VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH KERAMICKÉHO POVLAKU NA KOTOUČOVÉ BRZDY JÍZDNÍHO KOLA
DESIGN OF CERAMIC COATING FOR DISC BRAKE OF BICYCLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Vojtěch Eliáš**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Jaroslav Kubíček**
SUPERVISOR

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Vojtěch Eliáš**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	**Ing. Jaroslav Kubíček**
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh keramického povlaku na kotoučové brzdy jízdního kola

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hydraulické kotoučové brzdy patří k výbavě horských kol již standardně. Pro náročné horské sjezdy je ohřev a deformace kotoučů velmi důležitý aspekt.
Práce řeší možnost využití tepelně izolačního povlaku na činné ploše kotouče.

Cíle bakalářské práce:

1. Studie komponentů jízdního kola.
2. Rozbor namáhání kotouče brzdy kola a funkční požadavky povlaku.
3. Studie žárového nástřiku keramického povlaku.
4. Navrhnout materiál funkčního povlaku na kotouč brzdy kola.
5. Navrhnout technologický postup žárového nástřiku.
6. Hodnocení a závěr.

Seznam doporučené literatury:

ASM handbook. Surface Engineering Volume 5. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 978-0-87170-384-2.

AMBROŽ, Oldřich a Jiří KAŠPAR. Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-030-0347-4.

KUNEŠ, Josef, Zdeněk VESELÝ a Milan HONNER. Tepelné bariéry. Praha: Academia, 2003. ISBN 80-200-1218-4.

MOHYLA, Miroslav. Technologie povrchových úprav kovů. 3. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1217-7.

SEDLÁČEK, Vladimír. Povrchy a povlaky kovů. Praha: ČVUT, 1992. ISBN 80-01-00799-5.

PODJUKLOVÁ, Jitka. Speciální technologie povrchových úprav I. Dot. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1997. ISBN 80-7078-235-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

ELIÁŠ Vojtěch: Návrh keramického povlaku na kotoučové brzdy jízdního kola

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem keramického povlaku na brzdný kotouč jízdního kola a jeho realizací. Důvodem je dosažení vyšší tepelné odolnosti a otěruvzdornosti, což jsou vlastnosti, kterými se vyznačují keramické materiály. Pro nanesení povlaku byla zvolena technologie plazmatického žárového nástřiku. Materiál povlaku se skládal z vazné vrstvy o chemickém složení 95% Ni a 5% Al a vnější (povrchové) vrstvy skládající se z 92 % ZrO_2 a 8 % Y_2O_3. Po nanesení povlaku následovalo testování kotouče v reálných podmínkách při jízdě na kole. Vzhledem k absenci potřebných měřících zařízení se jednalo o test na základě subjektivních pocitů testujícího. Nanesený povlak vykazoval mírně horší třecí vlastnosti než konvenční ocel, ale funkčnost brzdění nebyla nijak výrazně omezena.

Klíčová slova: žárové nástřiky, brzdový kotouč, keramický povlak, jízdní kolo

ABSTRACT

ELIÁŠ Vojtěch: Design of ceramic coating for disc brake of bicycle.

This Bachelor Thesis deals with the design of ceramic coating on a braking rotor of a bicycle and its implementation. The reason for this is the achievement of better heat resistance as well as better abrasion resistance, which are typical properties of ceramic materials. The method of heat plasma spraying was employed in order to apply the coating. The coating material consisted of the binding layer made up by 95% Ni and 5% Al and of the outer (superficial) layer made up by 92 % ZrO_2 and 8 % Y_2O_3 . After the coating had been sprayed, the rotor was tested in real conditions of a bicycle ride. Considering the absence of the necessary measuring equipment, the testing was only based on the rider's subjective feelings. The sprayed coating showed slightly worse friction properties compared to conventional steel, however, the functionality of the braking device was not significantly limited.

Keywords: thermal spraying, brake rotor, ceramic coating, bicycle

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ELIÁŠ, Vojtěch. *Návrh keramického povlaku na kotoučové brzdy jízdního kola*. Brno, 2018. 38s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně, dne 24.5.2018

……
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Jaroslavu Kubíčkovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Poděkování patří i rodině, která mě v období studia podporovala.

Obsah

ZADÁNÍ
ABSTRAKT
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE
ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ
PODĚKOVÁNÍ
OBSAH
ÚVOD……9
1 KONSTRUKCE JÍZDNÍHO KOLA 10
1.1 Jízdní kolo 10
1.2 Nejdůležitější části jízdního kola 10
1.3 Brzdy 13
1.3.1 Kotoučové 13
1.3.2 Ostatní druhy brzd 14
2 PROBLEMATIKA KOTOUČOVÝCH BRZD 16
2.1 Úvod do problematiky a tepelná analýza kotouče 16
2.2 Požadavky brzdné plochy 17
2.3 Faktory ovlivňující účinnost brždění 17
2.4 Vývoj ve světě kotoučových brzd 20
3 ŽÁROVÉ NÁSTŘIKY 21
3.1 Úvod do technologie a důvody použití 21
3.2 Princip vytváření žárových nástřiků 21
3.3 Struktura žárového nástřiku 22
3.4 Vlastnosti žárových nástřiků 23
3.5 Technologie žárových nástřiků 23
3.6 Metody žárových nástřiků 24
3.7 Plazmatický nástřik 25
4 PRAKTICKÁ ČÁST 28
4.1 Volba materiálu 28
4.2 Popis brzdového kotouče pro experiment 30
4.3 Technologický postup a vliv procesních parametrů 30
4.4 Testování kotouče v reálných podmínkách 35
5 ZÁVĚR 38
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ
SEZNAM TABULEK

ÚVOD [1], [2], [3], [4]

Technologie žárových nástřiků nachází využití v mnoha oblastech průmyslu, kde má často nezastupitelnou funkci. Žárově stříkané povlaky umožňují zvyšování užitných vlastností výrobku, prodloužení jeho životnosti, úsporu materiálu nebo provádění renovací. To vše má pozitivní dopad na ekonomickou stránku výroby, zejména z důvodu úspory energie a živé práce. Dle druhu tepelného zdroje, potřebného k natavení nanášeného materiálu, rozlišujeme různé metody žárových nástřiků. Vzhledem k experimentu této bakalářské práce je největší pozornost věnována metodě plazmatického nástřiku.

