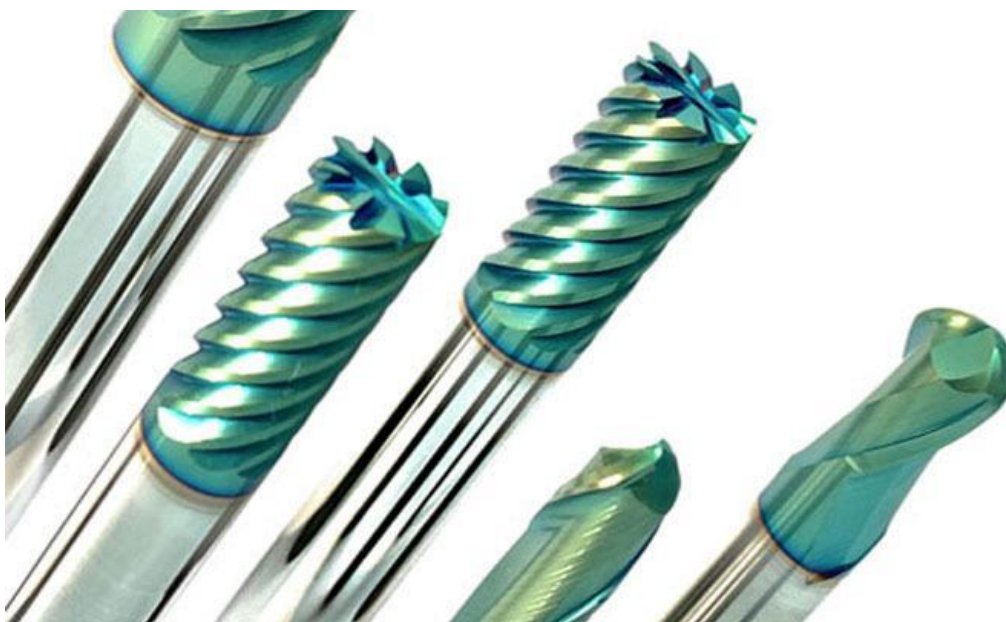
Jedna z možností, jak zvýšit odolnost kompozitu proti otěru a opotřebení – aplikují se na povrch kompozitu a zvyšují jeho odolnost proti poškození. Samotné povlaky přicházejí v široké škále možností, včetně uhlíkových nanotrubic, diamantových vrstev, keramických materiálů a různých polymerů. Materiály lze aplikovat pomocí různých technik, jako je odpařování, plazmové naprašování nebo chemické odlévání. Při nanášení povlaků odolných proti opotřebení na kompozitní materiály je zásadní vytvořit silnou vazbu mezi povlakem a povrchem kompozitu. Toho lze dosáhnout pomocí procesů, jako je tepelné zpracování nebo použití adhezivních vrstev. Otěruvzdorné povlaky jsou velmi užitečné pro zvýšení životnosti a výkonu různých zařízení a součástek. Mohou také zvýšit odolnost kompozitu v mnoha aplikacích, jako jsou automobilové díly, letadlové součástky, sportovní vybavení nebo ochranné obleky. Nástroje s povlakem odolným proti opotřebení zvyšují životnost nástroje a odolnost proti opotřebení – snižují náklady na údržbu a výměnu. [36] [37]

4.1 Metoda PVD

PVD povlaky jsou otěruvzdorné povlaky, které jsou nanášeny pomocí procesu známého jako PVD neboli Physical Vapor Deposition. Používá se k nanášení tenkých vrstev materiálů na různé materiály (kovy, plasty, sklo, keramika). PVD povlaky jsou velmi oblíbené v průmyslových odvětvích (Obrázek 13), jako je

výroba nástrojů, automobilový průmysl, letectví a další. Mezi nejběžnější typy PVD povlaků patří: nitridy kovů (např. TiN – titannitrid, TiCN – titankarbid-nitrid a CrN – chromnitrid), oxidy kovů (např. Al₂O₃ – oxid hlinitý) a karbidy kovů (např. TiC – titankarbid a WC – wolframkarbid). [38] [39] [40] [41]

Mezi výhody PVD povlakování patří: odolnost proti opotřebení – užitečné pro aplikace, jako jsou nástroje, výroba strojů, řezání a broušení, vysoká tvrdost – odolné proti poškrábání, opotřebení a abrazi, vysoká odolnost proti korozi – používají se pro součástky automobilů a pro nástroje. Dále estetická hodnota – možnost vytvářet povrchy s různými estetickými efekty (vhodné pro dekorativní aplikace a výrobu šperků), přesnost – možnost aplikovat velmi tenké vrstvy s vysokou přesností (užitečné pro polovodiče a výrobu optických zařízení), ekologičnost – šetrné k životnímu prostředí, nevytváří toxické látky a je možné recyklovat materiál využitý při procesu. Tyto výhody dělají z PVD povlakování populární technologii v mnoha průmyslových odvětvích, které vyžadují povrchy s vysokou odolností a estetickým vzhledem. [38] [40]



Obrázek 13 Využití PVD povlakování na nástroje [40]

4.2 Metoda CVD

CVD povlakování (Chemical Vapor Deposition) je proces používaný k nanášení tenkých vrstev na povrch materiálů. Proces se skládá z několika kroků, ve kterých jsou chemikálie přiváděny do reaktoru, kde se chemicky rozkládají na vrstvy materiálu. Plynné prekurzory, obvykle organické nebo anorganické sloučeniny, se zahřívají na vysoké teploty (odpařování) a zavádějí se do reaktoru, kde se aktivují a reagují na povrchu materiálu za vzniku vrstvy materiálu. CVD povlaky se používají v mnoha průmyslových odvětvích – výroba polovodičů, vláknové optiky, potažených oken a skla, také v průmyslu povlaků a forem. Díky vysoké přesnosti a kontrole procesu umožňuje vytvářet vrstvy s velmi přesnými fyzikálními vlastnostmi – tloušťka, adheze, tvrdost a chemická stabilita. Mezi výhody CVD povlakování patří: vysoká kvalita a čistota povlaků – jsou vytvářeny z plynných prekurzorů, což umožňuje vytvořit homogenní a vysoce kvalitní vrstvy s minimálním množstvím nečistot, jemnost a přesnost – povlaky mohou být velmi tenké (v řádu nanometrů) a lze je aplikovat velmi přesně na povrch, vysoká adheze a pevnost – povlaky se spojují s podložím na velmi přesné a pevné úrovni a vytvářejí stabilní spojení s podkladem, vysoká homogenita a rovnoměrnost povlaku – rovnoměrně pokrývají celý povrch, široká škála materiálů – CVD povlakování může být použito pro aplikaci kovů, oxidů, karbidů a nitridů, vysoká produktivita – může být prováděno na velkém množství materiálů najednou, tím pádem je možné snížit náklady na výrobu. [41] [42]

4.3 Metoda DLC

DLC (Diamond-Like Carbon) povlaky jsou vrstvy, které se aplikují na povrchy různých materiálů, jako jsou kovy, keramika, plast za účelem zlepšení jejich vlastností (Obrázek 14). Mezi výhody DLC povlaků patří: zvýšená tvrdost – možnost prodloužení životnosti materiálů, odolnost vůči korozivním látkám a atmosférickému kyslíku – ochrana materiálu proti oxidaci, snížení tření – snížení opotřebení a zlepšení výkonu v aplikacích, jako jsou ložiska, čerpadla, ventily a další, zlepšení tepelné stability, estetický vzhled (použití v dekorativních aplikacích), zlepšená biokompatibilita – využití v medicínských aplikacích (při použití vhodných materiálů), vysoká odolnost vůči chemickému a mechanickému

poškození – výhodné pro aplikace, kde je materiál vystaven náročným podmínkám. DLC povlaky se vyrábějí pomocí plazmového odlučování, který umožňuje aplikovat vrstvu uhlíkových iontů na povrch materiálu, které jsou poté ukládány v podobě tenké vrstvy (nanometry). DLC povlakování je využíváno v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu, medicíně a výrobě nástrojů. Mohou být také využity pro ochranu povrchů proti opotřebení a korozi, zlepšení výkonu a prodloužení životnosti materiálů. [43] [44] [45]



Obrázek 14 Ukázka povlakovaných předmětů ve firmě VÚHŽ [43]

4.4 Další technické povlaky a nástřiky

4.4.1 Polyuretanové nástřiky

Nátěrový materiál aplikovaný na povrch pro zajištění ochrany a estetického vzhledu (Obrázek 15). Při výrobě těchto produktů se používají polyuretanové pryskyřice v kombinaci s přísadami. Integrace aditiv umožňuje přizpůsobení charakteristik spreje tak, aby vyhovovaly konkrétním aplikacím. Spreje si získaly oblibu díky své schopnosti vytvořit tenkou, ale odolnou vrstvu, která se může pochlubit působivými mechanickými vlastnostmi, jako je odolnost proti oděru. Díky všestranným vlastnostem jsou vhodné pro použití jako ochranné nátěry na různé povrchy, včetně kovových konstrukcí, betonových konstrukcí, dřeva a dalších materiálů. Polyuretanové nástřiky jsou navíc vysoce ceněny pro své izolační schopnosti, zejména pokud jde o tepelnou izolaci. Mají výjimečné tepelně izolační vlastnosti, které mohou pomoci snížit náklady na vytápění a chlazení budov. Kromě toho vykazují odolnost vůči vodě, takže jsou ideální pro použití jako vodotěsná vrstva, např. na střeších. Aplikace sprejů zahrnuje

použití specializovaného zařízení, které účinně rozprašuje roztok na požadovaný povrch. Proces aplikace umožňuje rychlé a efektivní pokrytí velkých ploch. Po nanesení sprej rychle tuhne a vytváří pevnou vrstvu, která poskytuje ochranu i izolaci. [46] [47]



Obrázek 15 Polyuretanový nástřík MetaLine čerpadla TSURUMI [46]

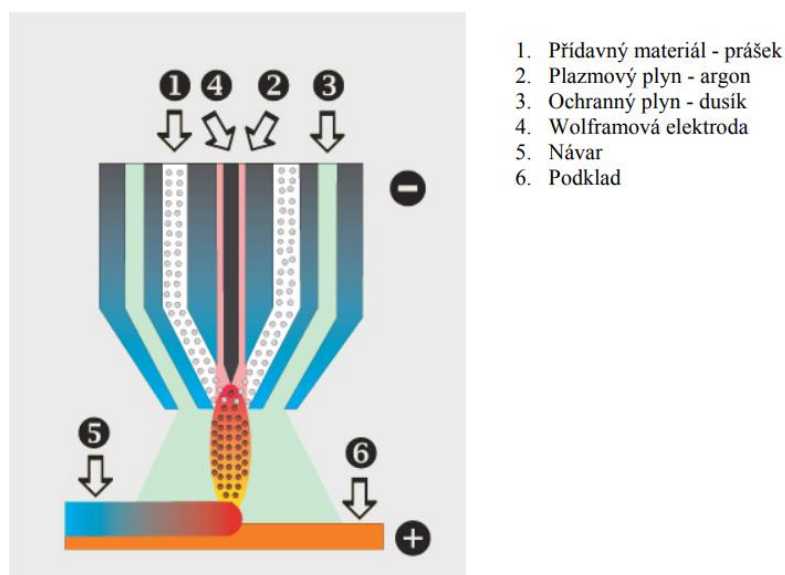
4.4.2 Keramické povlaky

Keramické povlaky se používají na různé povrchy se záměrem zvýšit jejich trvanlivost, ochranu a potenciálně i jejich estetickou přitažlivost. Proces zahrnuje nanesení povlaku na povrch materiálu s následným vypálením ve vysokoteplotní peci, aby se vytvořila pevná vrstva. Používají se k ochraně a vylepšení vlastností různých povrchů, včetně kovů, skla a keramiky. Vyznačují se mimořádnou odolností vůči korozi, chemikáliím, vodě a oděru. Navíc mají vysokou tepelnou odolnost, díky čemuž jsou vhodné pro izolační účely. Aplikace se provádí pomocí specializovaného zařízení, které je obvykle složitější než jiné metody povlakování. Po aplikaci a vytvrzení však keramické povlaky poskytují vynikající ochranu a vizuálně příjemnou estetiku. [48]

4.5 Povlaky nanesené svařovacími technologiemi

4.5.1 Plazmové navařování

Moderní technika nanášení povlaků. Metoda funguje tak, že se generuje plazma, která rozpouští pevný materiál, který se poté aplikuje na povrch, kde se ochladí a vytvoří povlak (Obrázek 16). Plazmové navařování se používá k výrobě povlaků, které vykazují výjimečnou životnost a odolnost proti opotřebení, korozi a různým vnějším faktorům. Jeho primární účel spočívá v ochraně kovových povrchů proti korozi a zároveň slouží k vytvoření izolačních vrstev na elektronických součástkách, které vyžadují ochranu před elektromagnetickými vlivy. Nejčastěji používanými materiály v tomto procesu jsou kov, keramika a plast, které jsou před zavedením do plazmy pečlivě rozemlety na jemný prášek. Zde se rozpustí a následně se nanášejí na požadovaný povrch. Plazmové naprašování je nesmírně všestranná technologie s rozšířenými aplikacemi v mnoha průmyslových odvětvích, včetně strojírenství, elektroniky, letectví a výroby automobilů. [1] [49] [50]

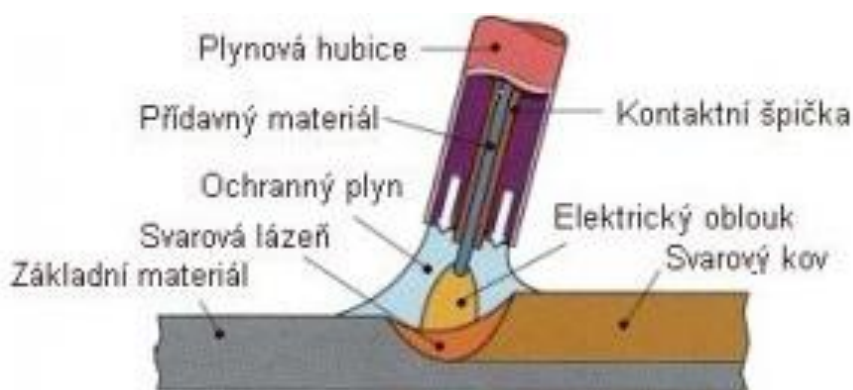


Obrázek 16 Plazmové navařování [51]

4.5.2 Svařování v ochranném plynu (MIG/MAG)

Technologie svařování, při které se využívá ochranný plyn k ochraně svaru před atmosférickými vlivy, jako jsou kyslík a vlhkost (Obrázek 17). Aby se zajistila integrita materiálu během procesu svařování, používá se ochranný plyn k

vytvoření ochranné atmosféry, čímž se zabrání oxidaci nebo jakékoli jiné formě poškození, ke kterému může dojít při zvýšených teplotách. Ochranné plyny lze rozdělit do dvou kategorií: inertní plyny, jako je argon nebo helium a jejich různé kombinace, a aktivní plyny, včetně čistého oxidu uhličitého nebo směsí argonu s oxidem uhličitým nebo kyslíkem. Techniky MIG/MAG se používají ke spojování kovů, jako je nerezová ocel, hliník, měď a titan, které se běžně používají v průmyslových odvětvích, kde je nepostradatelné přesné a vysoce kvalitní svařování, jako je automobilový, letecký, námořní a potravinářský průmysl. K efektivnímu provádění svařování v ochranném plynu je zapotřebí specializovaného vybavení, jako jsou svařovací stroje a ochranné plyny, stejně tak i odborné znalosti a zkušenosti v oboru. [1] [52] [53] [54]



Obrázek 17 Metoda svařování MIG/MAG [54]

4.5.3 Elektrostatické nástřiky

Proces využití elektrostatického pole k aplikaci nátěrové hmoty na povrch je známý jako elektrostatické stříkání. Běžně se používá v průmyslové výrobě k potahování rozsáhlých oblastí, jako jsou kovové konstrukce, plastové součásti nebo velké plechy. Základní princip metody spočívá v aplikaci elektrostaticky nabitě nátěrové hmoty na kovový povrch, který má opačný náboj. Přitažlivost mezi náboji umožňuje vytvoření tenké, účinné vrstvy barvy s minimálním odpadem. Různé nástroje, jako jsou elektrostatické pistole, válečky a kotouče, lze použít k aplikaci různých typů povlaků, včetně laků, barviv a kovových povlaků. Elektrostatické stříkání se používá převážně v průmyslové výrobě, zejména v odvětvích, jako je automobilový, letecký a námořní průmysl, kde je zásadní vysoký standard kvality a jednotnosti nátěru. [55] [56]

5. Materiál a metody použité v experimentální části

5.1. Hadfieldova ocel (austenitická manganová ocel)

Austenitické manganové oceli jsou legované oceli obsahující především mangan a nikl, což jim poskytuje některé výjimečné vlastnosti. Mezi vlastnosti austenitických manganových ocelí patří: vysoká odolnost vůči korozi – mangan a nikl obsažené v oceli zlepšují její odolnost, vysoká pevnost – využití v různých aplikacích (lodě, mosty, petrochemické zařízení), dobrá svařitelnost – možnost snadné opravy a úpravy, dobrá tvářitelnost – výroba složitých tvarů a konstrukcí, nízká magnetická permeabilita – možnost použití v aplikacích, kde je důležité minimalizovat magnetické záření. Vzhledem k těmto vlastnostem jsou austenitické manganové oceli často používány v náročných průmyslových aplikacích, jako jsou například petrochemický průmysl, energetika a chemický průmysl. [57] [58] [59]

Složení austenitických manganových ocelí může být různé v závislosti na konkrétním typu oceli a požadovaných vlastnostech. Obecně se však austenitické manganové oceli skládají z těchto prvků: mangan: 12-14 %, uhlík 1,1-1,3 %, nikl, chrom, molybden a kovové příměsi: železo, křemík, fosfor, síra, dusík. Nejčastěji používaná korozivzdorná ocel je AISI 316, která obsahuje 16-18 % chromu, 10-14 % niklu, 2-3 % molybdenu, 0,08 % uhlíku a 2-3 % manganu, takové složení poskytuje oceli vysokou odolnost vůči korozi a vysokou pevnost při vysokých teplotách. Další typy korozivzdorných ocelí jsou např. typ 304 (výroba nádob na potraviny) nebo typ 321 (výroba výfukových systémů automobilů a letadel), které mají Cr a Ni jako hlavní legující přísady. [57] [58] [59]

5.2. Karbid boru (B_4C)

Je to tvrdá černá krystalická látka (Obrázek 18), která patří mezi nejtvrďší materiály na světě. Má tvrdost podle Mohse zhruba 9,3 a vysoký bod tání (kolem $2700\text{ }^\circ\text{C}$), což jej činí vhodným pro vysokoteplotní aplikace. B_4C je také dobrý elektrický vodič a má nízký koeficient tepelné roztažnosti. Díky své odolnosti vůči chemickému napadení se často používá jako ochrana proti abrazivnímu opotřebení, například v pancéřování a v obranných aplikacích. [60] [61]



Obrázek 18 Karbid boru [62]