Práce zkoumá využití této metody v oblasti kotoučových brzd jízdního kola, konkrétně nanesení keramického povlaku na brzdový kotouč. Důvodem byla kompenzace přehřívání brzdného systému. Problematika přehřívání brzd může mít za následek pokles brzdného účinku, větší opotřebení kotouče nebo jiná mechanická poškození. Tento problém trápí především cyklisty, kteří brzdy namáhají v extrémní míře. Jedná se zejména o disciplínu sjezdu (neboli downhillu) či freeridu.

Keramické materiály se vyznačují zejména skvělou odolností proti otěru nebo také odolností proti tepelnému namáhání. Zvolený materiál se často používá jako tepelná bariéra, tedy jako ochrana určitého systému před působením nadměrného tepla. Jistým otazníkem zvoleného materiálu byly jeho třecí vlastnosti, o kterých však žádný z nalezených zdrojů příliš nereferuje. Nicméně jsou tyto vlastnosti pro správnou funkčnost brždění velice důležité.

Cílem a vyvrcholením této práce byla realizace experimentu, který se kromě všech operací, spojených s technologií nanesení povlaku skládal také z testování kotouče v reálných podmínkách.

Obr. 1 Nanášení žárových nástřiků [5]

Obr. 2 Nanášení žárových nástřiků [6]

1 KONSTRUKCE JÍZDNÍHO KOLA

1.1 Jízdní kolo [7], [21]

Historie jízdního kola je velice sporná. První náznaky bicyklu jako dopravního prostředku spadají do počátku 19. století. Od té doby prochází bicykly neustálým vývojem a inovacemi, které jsou znatelné každým přibývajícím rokem. Můžeme je rozlišovat podle typu použití na horská, krosová, trekkingová, silniční, freestylová či sjezdová. Geometrie kola se podle tohoto typu různě liší. Na obr. 1 je zobrazeno sjezdové kolo Mondraker s popisem jednotlivých komponentů.

Obr. 3 Sjezdové kolo MondrakerDune R 2018 [8]

1.2 Nejdůležitější části jízdního kola

- **Rám** [9], [10]

Kostra celého kola. Je to sestava rámových trubek, spojených různými technologiemi v jeden celek. Skládá se z hlavního rámového trojúhelníku a zadní stavby. Hlavní rámový trojúhelník tvoří sestava hlavové, horní rámové, dolní rámové a sedlové trubky. Zadní stavba se odvíjí podle toho, je-li rám pevný (hardtail) nebo odpružený (fullsuspension). Rámy bývají většinou pevné, pouze u kol na extrémnější podmínky se využívají odpružené. Do hlavové a středové trubky se vkládá hlavové a středové složení. V zadní stavbě rámu jsou patky pro uchycení osy zadního náboje. Rámy jsou dodávány podle velikosti, která je daná vzdáleností roztečí mezi středovou osou a koncem sedlové trubky rámu. Velikost rámu se udává v palcích. Standardně se rámy v dospělých velikostech nabízejí od velikosti 15 palců (pro doporučenou výšku jezdce 150 cm) do 24 palců (pro doporučenou výšku jezdce 200 cm). Jako materiál pro výrobu rámů se nejčastěji používá ocel, slitiny hliníku nebo nejdražší, ale také vlastnostmi superlativní titan či karbon.

Obr. 4 Sjezdový rám Mondraker [11]

- **Vidlice** [12], [44]

Je uložena v hlavovém složení hlavové trubky rámu. Do patek vidlice se umisťuje náboj předního kola. Může být pevná i odpružená. U kol s horským zaměřením, kde se při jízdě předpokládají větší výmoly a nerovnosti se používají z pravidla vidlice odpružené. Velikost zdvihu odpružení se standardně dodává od 70 mm (treková kola pro snažší terény) až po 200 mm (sjezdová kola). Prvním a dnes již skoro historickým typem odpružených vidlic byly vidlice pružinové. Ty neobsahují tlumič, pouze elastomerový doraz, což se v terénu projevuje dosti nepříznivě, jelikož rázy přenáší zcela netlumeně a zpožděně. V současné době se používají zejména odpružené vidlice s olejovým tlumičem. Pružení je realizováno buď pružinou, nebo také prostřednictvím vzduchové komory. U odpružených vidlic je pro správnou funkci klíčové jejich nastavení. Zejména u silničních, ale také např. u freestyle BMX kol se používají vidlice pevné.

Obr. 5 Odpružená vidlice SR – Suntour se zdvihem 100 mm [13]

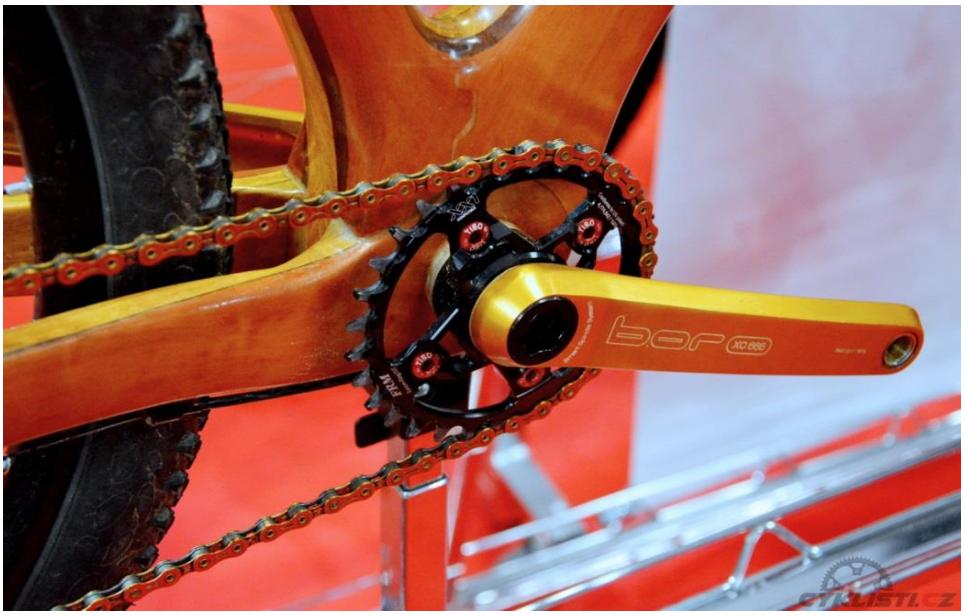
- **Zapletená kola** [14], [16]