5.3. PTA – plazmově přenesený oblouk

Inovativní metoda, která umožňuje nanášení ochranných povlaků na kovové povrchy, se nazývá PTA neboli plazmový přenos oblouku. PTA využívá elektrický oblouk, který vzniká mezi kovovou anodou a katodou, přičemž elektroda se skládá z materiálu, který má být nanášen. Při vytvoření elektrického oblouku se materiál elektrody roztaví a splyne s plazmou, která vystupuje mezi elektrodou a kovovým povrchem. Když se plazmový materiál dostane do kontaktu s kovovým povrchem, přilne a vytvoří vrstvu. S technikou PTA je možné nanášet vrstvy různých materiálů, jako jsou tvrdé slitiny a keramika. V případě pulzní plazmové depozice pomocí B_4C pulzní plazma disperguje B_4C , který pak putuje k substrátu, sráží se s ním a vytváří tenkou vrstvu. Vrstva vyrobená touto metodou má výjimečnou odolnost proti opotřebení, korozi a dalším vnějším silám díky vysoké tvrdosti a pevnosti B_4C . [63] [64]

5.4. Nanášení tvrdých návarů (Hardfacing)

Proces, kterým se zvyšuje odolnost a pevnost povrchu kovových dílů, jako jsou válce, ozubená kola a podobně, obvykle se provádí aplikací tvrdého materiálu na povrch pomocí techniky známé jako hardfacing – snaha o zvýšení odolnosti povrchu proti opotřebení, korozi a jiným vnějším vlivům. K nanášení materiálu lze použít mnoho způsobů, včetně svařování, plazmového nástřiku a plazmového nanášení. Používá materiály s vysokou úrovní tvrdosti, jako jsou karbidy, železo, nikl a slitiny kobaltu. Materiály vykazují mimořádnou odolnost proti opotřebení, korozi a dalším vnějším vlivům, čímž umožňují prodloužení životnosti kovových součástí. Povrchové kalení slouží k prodloužení životnosti kovových dílů a zároveň snižuje náklady na údržbu a výrobu. Aplikace tohoto procesu pokrývají různá průmyslová odvětví, včetně zemědělství, stavebnictví, petrochemie, obrany a mnoha dalších. [65] [66]

5.5. Abrazivní opotřebení

Proces degradace nebo poškození materiálu mechanickým třením o abrazivní látku. Abrazie může nastat v důsledku různých faktorů, včetně tlaku a rychlosti, přičemž vyšší hodnoty zvyšují úroveň tření a úběr materiálu. Svou roli v rozsahu otěru hraje také tvrdost brusného materiálu, ale i tření a vlastnosti zpracovávaného materiálu. Samotná brusiva se vyznačují svou tvrdostí a drsností a mohou poškodit jiné materiály, jako je brusný papír, kotouče, kameny, prášky a další. V důsledku abrazivního opotřebení může dojít ke změnám tvaru, rozměrů nebo kvality povrchu dotčeného materiálu. Intenzita oděru může být kategorizována jako mírná, střední nebo vysoce intenzivní. [67] [68] [69]

5.5.1. Zkouška abrazivního opotřebení

Pro hodnocení odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení bylo vyvinuto několik testů, přičemž nejpoužívanější je test Taber Abraser. Test zahrnuje měření počáteční hmotnosti vzorku a jeho umístění na testovací zařízení. Zátěž o hmotnosti 250, 500 nebo 1000 gramů je poté aplikována na horní část rotujícího brusného kotouče po stanovený počet otáček. Během procesu vzorek podstupuje opakované tření, což umožňuje stanovení různých parametrů, jako je úbytek hmotnosti, redukce tloušťky a změny estetického vzhledu. Kolo a zátěž

lze upravit tak, aby vyhovovaly měkčím i tvrdším materiálům, přičemž vzorkem může být buď kotouč o průměru 4 palce, nebo čtvercová deska o velikosti 4 palce. Výsledky testů jsou uvedeny jako procentuální změny v zákalu a ztrátě hmotnosti v miligramech na cyklus. Kromě toho je pro přesné testování vyžadován střed o průměru ½ palce. Pro posouzení srovnatelné trvanlivosti testovaných materiálů se používají etalony (Obrázek 36) – RFe80 nebo C45 – jako referenční hodnoty pro účely srovnání a hodnocení odolnosti materiálů proti opotřebení. Využití může být motivováno různými faktory, včetně kontroly kvality, kalibrace zařízení, standardizace, spolehlivosti a srovnatelnosti. Obecně platí, že začlenění měřítek do abrazivního testování významně přispívá k dosažení přesných, důvěryhodných a srovnatelných zjištění, čímž hraje klíčovou roli při výběru materiálu, hodnocení odolnosti a zlepšení kvality a výkonu produktu. [67] [68] [70]

5.5.2. Konstrukce zařízení s pryžovým kotoučem

Test se provádí pomocí několika základních komponent. Patří mezi ně kotouč, který je připojen k pohonu odpovědnému za jeho otáčení a používá se pro abrazivní zkoušku. Stůl slouží jako platforma, na které je umístěn vzorek. Součástí testu jsou cykly tlačné síly a tření spolu s měřícím zařízením. V mém konkrétním případě se úbytek váhy měří pomocí vah. Při konstrukci zařízení je dodržován specifický standard, který zajišťuje jeho použitelnost na různé materiály, jako jsou kovy, povlaky, keramika a kompozity. Norma nastiňuje základní princip zkoušky a poskytuje jasné pokyny pro nastavení a provádění zkoušky abrazivního opotřebení s použitím brusného kotouče. Vzorek materiálu připravený broušením a povrchovou úpravou má formu desky s definovanými rozměry a povrchovými vlastnostmi. Připevňuje se k držáku vzorku a přichází do přímého kontaktu s pryžovým kolem (Obrázek 39). Používá se speciální brusný kotouč s abrazivním materiálem. Zátěž přenesená pákovým mechanismem působí normálové zatížení mezi kolem a vzorkem (Obrázek 38). Opotřebení je vyvoláno vnikáním písku z pískové trysky, který infiltruje prostor mezi vzorkem a kotoučem, napomáhají mu gravitační síly a rotace pryžového kotouče. Během testovacích cyklů se pečlivě měří úbytek hmotnosti vzorků nebo hloubka opotřebení. Norma zároveň uvádí kritéria pro hodnocení výsledků testu, jako je úbytek hmotnosti nebo hloubka opotřebení. [71] [72]

6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

6.1. Výroba vzorků

Pro účely experimentální části byl zvolen jako kompozitní materiál návar austenitické manganové oceli ve formě prášku na korozivzdornou ocel pomocí plazmového navařovacího automatu (Obrázek 19). Austenitická manganová ocel představuje přídavný materiál a korozivzdorná ocel základní materiál. Bylo připraveno 5 vzorků (Obrázek 26), (Obrázek 27), (Obrázek 28), (Obrázek 29), (Obrázek 30) a během navařování byl sledován průběh teplot pomocí termočlánků a měřicího zařízení (Obrázek 20). Průběhy teplot byly vyneseny do grafu pomocí MS Excel (Obrázek 21), (Obrázek 22), (Obrázek 23), (Obrázek 24), (Obrázek 25). Jednotlivé termočlánky jsou označeny čísly 1-3, přičemž termočlánek 1 byl připevněn na spodní straně základního materiálu, termočlánek 2 ze strany a termočlánek 3 na čele. Je nutné zohlednit širokou škálu vlivů, které průběh teplot mohou narušit – poškozené termočlánky, manuální úprava rychlosti navařování během procesu, výchylka měřicího přístroje, špatné připevnění termočlánků na základní materiál atd. Projevení některého z vlivů je vidět na průběhu teplot vzorku číslo 4 – pravděpodobně došlo k poškození termočlánku během navařování (Obrázek 24).

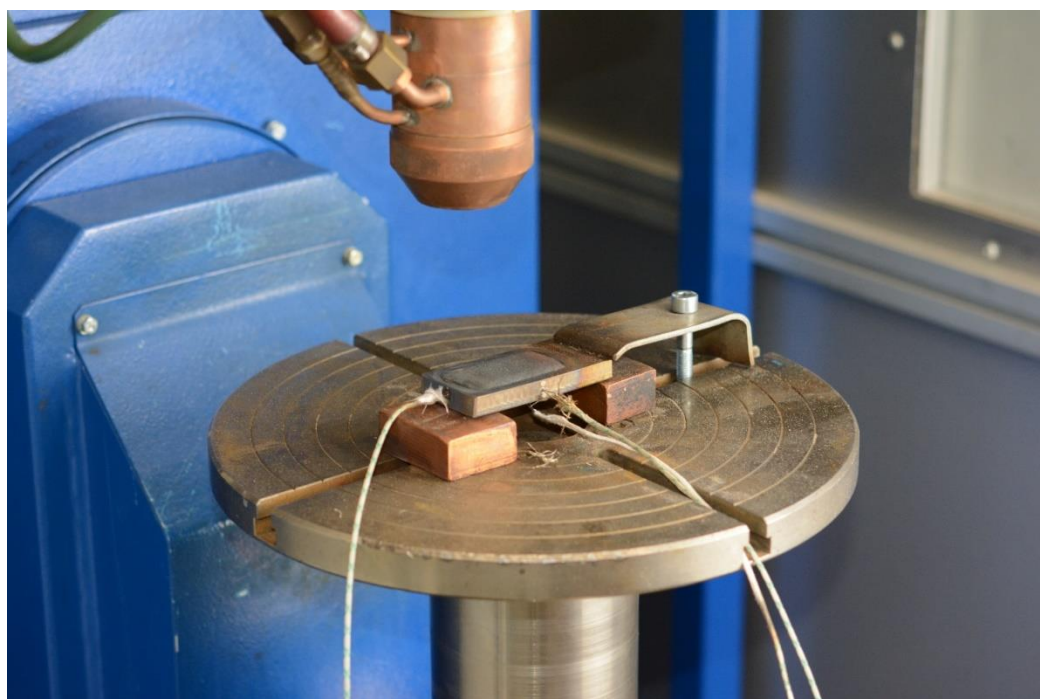
Složení přídavného materiálu vzorku 1 a 2 je stejné – čistá austenitická manganová ocel. Přídavný materiál pro vzorky 3, 4 a 5 je obohacen o 15 % B₄C (karbid boru), který zajišťuje ochranu proti abrazivnímu opotřebení. Parametry navařování byly vyneseny do tabulky (Tabulka 1) a byla naznačena změna prováděná za chodu.

Tabulka 1 Parametry navařování austenitické manganové oceli na korozivzdornou ocel

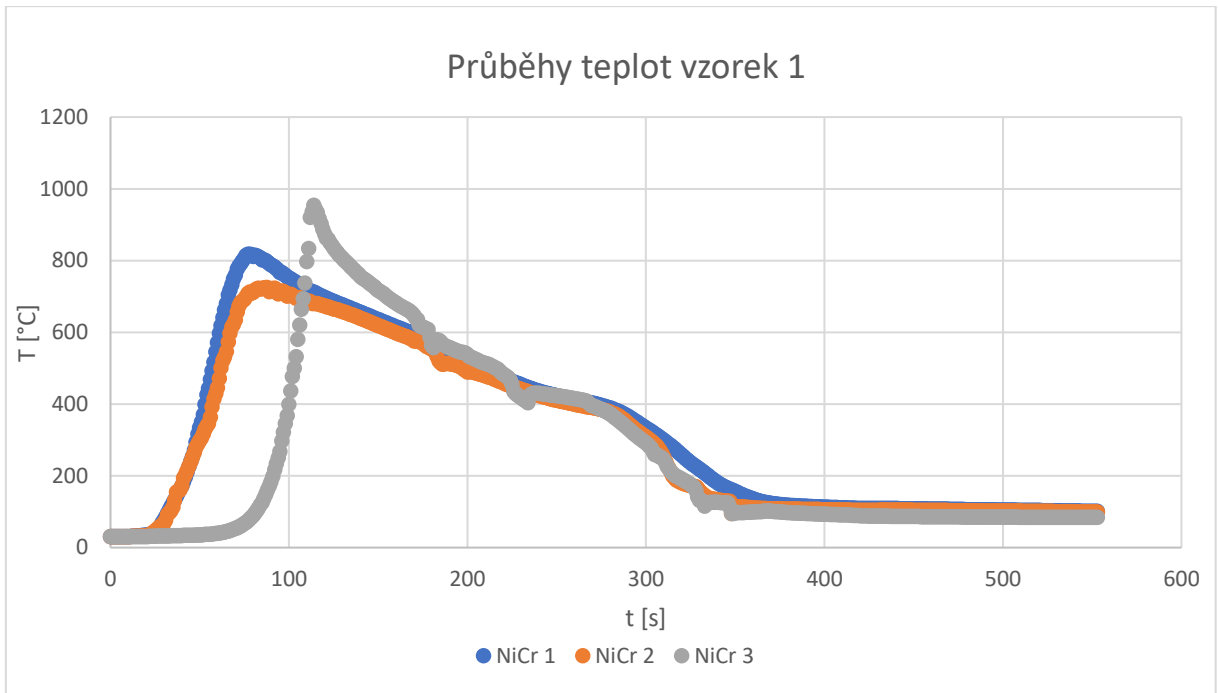
IH [A]	IL [A]	TH [s]	TL [s]	Lineární rychlost [mm/s]	Šířka [mm] / rychlost rozkyvu (pendlu) [mm/s]	Rychlost podávání [g/min]
190→160	90	0,0048	0,03	0,88	22 / 15	14



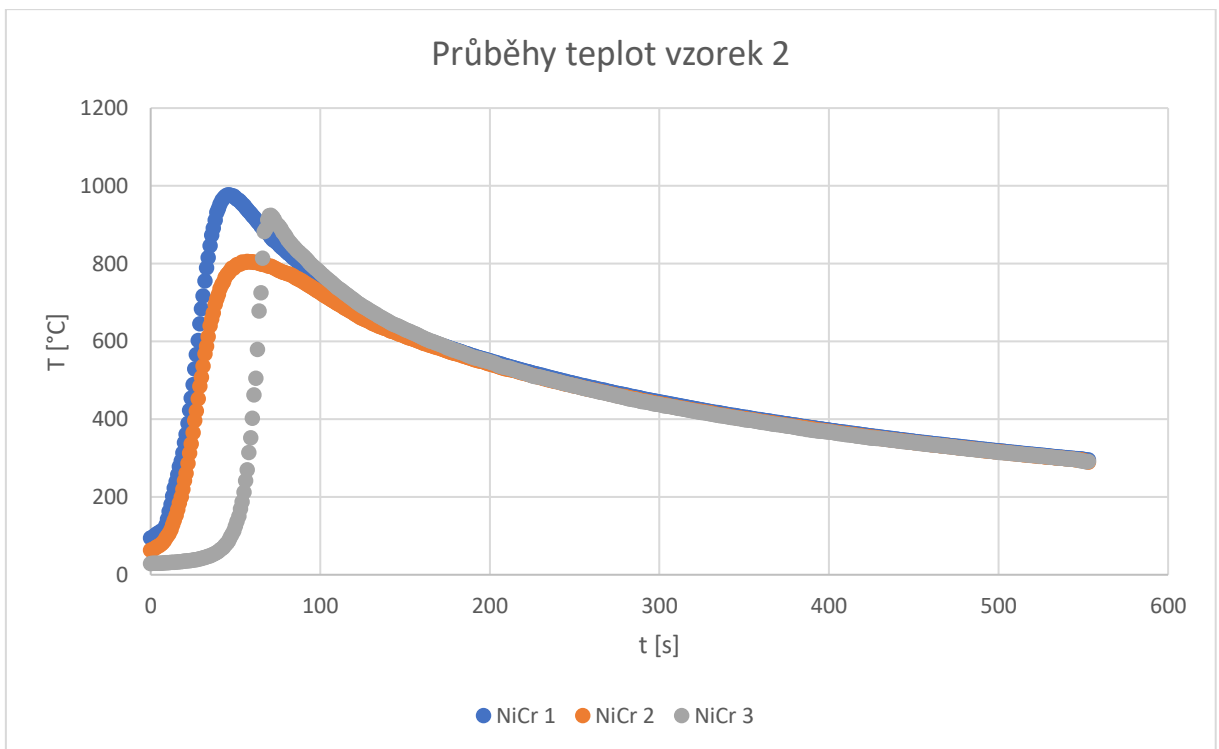
Obrázek 19 Plazmový navařovací automat PPC 250 R 6