Zapletená kola se skládají z náboje, výpletu, ráfku, duše a pláště. Velikosti ráfků se standardně dodávají od 16 do 29 palců. Výplet obvykle obsahuje 32 nebo 36 drátů. U kvalitnějších, pevnějších ráfků silničních kol se často používá pouze 20 drátů, výjimečně pouze 16 drátů. Ráfek musí být vzhledem ke své funkci dobře pevnostně odolný. Provedení ráfku bývá nejčastěji ve tvaru „U“ nebo „V“. Výplet musí být proveden tak, aby osa náboje byla kolmá na rovinu ráfku. Náboj se většinou skládá z osy, ložisek, těla náboje, konusů, kontramatek a upínacího mechanismu. U zadního náboje je navíc řetězem hnaný mechanismus. Ten může tvořit buď kazeta s pastorky upnutá na ořechu náboje (válec s typizovanými drážkami, na který se jednotlivé pastorky nasunují), vícekolečko našroubované na náboji, nebo pouze jeden pastorek (singlespeed). Upínaní je realizováno více způsoby. Nejjednodušší způsob upínání je zajištění náboje pomocí dvou matek. Servisu příznivější pak rychloupínání buď samotným rychloupínákem s matkou, nebo pomocí pevné osy, která se šroubuje do otvoru ve vidlici.

Obr. 6 Zapletená kola Halo 20 [15]

- **Pohon** [17], [18]

Skládá se ze středového složení, klik, pedálů, převodníku a řetězu. Tyto komponenty spolu s pastorkem zadního náboje tvoří řetězový spoj. Zřídka se místo řetězu používá řemen. Mezi hlavní výhody řetězu patří jeho účinnost, která dosahuje až 98 %. Jedná se o řetězy válečkové. Pro zajištění polohy středové osy klik a jejího otáčení slouží ložiska středového složení. Rozlišuje se více druhů středových složení. Lišit se mohou tvarem středové osy pro spojení s klikou (čtyřhran, octalink nebo integrovaná osa ke klice), závitu středového složení v rámu (anglický – BSA, italský – IT), či šířky domečku (68 mm, 70 mm, 73 mm). Počet zubů převodníku k počtu zubů pastorku udává převodový poměr. Ten lze přehazováním řetězu mezi jednotlivými převodníky korigovat pomocí přesmykače mezi předními převodníky a přehazovačkou mezi zadními pastorky kazety nebo vícekolečka.



Obr. 7 Pohon jízdního kola [17]

- **Řízení** [19], [44]

K ovládání směru jízdy slouží řídítka. Jsou upnuty v představci pomocí šroubů. Převážně u silničních kol se dá často setkat s řidítky s integrovaným představcem, tzn., že představec a řídítka tvoří jeden komponent. K lepšímu uchycení řídítek se používají tzv. gripy. Řídítka se dají rozdělit podle tvaru. Ten je navržen tak, aby co nejlépe sloužil danému stylu jízdy. Řídítka pro dětská a BMX kola se kvůli jejich větší výšce vyztužují hrazdou. Tvaru pro silniční řídítka se často přezdívá „berany“, kvůli jejich zahnutým rohům. Dodávají se v různých délkách, což ovlivňuje ovladatelnost bicyklu. Řídítka pro MTB jsou zobrazeny na obr.8. Na řídítkách jsou kromě gripů umístěny další komponenty jako např. brzdové, řadicí páky, display tachometru, atd. Různými tvary se liší i představce, jelikož na nich závisí tělesná poloha cyklisty. Proto existují představce stavitelné, umožňující nastavení sklonu.

Obr. 8 MTB řídítka MAX1 [20]

1.3 Brzdy [21]

Brzdy slouží ke zpomalení nebo úplnému zastavení kola. K ovládání brzdy slouží brzdová páčka, která je pomocí bovdenu a brzdového lanka nebo brzdové kapaliny spojena s brzdným mechanismem. Podle něj rozdělujeme více druhů brzd.

1.3.1 Kotoučové [22], [23], [24], [25]

Brzdný pohyb konají brzdové destičky, které svírají (třou) rotující brzdný kotouč. Jedná se nejúčinnější druh brzd, což se nejvýrazněji a nejlépe projevuje např. za vlhkých podmínek. Dělí se na dva základní druhy – mechanické a hydraulické. Jejich srovnání přináší tabulka 1.

Tab. 1 Srovnání kotoučových brzd jízdního kola[22], [23], [24]

Srovnání kotoučových brzd jízdního kola		
Druhy brzdy	*Hydraulická koutoučová*	*Mechanická kotoučová*
Účinnost (brzdný účinek)	Tlak kapaliny vyvíjí nejlepší brzdný účinek.	Tah brzdového lanka na třmen, působící na destičku není tak účinný jako u hydraulických brzd.
Odolnost proti prašnému prostředí	Těsnost systému zabezpečuje velkou odolnost.	Do bovdenů, které nejsou uzavřeny se může dostat nepořádek, který může funkčnost brzd omezovat.
Konstrukce	Axiální brzdný pohyb vykonávají obě destičky. Většinou vyšší hmotnost.	Axiální brzdný pohyb vykonává pouze jedna destička, na kterou působí třmen, napojený na lanko.
Údržba	Občasné odvzdušnění brzdy, výměna brzdné kapaliny. Mírně diskutabilní, záleží na kvalitě brzd.	Častější seřizování, riziko přetrhnutí lanka, regulace délky lanka v závislosti na opotřebení destiček.
Cena	Většinou několikanásobně dražší než mechanická.	Levnější alternativa.

Obr. 9 Jednotlivé komponenty hydraulické kotoučové brzdy [23]

- **Brzdové kotouče** [22], [23], [25]

Nejčastější materiál pro výrobu brzdových kotoučů je korozivzdorná ocel. Dodávají se ve větší škále průměrů. Nejčastěji, pro konvenční horská kola o průměru 160 mm, ale nabízejí se i o průměru 140 mm (např. u freestyle MTB kol) nebo o průměru 205 mm (zpravidla sjezdová kola). Upnutí k náboji bývá realizováno dvěma možnými způsoby:

1. Šestice šroubů

Upnutí je realizováno pomocí šesti šroubů. Používají se buď torxové nebo imbusové šrouby, které bývají pojištěny závitovým tmelem. Výhodou je absence použití speciálního stahovacího klíče.