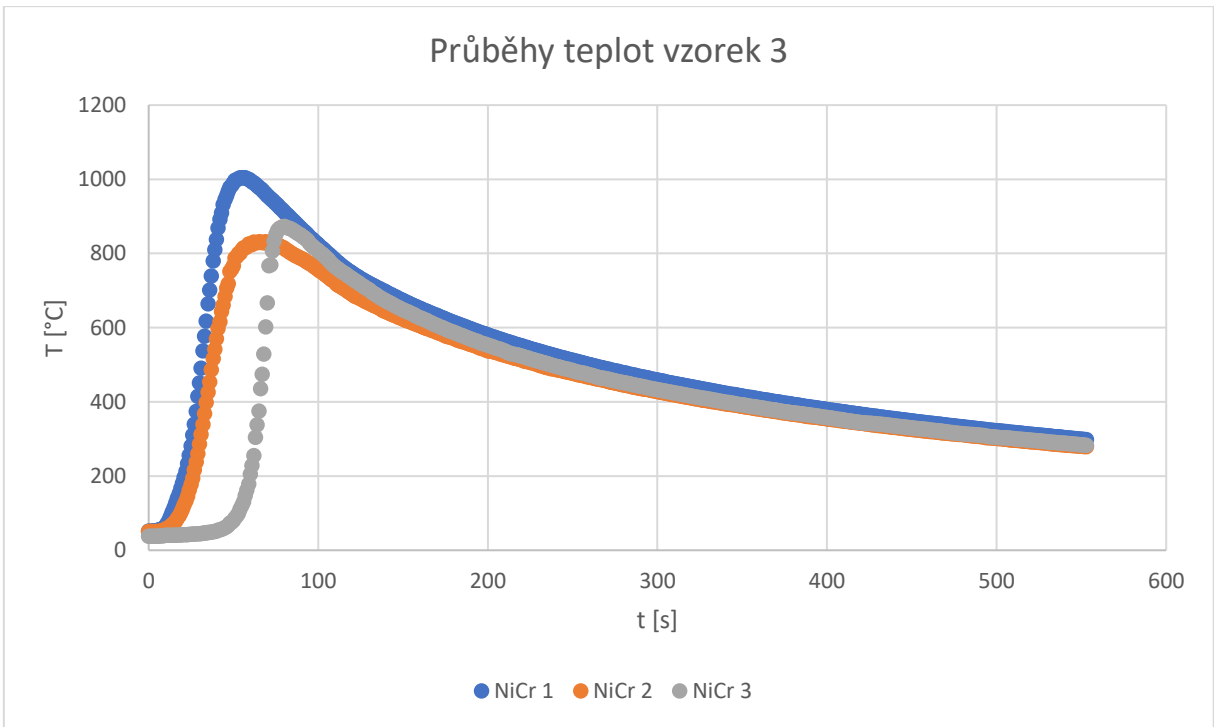
Obrázek 20 Průběh experimentu



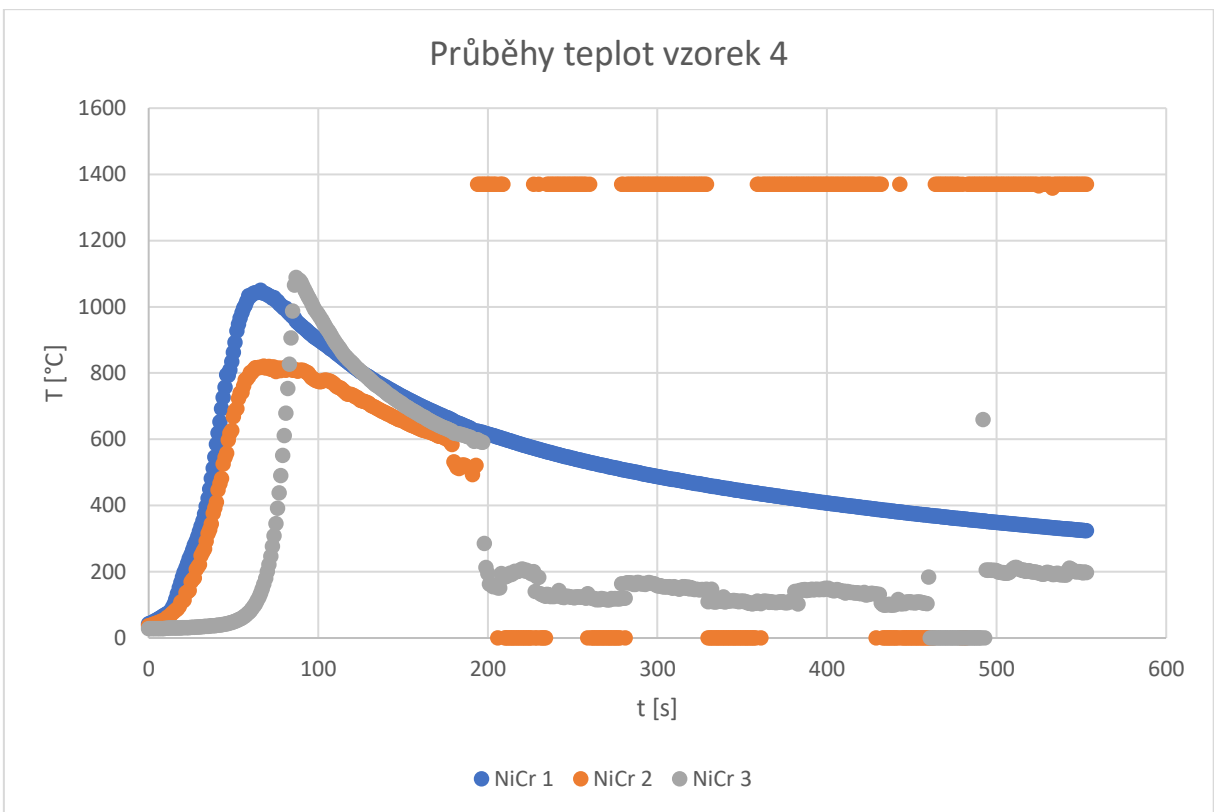
Obrázek 21 Graf průběhu teplot pro vzorek 1



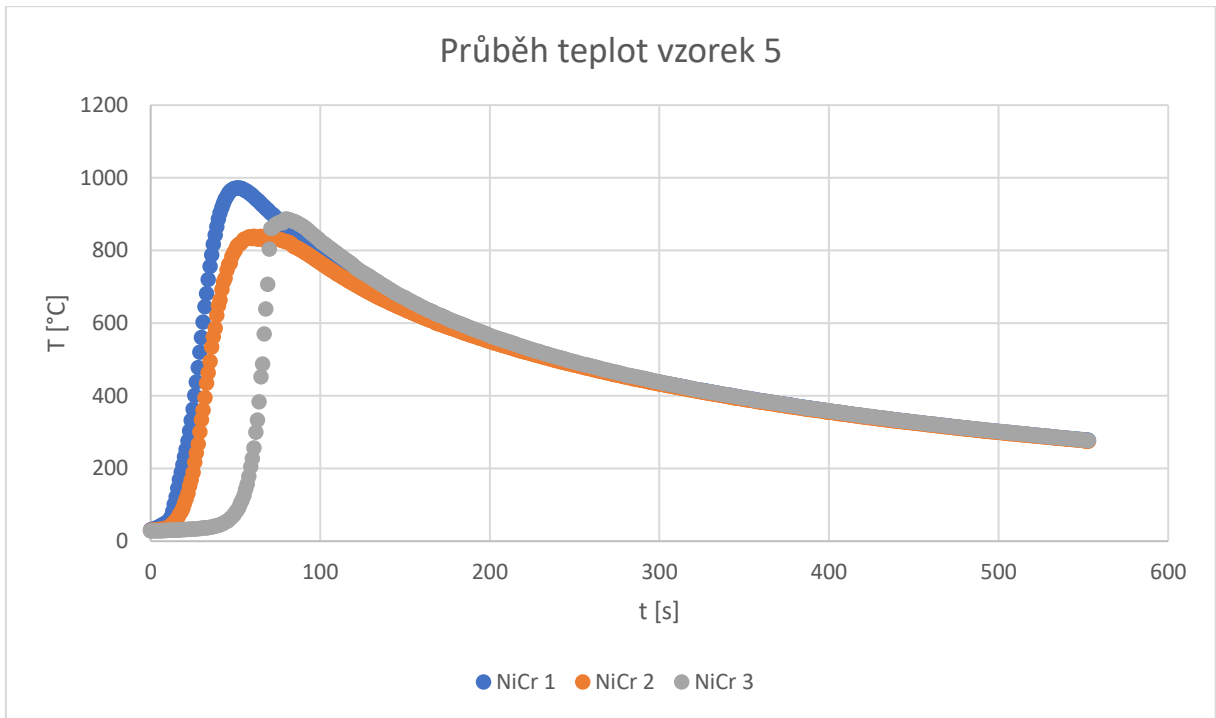
Obrázek 22 Graf průběhu teplot pro vzorek 2



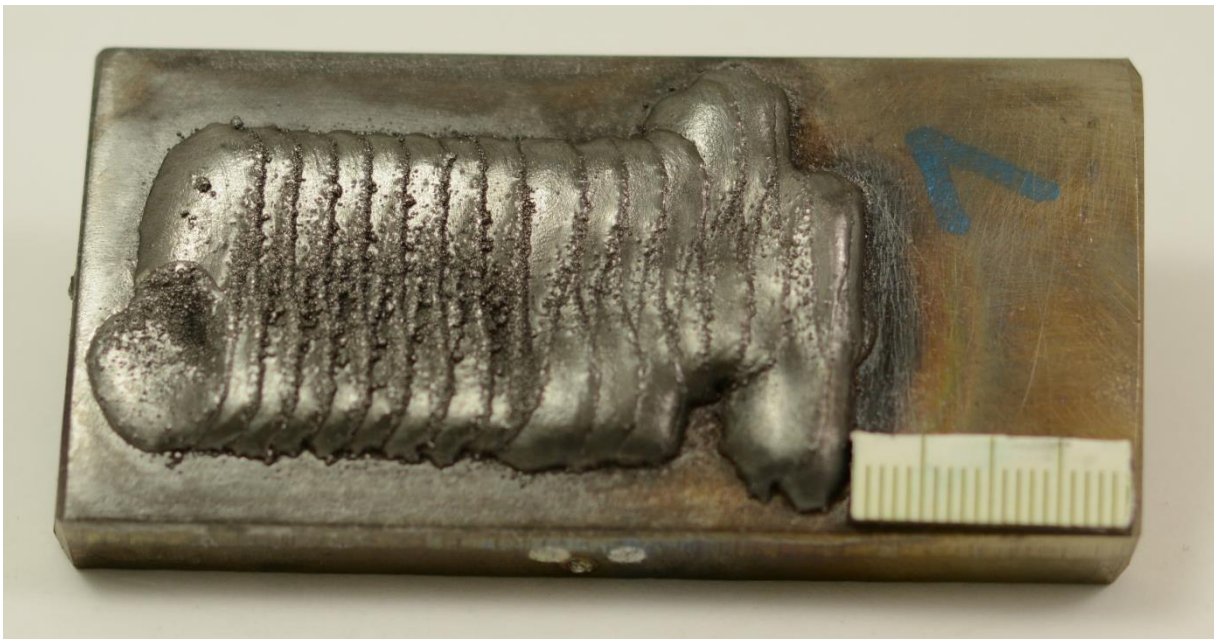
Obrázek 23 Graf průběhu teplot pro vzorek 3



Obrázek 24 Graf průběhu teplot pro vzorek 4



Obrázek 25 Graf průběhu teplot pro vzorek 5



Obrázek 26 Vzorek číslo 1



Obrázek 27 Vzorek číslo 2



Obrázek 28 Vzorek číslo 3



Obrázek 29 Vzorek číslo 4



Obrázek 30 Vzorek číslo 5

6.2. Abrazivní zkouška zařízením s pryžovým kotoučem

6.2.1. Příprava vzorků a konstrukce přístroje

Přístroj se skládá z kovového rámu (svařené tenkostěnné ocelové profily), tří klínových řemenů (přenos výkonu), držáku na vzorky, pákového mechanismu (přes rameno je realizováno zatížení), ochranného krytu (prašnost zkoušky), násypky ve tvaru trychtýře (objem 800 ml a písková tryska o průměru 5 mm), sběrné nádoby pro abrazivo a elektro skříně (Obrázek 37), (Obrázek 38), (Obrázek 39). Před začátkem samotné zkoušky bylo nutné vzorky obrousit a zkrátit na rozměr <37 mm (Obrázek 31), (Obrázek 32), (Obrázek 33), (Obrázek 34), (Obrázek 35), což je šířka držáku, upínání a vycentrování vzorků bylo zajištěno pomocí čtyř šroubů umístěných po stranách držáku. Parametry zařízení byly stanoveny na základě normy ASTM G65 a konzultaci s Ing. Tomášem Panáčkem:

- Rozměry stroje: 700 x 600 x 1200 mm
- Výkon motoru: 1,1 kW
- Otáčky motoru: 950 ot/min
- Přítlačná síla na vzorek: 130 N
- Průměr pryžového kotouče: 240 mm
- Šířka pryžového kotouče: 22 mm



Obrázek 31 Obroušený vzorek 1



Obrázek 32 Obroušený vzorek 2



Obrázek 33 Obroušený vzorek 3



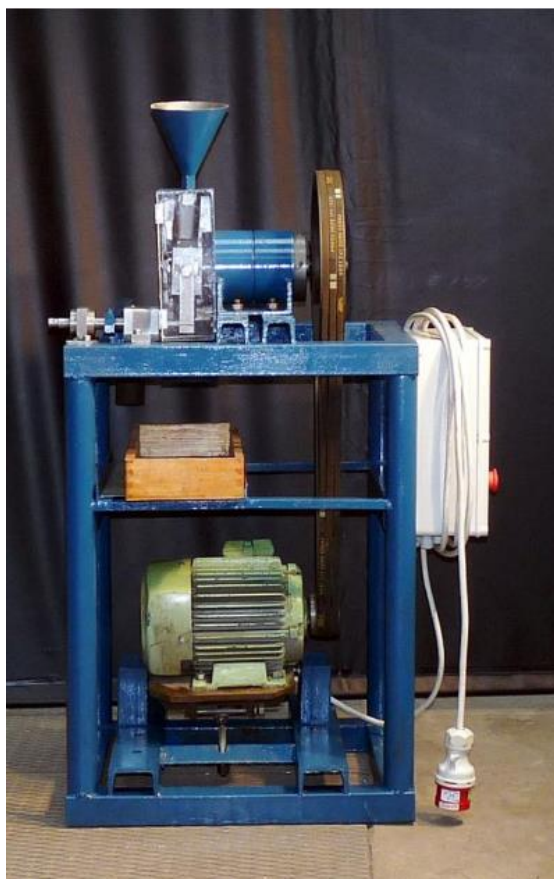
Obrázek 34 Obroušený vzorek 4



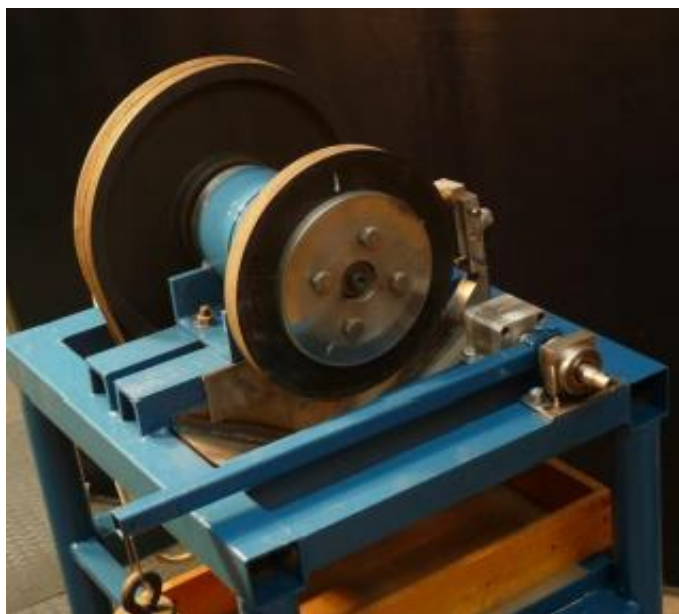
Obrázek 35 Obroušený vzorek 5



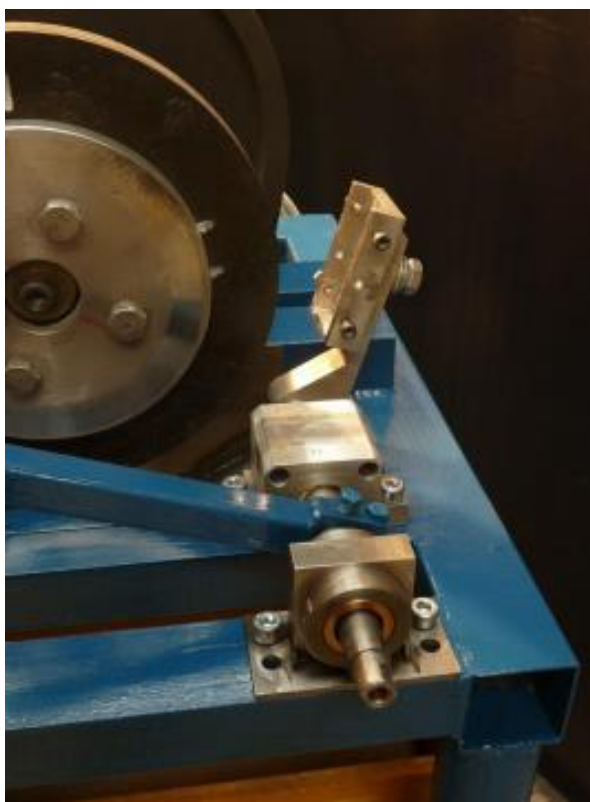
Obrázek 36 Etalon



Obrázek 37 Přístroj s pryžovým kotoučem [73]



Obrázek 38 Detail pákového mechanismu [73]



Obrázek 39 Detail kotouče a držáku vzorků [73]

6.2.2.Průběh a zhodnocení zkoušky

Zkouška byla prováděna na pěti vzorcích, ke kterým byly přiděleny etalony pro porovnání a zahrnutí možných vnějších vlivů – zahřátí kotouče, opotřebení kotouče atd. Vzorky i etalony byly zváženy před a po zkoušce na váze s přesností na tři desetinná místa – výstupem byl hmotnostní úbytek materiálu. Materiálem etalonu byla normalizačně žíhaná ocel 12 050, která byla nařezaná ze čtyřhranné tyče na rozměry 55 x 28 x 14. Pro všechny vzorky byly použity stejné parametry zkoušky, které vycházely z ASTM G65 normy:

- Obvodová rychlost: 2,6 m/s
- Abrazivo: křemenný písek, frakce 0,3 mm
- Množství částic: 310 g/min
- Doba zkoušky: 6 min 24 s
- Ujetá obvodová vzdálenost: 1000 m

Průběh zkoušky byl následující: nejdříve se provedla zkouška pro etalon a vzápětí pro vzorek s návarem, poté se očistil a orovnal kotouč a zařízení zůstalo pár minut v klidu, aby se ochladilo. Následovalo očištění etalonu/vzorku a zvážení hmotnosti (Tabulka 2), (Obrázek 40), (Obrázek 41).

Tabulka 2 Naměřené hodnoty před a po zkoušce s vyhodnocením poměrného opotřebení

Č.	m_{1e} [g]	m_{2e} [g]	Δm_e [g]	m_{1v} [g]	m_{2v} [g]	Δm_v [g]	$\psi = \frac{\Delta m_e}{\Delta m_v}$ [g]
1	171,211	171,041	0,170	216,422	216,245	0,177	0,960
2	172,462	172,275	0,187	222,643	222,432	0,211	0,886
3	168,102	167,954	0,148	218,911	218,887	0,024	6,167
4	171,398	171,255	0,143	228,763	228,733	0,030	4,767
5	168,439	168,268	0,171	225,870	225,838	0,032	5,344

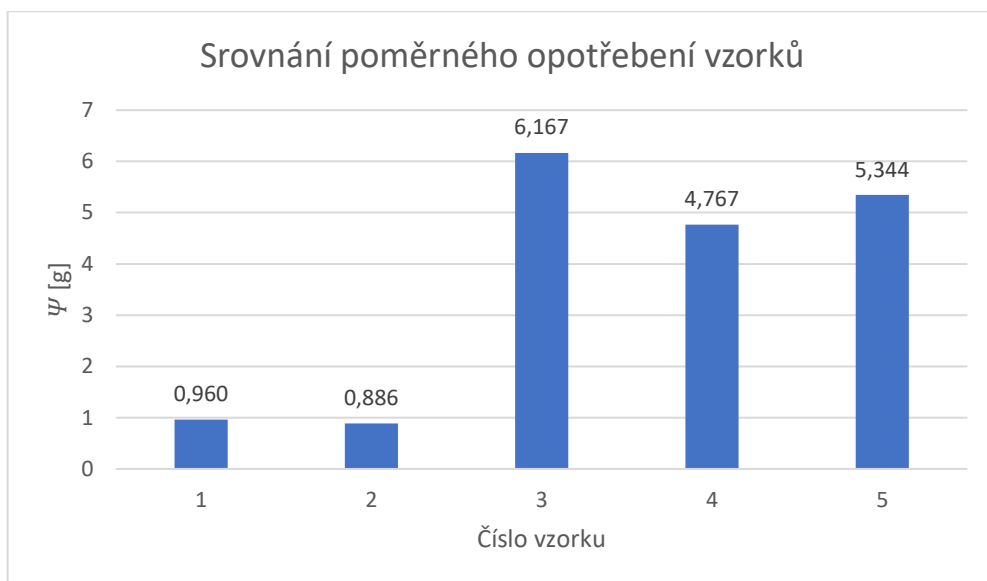
m_{1e} → hmotnost etalonu před zkouškou

m_{2e} → hmotnost etalonu po zkoušce

m_{1v} → hmotnost vzorku před zkouškou

m_{2v} → hmotnost vzorku po zkoušce

$$\Psi = \frac{\Delta m_e}{\Delta m_v} \rightarrow \text{poměrné opotřebení (hmotnostní úbytek materiálu)}$$



Obrázek 40 Srovnání poměrného opotřebení vzorků

Z grafu srovnání poměrného opotřebení vzorků lze vidět, že vzorky s 15 % B₄C v přídavném materiálu (austenitická manganová ocel) jsou daleko odolnější vůči abrazivnímu opotřebení – důvodem je vysoká tvrdost B₄C. Výsledky zkoušky jsou ovlivněny vnějšími vlivy, ať už vlivy způsobené zařízením nebo lidským faktorem – nevycentrovaný vzorek, opotřebovaný kotouč, nedokonalé zatížení v průběhu zkoušky, vychýlené sypání abraziva atd.