Obr. 10 Upnutí kotouče pomocí šestice šroubů [22]

2. Centrlock

Upnutí je realizováno pomocí jedné centrální matice, montáž i demontáž je tak rychlejší než u prvního způsobu, ale je třeba k něj použít speciální stahovací klíč.

Obr. 11 Centrlock systém upínání kotouče[22]

- **Brzdové destičky** [22], [23], [25]

1. Sintrované

Jejich velkou výhodou je velká odolnost proti přehřátí, z čehož plyne dlouhá životnost. Aby stoprocentně plnily svou účinnost musí být destičky mírně zahřáté, a proto se hodí např. na dlouhé sjezdy. Mírnou nevýhodu lze shledat v jejich hlučnosti.

2. Organické

Jejich výhodou je menší hlučnost než u sintrovaných a jejich okamžitý nástup brždění. Jelikož jsou měkší než sintrované, rychleji se sjíždí a to zejména za mokrých a blátivých podmínek.

1.3.2 Ostatní druhy brzd

- **Ráfkové** [22], [23]

Princip spočívá v tření mezi brzdnými špalky a rotujícím ráfkem. Mají více druhů provedení. Jejich účinnost závisí na samotné konstrukci a také na kvalitě a směsi brzdových špalků. Bývají součástí levnějších jízdních kol a stále více je nahrazují brzdy kotoučové.

Obr. 12 Ráfková brzda [23]

- **Bubnové** [22]

Vyznačují se mohutným nábojem, ve kterém je skryto celé brzdné ústrojí. Používají se u elektrokol. Výhodou je minimální údržba, nevýhodou pak velká hmotnost. Vzhledem ke složitější konstrukci se vyznačují vyššími cenami.

Obr. 13 Bubnová brzda RX-RD5 [26]

- **Pákové** [22]

Princip spočívá v tom, že na pneumatiku je přitlačován brzdový špalík. Často využívána v kombinaci s torpédem. Dnes již historická záležitost, postupně byla nahrazena ráfkovými brzdami.

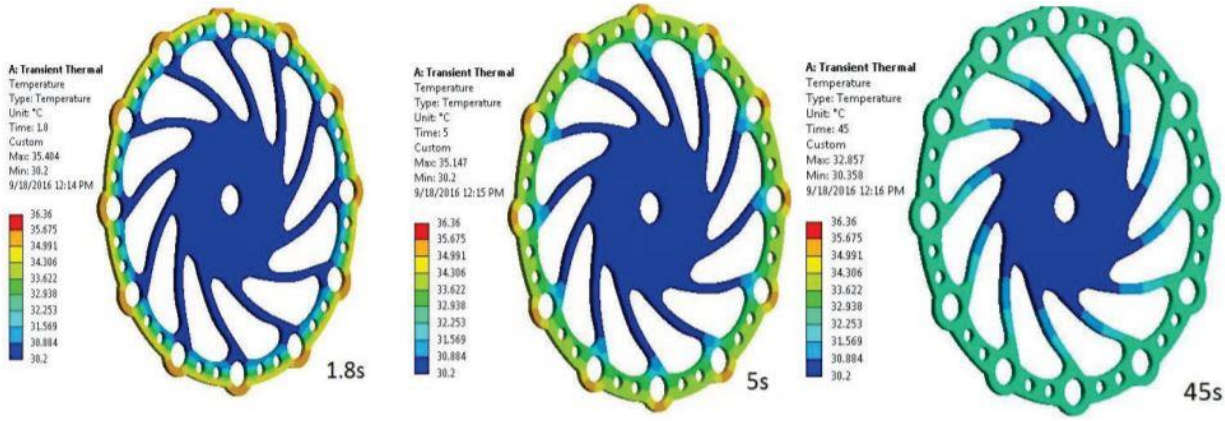
2 PROBLEMATIKA KOTOUČOVÝCH BRZD

2.1 Úvod do problematiky a tepelná analýza kotouče [25], [27], [28]

Proces brzdění představuje přeměnu kinetické energie rozjetého bicyklu na energii tepelnou. Při dlouhém a hlavně nepřerušovaném brzdění může dojít k přehřátí brzdných ploch a následnému poklesu brzdného účinku. Proto se u sjezdových a freeridových kol z důvodu omezení nárůstu teploty a lepší odolnosti používají zpravidla kotouče s většími průměry v rozmezí 180 - 205 mm, oproti konvenčním 160 mm.

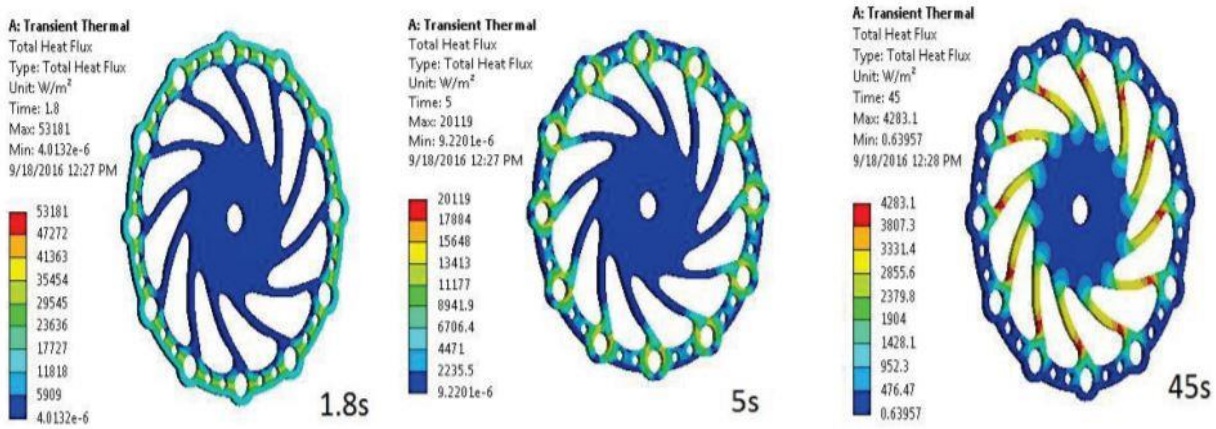
Kromě poklesu brzdného účinku dochází také k mechanickým deformacím, kdy se kotouč začne vlnit. Může dojít k jeho trvalému pokřivení, což způsobuje jeho vychylování z osy rotace a krátkým třecím kontaktům s destičkami mimo samotné brždění. V důsledku toho je důležité navrhnout tvar kotouče tak, aby byl kromě nízké hmotnosti, která hraje v cyklistickém průmyslu velice důležitou roli, také mechanicky odolný.