Obrázek 41 Vzorky a etalony po abrazivní zkoušce

7. ZÁVĚR

Otěruvzdornost kompozitních materiálů je možné zvýšit přidáním vhodných látek, správnou kombinací plniva a pojiva, úpravou mikrostrukturních vlastností kompozitu, použitím speciálních úprav, správným výběrem vláken, správným uspořádáním vláken nebo dobrou adhezí mezi fázemi.

V rámci bakalářské práce byly vytvořeny vzorky kompozitních materiálů s kovovou maticí pomocí plazmového navařování austenitické manganové oceli na korozivzdornou ocel. Složení návaru mělo dvě podoby – čistá austenitická manganová ocel nebo obohacená o 15 % B_4C (karbid boru), který měl zvyšovat pevnost návaru. Vzorky byly následně zkoušeny v rámci abrazivní zkoušky, během které bylo využito zařízení s pryžovým kotoučem. Jako abrazivo byl použit křemenný písek (frakce 0,3 mm). Pro vyhodnocení experimentu byla zvolena metoda hmotnostní ztráty vzorku, u které je snížení opotřebení, díky přidání B_4C . Vzorky s B_4C v přídavném materiálu jsou až šestkrát odolnější vůči abrazivnímu opotřebení než čistá austenitická manganová ocel.

Bibliografie

- [1] NĚMEC, doc., prof. SUCHÁNEK a doc. ŠANOVEC. *Základy strojírenské technologie I. 3*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2016. ISBN 978-80-01-06056-8.
- [2] What Are Composites?. In: *Romeo RIM* [online]. Michigan: Romeo RIM, Inc, 2023 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://romeorim.com/what-are-composites/>
- [3] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. 1. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [4] BERTHELOT, Jean-Marie. *Composite materials: Mechanical behavior and structural analysis*. 1. New York: Springer, 1999. ISBN 0387984267.
- [5] AGARVAL, Bhagwan a Lawrence BROUTMAN. *Vláknové kompozity*. 1. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1987, 295 s.
- [6] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [7] What Are the Pros and Cons of Composite Materials?. In: *Pacific Aerospace Corporation (PAC)* [online]. Southern California: 8131 Monroe Avenue, Stanton, CA 90680, 2021 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://www.pacificaerospacecorp.com/what-are-the-pros-and-cons-of-composite-materials/>
- [8] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [9] WEBTEAM. 10 Surprising Examples of Composite Materials. In: *SMI Composites* [online]. Comer: SMI Composites, 2018 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://smicomposites.com/10-surprising-examples-of-composite-materials/>

- [10] REJL, Oldřich. Kompozitní materiály ve stavebnictví. In: *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo, 2001 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/stresni-okna/9909-kompozitni-materialy-ve-stavebnictvi>
- [11] Technologie výroby: Co je to kompozit?. In: *PREFA KOMPOZITY* [online]. Brno: Kulkova 10/4231, 2018 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/co-je-to-kompozit/>
- [12] GARCHE, Jürgen a Klaus BRANDT. *Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications: Li-Battery Safety*. 1. Amsterdam: Elsevier, 2018. ISBN 978-0-444-63777-2.
- [13] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [14] DAĐOUREK, Doc. Ing. Karel. *Kompozitní materiály definice a rozdělení*. Liberec, 2008. Studijní materiál. Technická univerzita v Liberci.
- [15] MARTINEC, Vladimír. MMC – kompozity s kovovou maticí. In: *Academia* [online]. San Francisco: Academia, 2023 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: https://www.academia.edu/10861159/MMC_kompozity_s_kovovou_matric%C3%AD
- [16] SAHIN, Y. *The prediction of wear resistance model for the metal matrix composites* [online]. 258. Amsterdam: Elsevier, 2005 [cit. 2023-01-07]. ISBN 0043-1648. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164804004399>
- [17] BHANSALI, Kirit a Robert MEHRABIAN. Abrasive Wear of Aluminum-Matrix Composites. *Journal of Metals* [online]. 2013, **34**(9), 30-34 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: doi:10.1007/BF03338093
- [18] SURAPPA, M.K. Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities. *Sadhana* [online]. Indian Academy of Sciences, 2003, **28**, 319–334 [cit. 2023-02-24]. ISSN 0973-7677. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/BF02717141>

- [19] Titanium Matrix Composites. *Engineering Materials, Processes* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, 2, 367-382 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-540-73036-1__9
- [20] Aluminum and Nickel Matrix Composites Reinforced by CNTs: Dispersion/Mixture by Ultrasonication. *Metals* [online]. 2017, 7(279) [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: doi:10.3390/met7070279
- [21] Microstructure and mechanical behavior of metallic glass fiber-reinforced Al alloy matrix composites. *Scientific Reports* [online]. 2016, 6(24384) [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: doi:10.1038/srep24384
- [22] LOW, I.M. *Ceramic-Matrix Composites: Microstructure, Properties and Applications*. 1. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2006, 614 s. ISBN 978-1-85573-942-0.
- [23] Materials & Processes: Fabrication methods. In: *CompositesWorld* [online]. Cincinnati: Gardner Business Media Inc., 2006 [cit. 2022-12-31]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/fabrication-methods>
- [24] Composites Manufacturing Processes. In: *CompositesLab* [online]. Arlington: American Composites Manufacturers Association, 2023 [cit. 2022-12-31]. Dostupné z: <https://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/>
- [25] Povrchové úpravy vláken pro polymerní kompozity. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, s.r.o., 1997 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povrchove-upravy-vlaken-pro-polymerni-kompozity>
- [26] TULKA, Jaromír. *Povrchové úpravy materiálů*. 1. Brno: VUT v Brně, 2005. ISBN 80-214-3062-1.
- [27] Chemical Processes for the Surface Treatment of Components. In: <https://www.ringfeder.com/> [online]. Gross-Umstadt: RINGFEDER POWER TRANSMISSION GMBH, 2023 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://blog.ringfeder.com/surface-treatment-components-2-chemical-processes>

- [28] The Basic Guide Of Chrome Plating. In: *LEADRP* [online]. 2023 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://leadrp.net/blog/the-basic-guide-of-chrome-plating/>
- [29] What Is Chrome Plating?. In: *Monroe engineering* [online]. 2019 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://monroeengineering.com/blog/what-is-chrome-plating/>
- [30] Co je to galvanické niklování. In: *Massag* [online]. 2023 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: massag.com/blog/1589-co-je-to-galvanicke-niklovani
- [31] Chemické niklování. In: *Bomex* [online]. Vsetín, 2023 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: bomex.cz/technologie/chemicke-niklovani
- [32] Plating: the role of nickel. In: *Nickel institute* [online]. 2023 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications/plating/
- [33] Anodická oxidace. In: *Alunet* [online]. Staré Hradiště: ALUCAD Bohemia s. r. o., 2023 [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/anodicka-oxidace>
- [34] BOKOV, Dmitry. Nanomaterial by Sol-Gel Method: Synthesis and Application. *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. 2021, 1-21 [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: [doi:10.1155/2021/5102014](https://doi.org/10.1155/2021/5102014)
- [35] HUGHES, Matt. What is Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)? 29 January 2022. In: *Semicore* [online]. Livermore: Semicore Equipment, Inc., 2023 [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: <https://www.semicore.com/news/118-what-is-plasma-enhanced-chemical-vapor-deposition-pecvd>
- [36] Nové otěruvzdorné PVD povlaky. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, s.r.o., 1997 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nove-oteruvzdorne-pvd-povlaky>
- [37] SUCHÁNEK, Jan a Zuzana TATÍČKOVÁ. Otěruvzdorné povrchové vrstvy a povlaky. In: *TECHMAGAZÍN* [online]. Praha: TECH MEDIA PUBLISHING, s r.o. - TechMagazín, c2010-2023 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/45782>

- [38] PVD Povlakování. In: *Voestalpine* [online]. Brno: voestalpine High Performance Metals CZ s.r.o., 2023 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/cs/cs/sluzeb/povlakovani/pvd-povlakovani/>
- [39] FARAJI, Ghader, Hyoung KIM a Hessam KASHI. Severe Plastic Deformation. In: *Severe Plastic Deformation*. Elsevier, 2018, s. 1-17. ISBN 9780128135181.
- [40] PENG, Austin. Co je PVD povlak?. In: *Dekmake* [online]. Shenzhen City: Shenzhen DEK Manufacturing Co., Ltd., 2023 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://www.dekmake.com/cs/co-je-povlak-pvd/>
- [41] PÍŠKA, Miroslav. Trendy v PVD a CVD povlakování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2014, (11) [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: doi:141156
- [42] CVD Povlakování. In: *Voestalpine* [online]. Vyškov: voestalpine High Performance Metals CZ s.r.o., 2023 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/cs/cs/sluzeb/povlakovani/pozadavky-k-cvd-povlakovani-kovovych-dilu/>
- [43] Použití DLC povlaků (nejen) v automobilovém průmyslu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013, 6 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: [mmspektrum.com/clanek/pouziti-dlc-povlaku-nejen-v-automobilovem-prumyslu](https://www.mmspektrum.com/clanek/pouziti-dlc-povlaku-nejen-v-automobilovem-prumyslu)
- [44] Nízkoteplotní povlakování DLC. In: *Voestalpine* [online]. Vyškov: voestalpine High Performance Metals CZ s.r.o., 2023 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: [voestalpine.com/highperformancemetals/cs/cs/nizkoteplotni-povlakovani-dlc/](https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/cs/cs/nizkoteplotni-povlakovani-dlc/)
- [45] DLC povlaky do Formule 1. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, 3 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/dlc-povlaky-do-formule-1>
- [46] Polyuretan MetaLine. In: *Techgum* [online]. 2023 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: [techgum.cz/polyuretan/](https://www.techgum.cz/polyuretan/)
- [47] The Many Uses of Polyurethane Paint and Coatings. In: *Bottom PAINT STORE* [online]. [cit. 2023-03-19]. Dostupné z:

bottompaintstore.com/blog/polyurethane-paint-coatings-foam/polyurethane-paint-coatings/

- [48] Keramické povlaky jako účinná ochrana proti působení vody, chemikálií i tření. In: *Panfitinka* [online]. [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: panfitinka.cz/post/keramicke-povlaky-jako-ucinna-ochrana-proti-pusobeni-vody-chemikalii-i-treni
- [49] HUGHES, Matt. What is Sputtering? Magnetron Sputtering?. *Semicore Equipment* [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.semicore.com/what-is-sputtering>
- [50] WASA, Kiyotaka. *Handbook of Sputter Deposition Technology: Fundamentals and Applications for Functional Thin Films, Nano-Materials and MEMS*. 1. upravené. Nizozemsko: Elsevier Science, 2012, 660 s. ISBN 1437734839.
- [51] *Saryweb-Ivo Hlavatý* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2019 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <http://saryweb.ivohlavaty.cz/>
- [52] Co je vlastně ... svařování v ochranném plynu?. *Fronius* [online]. c2006-2023 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://blog.perfectwelding.fronius.com/cs/svarovani-v-ochrannem-plynu-s-tig-plazmou-a-mig-mag-k-dokonalemu-svaru/>
- [53] HÁJEK, Jaroslav. Přehled technologií svařování v ochranných plynech. *MM Průmyslové spektrum: Povrchové úpravy* [online]. Ostrava, 2010, 10(3) [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prehled-technologie-svarovani-v-ochrannych-plynech>
- [54] Metoda svařování MIG/MAG. In: *Schinkmann* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/mig-mag-svarovani-v-ochranne-atmosfere-plynu>
- [55] LONSKÝ, Jiří. *Statická elektřina a povrchové úpravy plastů* [online]. Ostrava, 2007, 7(4) [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/staticka-elektrina-a-povrchove-upravy-plastu>

- [56] PRŮVODCE ELEKTROSTATICKÝMI APLIKACEMI. In: *Selemix* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://ceb.selemix.com/cs/technick%C3%A1-pomoc/expert-know-how/pr%C5%AFvodce-elektrostatick%C3%BDmi-aplikacemi/>
- [57] Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2003, 3(6) [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy-2-2>
- [58] FREMUNT, P a T PODRÁBSKÝ. *Konstrukční oceli*. 1. Brno: CERM, 1996, 261 s. ISBN 80-858-6795-8.
- [59] SUBRAMANYAM, D.K. *ASM handbook: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, Specialty Steels and Heat-Resistant Alloys: Specialty Steels and Heat-Resistant Alloys, Austenitic Manganese Steels*. 10. ASM International, 2005. ISBN 978-0-87170-377-4.
- [60] REDAKCE ČRO, Leonardo. Karbid boru pro ekologičtější ohňostroj. *Český rozhlas* [online]. [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://plus.rozhlas.cz/karbid-boru-pro-ekologictejsi-ohnostroj-6625251>
- [61] CROUCH, I.G., G.V. FRANKS, C. TALLON, S. THOMAS a M. NAEBE. Glasses and ceramics. In: *The Science of Armour Materials* [online]. 1. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017, s. 331-393 [cit. 2023-05-06]. ISBN 9780081010020. Dostupné z: doi:B9780081007044000074
- [62] KARBID BORU. In: *ABRANOVA* [online]. ABRANOVA s.r.o., 2023 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://abranova.cz/karbid-boru>
- [63] ROHAN, Pavel, František LUKÁČ, Marie KOLAŘÍKOVÁ, Stanislav KRUM, Jakub HORNÍK, Jaroslav LUKEŠ, Josef ŠEPITKA a Jiří KUCHAR. Pulsed Plasma Surfacing of Titanium Matrix Cermet Based on B4C. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2022, 31(6), 1975-1984 [cit. 2023-03-24]. ISSN 1059-9630. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-022-01421-0
- [64] ŁATKA, L. a P. BISKUP. Development in PTA Surface Modifications – A Review. *Advances in Materials Science* [online]. 2020, 20(2), 39-53 [cit. 2023-01-18]. ISSN 2083-4799. Dostupné z: doi:10.2478/adms-2020-0009

- [65] NEIKOV, Oleg, Stanislav NABOYCHENKO, Irina MURASHOVA a Nikolay YEFIMOV. Chapter 23 - Production of Refractory Metal Powders. In: *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders*. 2. Elsevier, 2019, s. 685-755. ISBN 9780081005439.
- [66] Hardfacing: What is it and how to do it right. *IFexport* [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://www.ifexport.com/hardfacing-what-is-it-and-how-to-do-it-right/>
- [67] SUCHÁNEK, Jan. *Abrazivní opotřebení*. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2020. ISBN 978-80-01-06733-8.
- [68] VOCEL, M a V DUFEK. *Tření a opotřebení strojních součástí*. 1. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1987. ISBN 04-224-76.
- [69] Opotřebení břitů nástrojů ze slinutých karbidů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, 1(2), 71-77 [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/opotrebeni-britu-nastroju-ze-slinutych-karbidu-2>
- [70] Zkouška oděru a tření. In: *EUROLAB* [online]. 2020 [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: <https://www.labaratuar.com/cs/testler/mekanik/asinma-ve-surtunme-testi/>
- [71] Dry sand Rubber/Wheel Abrasion Test (ASTM G65). In: *Nova Swiss* [online]. [cit. 2023-06-28].
- [72] Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. *ASTM International* [online]. 2021, 16 [cit. 2023-06-28]. Dostupné z: doi:10.1520/G0065-16R21
- [73] PANÁČEK, Tomáš. *STUDIUM DEGRADAČNÍCH PROCESŮ NA NÁVARECH PŘI INTERAKCI S TVRDÝMI ČÁSTICEMI*. Praha, 2015. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Jan Suchánek.
- [74] Jak probíhá galvanické pokovování?. In: *CVP Galvanika s.r.o.* [online]. Příbram: CVP Galvanika s.r.o., 2023 [cit. 2023-03-07]. Dostupné z: <https://www.cvp-galvanika.cz/pokovovani-zinkovani>
- [75] Niklování. In: *SUPER-CHROM* [online]. c2009-2010 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: superchrom.cz/niklovani-super-chrom-cz/

Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry navařování austenitické manganové oceli na korozivzdornou ocel	35
Tabulka 2 Naměřené hodnoty před a po zkoušce s vyhodnocením poměrného opotřebení.....	46

Seznam obrázků

Obrázek 1 Složení kompozitu na bázi polymerů (výztuž + matrice) [2].....	10
Obrázek 2 Proces navíjení vlákna [24].....	16
Obrázek 3 Odstředivé lití [24]	17
Obrázek 4 Proces pultruze [24]	17
Obrázek 5 Metoda Gel coat (gelem potažený kultivovaný kámen) [24]	18
Obrázek 6 Synergický účinek – hliníková pěna umístěná do tenkostěnné hliníkové trubky [14].....	19
Obrázek 7 Proces galvanického pokovování [74].....	20
Obrázek 8 Ukázky chromování [28]	21
Obrázek 9 Příklad využití niklování v praxi [75].....	22
Obrázek 10 Proces anodické oxidace [33].....	22
Obrázek 11 Metoda Sol-Gel [34].....	23
Obrázek 12 PECVD [35].....	24
Obrázek 13 Využití PVD povlakování na nástroje [40]	25
Obrázek 14 Ukázka povlakovaných předmětů ve firmě VÚHŽ [43]	27
Obrázek 15 Polyuretanový nástřík MetaLine čerpadla TSURUMI [46].....	28
Obrázek 16 Plazmové navařování [51].....	29
Obrázek 17 Metoda svařování MIG/MAG [54].....	30
Obrázek 18 Karbid boru [62].....	32
Obrázek 19 Plazmový navařovací automat PPC 250 R 6.....	36
Obrázek 20 Průběh experimentu	36
Obrázek 21 Graf průběhu teplot pro vzorek 1	37
Obrázek 22 Graf průběhu teplot pro vzorek 2.....	37
Obrázek 23 Graf průběhu teplot pro vzorek 3.....	38
Obrázek 24 Graf průběhu teplot pro vzorek 4.....	38
Obrázek 25 Graf průběhu teplot pro vzorek 5.....	39
Obrázek 26 Vzorek číslo 1	39
Obrázek 27 Vzorek číslo 2.....	40
Obrázek 28 Vzorek číslo 3.....	40
Obrázek 29 Vzorek číslo 4.....	41
Obrázek 30 Vzorek číslo 5.....	41

Obrázek 31 Obroušený vzorek 1	42
Obrázek 32 Obroušený vzorek 2.....	43
Obrázek 33 Obroušený vzorek 3.....	43
Obrázek 34 Obroušený vzorek 4.....	43
Obrázek 35 Obroušený vzorek 5.....	43
Obrázek 36 Etalon	44
Obrázek 37 Příklad s pryžovým kotoučem [73]	44
Obrázek 38 Detail pákového mechanismu [73].....	45
Obrázek 39 Detail kotouče a držáku vzorků [73]	45
Obrázek 40 Srovnání poměrného opotřebení vzorků	47
Obrázek 41 Vzorky a etalony po abrazivní zkoušce	48