Růst teplot a teplotní tok v materiálu kotouče zkoumá [28]. Jedná se o numerickou analýzu, která zahrnuje brzdný proces kotoučové brzdy, skládajícího se ze samotného brždění, trvajícího 3 sekundy a následného ochlazování, kdy již nedochází ke kontaktu mezi destičkami a kotoučem. Interval doby zkoumaného procesu končí 45 sekund od začátku brždění. Vzhledem ke krátké době brzdění nedocházelo k vysokým tepelným nárůstům brzdných ploch (z 30,2 °C na 36,36 °C), tak jako tomu je při přehřívání brzd (charakteristickým poklesem brzdného účinku). Analýza však dobře ukazuje oblasti kotouče s nejrychlejším a největším nárůstem teplot. Ty jsou zřetelné v oblastech styku s brzdnou destičkou, tedy na obvodu kotouče. To znázorňuje obr. 14, na kterém je tepelná analýza zobrazena pro tři různé doby od začátku brždění (1,8 sekundy, 5 sekund a 45 sekund).



Obr. 14 Tepelné rozložení materiálu brzdového kotouče v různých časových intervalech[28]

Další částí analýzy je rozložení tepelného toku. Ten udává množství tepla, které projde jednotkou plochy za jednotku času. Z obr. 15 lze vyčíst, že k největším hodnotám tepelného toku v materiálu kotouče dochází při samotném brzdění na obvodu kotouče. Maximální hodnota tepelného toku dosahuje 53181 W/m^2 v čase 1,8 sekundy od startu brždění, poté po uvolnění destiček maximální hodnota klesá a posunuje se směrem k náboji, do centra kotouče. To značí o ventilační schopnosti koutouče, plynoucí z jeho tvaru. Z anylýzy tepelného toku (obr. 15) je mírně matoucí stejná barevná stupnice pro zcela rozdílný interval hodnot u každé ze tří zkoumaných dob od startu brždění.



Obr. 15 Rozložení tepelného toku brzdového kotouče v různých časových intervalech[28]

2.2 Požadavky brzdné plochy [29], [30]

Povrchová vrstva (povlak) brzdících segmentů (kotouče a destičky) musí k optimálnímu brzdnému účinku splňovat jisté materiálové vlastnosti:

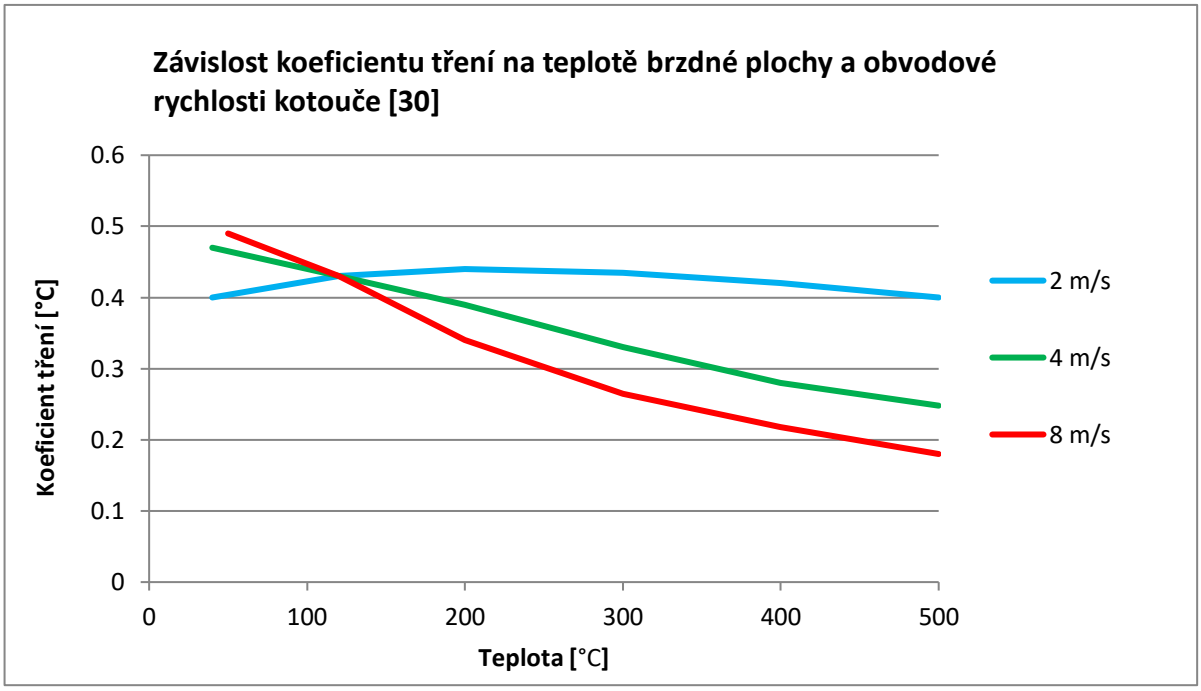
- *Optimální koeficient tření:* Přímo ovlivňuje velikost brzdného účinku. Pro správnou funkčnost kotoučových brzd by neměl koeficient tření nabývat příliš vysokých nebo také příliš nízkých hodnot. V prvním případě by mohlo dojít k příliš ostrému brzdnému účinku, kdy by se kotouč během momentu mohl doslova zablokovat. V opačném případě by byl brzdný účinek příliš slabý. Průměrný koeficient tření se u brzdných materiálů pohybuje v rozmezí 0,3 - 0,5.
- *Tepelná odolnost:* Vlivem vysokých teplot mohou vznikat mechanické deformace kotouče, materiál kotouče by tak měl být co nejlépe tepelně odolný.
- *Odolnost proti opotřebení:* Brzdný materiál by měl být dostatečně tvrdý, tak aby měl co nejdelší životnost. Tvrdost materiálu však způsobuje větší opotřebení protějšího brzdného komponentu (destička – kotouč).
- *Minimální rozdíly v brzdné účinnosti při suchém a mokrém prostředí:* Koeficient tření se při vlhkých podmínkách zmenšuje. Požadavkem kvalitní brzdné plochy je jeho rychlé zotavení během osychání.
- *Účinnost i při vysokých teplotách brzdových ploch:* Ta úzce souvisí s prvním bodem. Koeficient tření by neměl při vysokých teplotách příliš klesat, aby nedocházelo k tzv. vadnutí.
- *Nízká hmotnost:* V cyklistickém průmyslu jeden z nejdůležitějších faktorů, na který je i z marketingového důvodu třeba brát zřetel.
- *Tichý provoz:* Brždění by mělo mít co nejtišší průběh.

2.3 Faktory ovlivňující účinnost brždění

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, nejzásadnější vliv na velikosti brzdného účinku má koeficient tření a také odolnost proti opotřebení brzdné plochy. Nutno podotknout, že zmíněná data jsou zdrojována z výzkumů zkoumající kotoučové brzdy pro automobilový průmysl, kde je v tomto ohledu značně rozvinutější výzkum. Nicméně většina informací lze adaptovat i do problematiky kotoučových brzd jízdního kola.

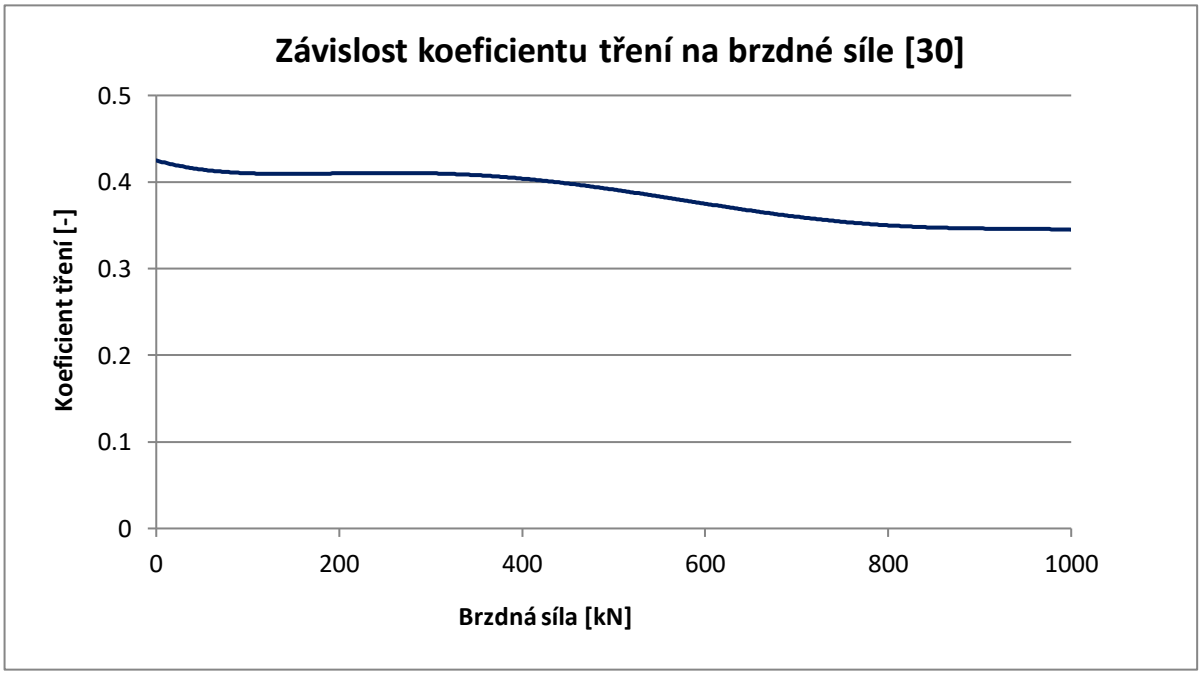
- **Závislost koeficientu tření na teplotě a ostatních veličinách** [30]

Při sběru dat (grafů) k závislosti koeficientu tření vůči teplotě brzdných ploch byly mezi jednotlivými publikacemi spatřeny nezanedbatelné odchylky. Ty mohly být způsobeny jednak rozdílnou strukturou brzdné plochy, ale také různými vstupními parametry měření. Jedním z těchto parametrů je obvodová třecí rychlost kotouče. Jak vyplývá z obr. 16, při větších rychlostech (4 a 8 m/s) má tato závislost sestupnou tendenci. Oproti tomu, při obvodové rychlosti 2 m/s je závislost při teplotách do cca 220°C mírně stoupající.



Obr. 16 Závislost koeficientu tření na teplotě brzdné plochy a obvodové rychlosti kotouče[30]

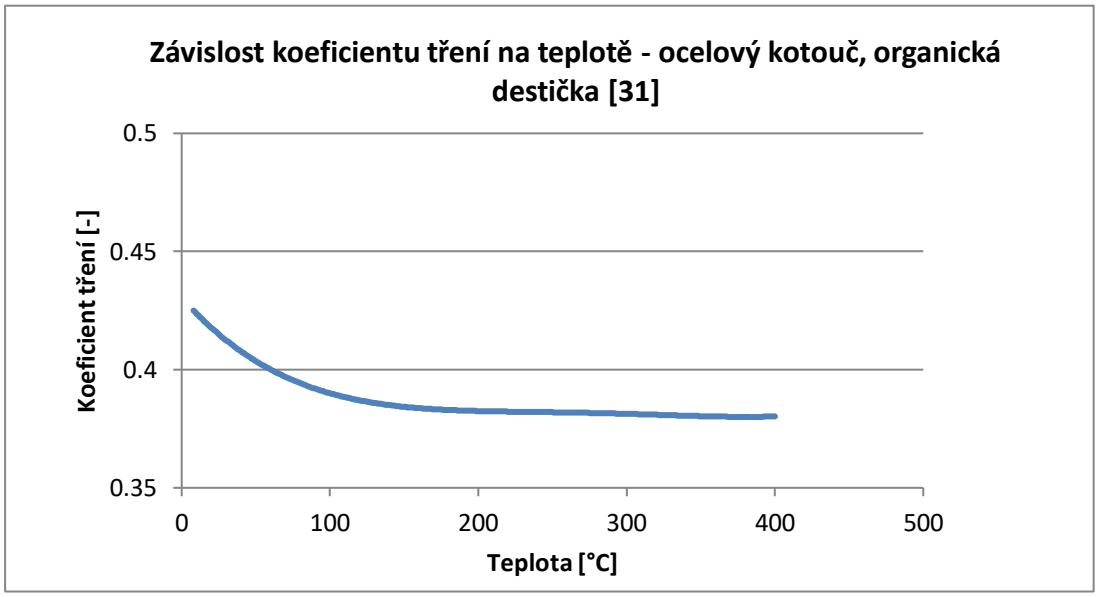
Dalším možným faktorem, ovlivňující koeficient tření je velikost brzdné (třecí) síly. Z obr. 17 je zřejmá mírná klesající tendence koeficientu tření při zvyšování brzdné síly.



Obr. 17 Závislost koeficientu tření na brzdné síle [30]

V rámci zpracování této práce bylo kontaktováno několik firem, zabývajících se výrobou kotoučových brzd pro jízdní kola (Shimano, Hayes a Tektro). Důvodem kontaktování byla prosba o poskytnutí některých dat ohledně problematiky kotoučových brzd, zejména pak závislost koeficientu tření na teplotě pro konkrétní materiály brzdových ploch kotouče a destiček jízdního kola. Konkrétní odpověď zaslala pouze společnost Tektro – potvrdila, že koeficient tření je úměrný teplotě povrchu brzdných ploch, nezaslala však žádný konkrétní graf závislosti koef. tření na teplotě, jelikož ten se prý pro každou kombinaci destiček a kotouče liší, což potvrzuje výše zmíněný text.

I přes tento fakt se vzhledem ke smyslu této práce jevilo jako vhodné zmínit alespoň obecnou charakteristiku pro brzdné materiály, podobné těm běžně používaným na jízdním kole. Nezbylo tak než se odkázat na obecné zdroje. Graf na obr. 18 zkoumá závislost koef. tření na teplotě pro kotouč z ocelové slitiny a destiček z organických materiálů. Jak plyne z výzkumu [31], koeficient tření s rostoucí teplotou do 100 °C znatelně klesá, poté není tento pokles příliš výrazný.



Obr. 18 Závislost koeficientu tření na teplotě - ocelový kotouč, organická destička [31]

- **Závislost opotřebení brzdných ploch na jejich teplotě** [32], [33]

Při zkoumání a porovnání více zdrojů, zabývající se problematikou závislostí opotřebení brzdných ploch na jejich teplotě lze obecně usoudit, že opotřebení s rostoucí teplotou roste také. Podobně jako u koeficientu tření závisí na konkrétních materiálech. Výzkum [32] srovnává tři různé druhy automobilových brzdových destiček se závěrem, že všechny zkoumané druhy dosahovaly s přibývající teplotou (zkoumaná oblast do 300°C) zvýšeného opotřebení. Nicméně u nejodolnějšího typu destičky nebyl zvyšující se charakter opotřebení na teplotě příliš výrazný. U zbylých dvou zkoumaných destiček byl vliv teploty na opotřebení značně výraznější. Podobnou charakteristiku vykazuje i zkoumaná brzdová destička v práci [33].

2.4 Vývoj ve světě kotoučových brzd [27], [34], [35], [36]

Problémy spojené s přehříváním vedou výrobce kotoučových brzd jízdních kol k různým optimalizačním změnám. Jak již bylo zmíněno, jedním z řešení je použití kotouče s větším průměrem, což je u sjezdových kol standartní volba.

Dalším možným řešením je použití dvojdílného kotouče. Brždění je realizováno klasicky na kotouči z korozivzdorné oceli, jenž je upevněn na duralovém unášeči, připevněném k náboji. Jelikož je unášeč z hliníkové slitiny, zajišťuje kotouči lepší odvod tepla a vzhledem k nižší hustotě materiálu také nižší hmotnost. Dodávají se většinou o průměrech v rozmezí 180 – 205 mm, což svědčí o využití zejména v disciplínách sjezdu nebo freeridu, kde je funkce lepšího odvodu tepla nezbytná. Uchycení v duralovém unašeči bývá realizováno oběma možnými způsoby, tedy buď systémem centrlock nebo pomocí šestice šroubů.

Obr. 19 Kotouč s duralovým unášečem [34]

S použitím třívrstvého kotouče s hliníkovým jádrem a ocelovými brzdnými plochami přišel produkt ICE Technologies firmy Shimano. Ten zahrnuje také brzdové destičky s hliníkovým žebrováním a klasickou brzdnou plochou. Oba produkty je možno použít s konvenčními destičkami, resp. kotoučem. Stejně jako u duralového unašeče zde hliníkové slitiny plní funkci lepšího odvodu tepla. Toto konstrukční řešení navíc vede k delší životnosti destiček, nižšímu hluku a také nižší hmotnosti.

Obr. 20 Struktura kotouče ICE Technologies [35]

S dalším zajímavým východiskem přišla firma Kettle Cycles, jejíž vývojáři vyvinuli karbonový kotouč s keramickou povrchovou vrstvou. Ta je na bázi karbidu křemíku a má zaručovat stabilnější brzdné vlastnosti, lepší tepelnou odolnost a také odolnost proti opotřebení. Brzdy vzešly na trh ke konci roku 2012 ve variantách jednodílného i dvojdílného kotouče v rozmezí průměrů od 140 do 180 mm. Dnes již nejsou komerčně nabízeny, oficiální stránka společnosti je nedostupná. To svědčí o pravděpodobném tržním neúspěchu tohoto produktu, čemuž nasvědčuje i řada recenzí dostupných na webu.

Obr. 21 Karbon-keramický kotouč SiCCC [36]

3 ŽÁROVÉ NÁSTŘIKY

3.1 Úvod do technologie a důvody použití [1],[2],[37]

Technologie žárových nástřiků představuje metodu poskytující funkčně efektivní povlaky v tloušťkách nanesených vrstev od 50 μm. Žárový nástřik lze charakterizovat jako ohřev natavených částic nanášeného materiálu na teploty blízké teplotě liquidu nebo nad teplotu liquidu za předpokladu, že povrch základního materiálu (povlakované součásti) nepřesáhne 120°C (některé zdroje zmiňují 150°C). Jedná se o vysoce kvalitní, flexibilní a ekonomickou technologii, využívající se v mnoha odvětvích průmyslu. Vlastnosti nanesené vrstvy umožňují součásti přizpůsobit se náročným provozním podmínkám, což zabezpečuje delší životnost a lepší spolehlivost dané součásti.

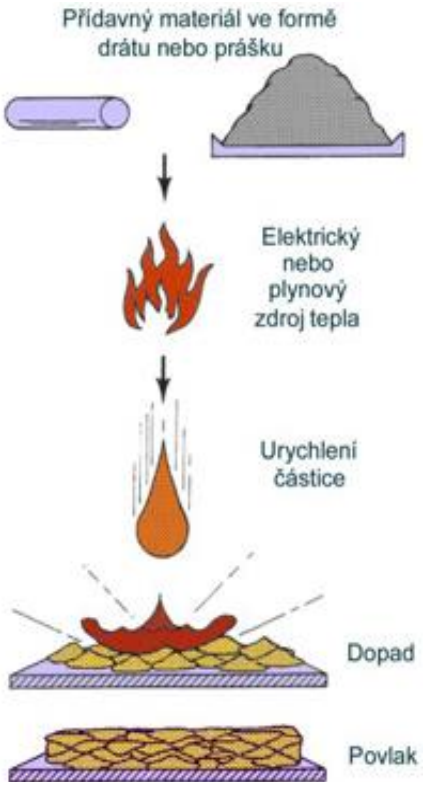
Jedná se o technologii, která nachází využití jak v případech prvovýroby, tak i v oblasti renovací součástí. V řadě odvětvích, zejména automobilovém, leteckém, chemickém nebo petrochemickém průmyslu či lékařství sehrává technologie žárových nástřiků nenahraditelnou roli. Důvod spočívá v řadě užitných vlastnostech:

- odolnost proti mechanickému opotřebení
- odolnost proti oxidaci, korozi a proti agresivnímu chemickému prostředí obecně
- odolnost proti extrémně vysokým teplotám
- skvělé tribologické vlastnosti (kluzné, samomazné, těsnící povlaky)
- doplnění chybějícího materiálu
- elektrovodivé a elektroizolační povlaky
- zdravotně nezávadné, biokompatibilní povlaky
- speciální fyzikální vlastnosti (supravodivost, odolnost proti záření, optika aj.)

3.2 Princip vytváření žárových nástřiků [1], [2], [39]

Princip žárových nástřiků spočívá v nanášení nataveného přídavného materiálu na součást. Přídavný materiál se používá buď ve formě prášku nebo drátu. Celý proces se dá rozdělit na několik fází. Nejprve přídavný materiál vstupuje do zdroje energie, kde dochází k formování částic z původní formy přídavného materiálu. Po natavení následuje fáze průletu na připravenou podložku, kde po dopadu dochází k ochlazování naneseného povlaku a mikrooblastí podložky přiléhajících bezprostředně k povlaku. Nejvlivnějšími parametry, určující zda je k dispozici dostatek energie a času pro natavení přídavného materiálu jsou rychlost a teplota plamene.

Zdrojem tepelné energie je buď spalovací proces nebo elektrická energie. Na základě konstrukce zařízení a použitého zdroje energie lze rozlišit základní typy žárových nástřiků. Nejčastěji se používá buď kyslíko - acetylenový plamen nebo elektrický oblouk. Pro materiály s vysokou teplotou tání, zpravidla keramiky se používá plazmových technologií, které dosahují nejvyšších pracovních teplot, dosahujících teplot tavení keramických materiálů.

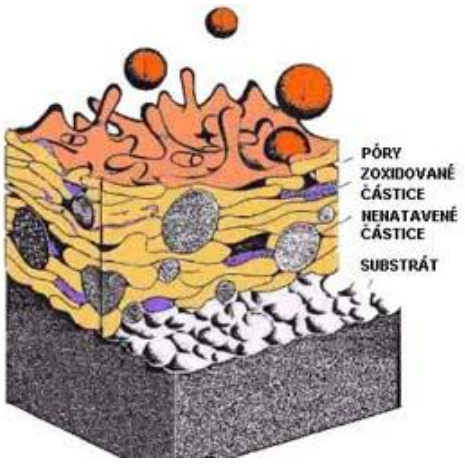


Obr. 22 Princip žárového nástřiku [2]

3.3 Struktura žárového nástřiku [2], [4], [37]

Povlak má **lamelární strukturu**, která je tvořená jednotlivými deformovanými částicemi (tzv. splat), póry, nenatavenými či pouze částečně natavenými částicemi a oxidickými částicemi.

Většinu povlaku tvoří splat, která má v ideálním případě tvar disku. Vlivem rychlého ochlazování po dopadu na součást může docházet ke krystalizaci velmi jemných zrn. Vysoká rychlost ochlazování zabraňuje také segregaci rovnovážných fází. Struktura povlaku je velice homogenní, vyjma oxidů, které se tvoří na povrchu částice během letu od natavení na povlakovanou součást.



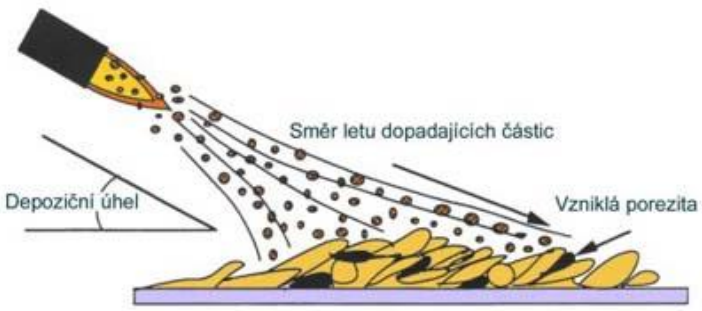
Obr. 23 Schéma struktury žárového nástřiku [2]

Oxidické vměstky v kovových povlacích jsou svým vzhledem charakterizované jako podlouhlé, tmavé útvary. K oxidaci natavených částic dochází buď vlivem vysoké teploty na povrchu vrstvy nebo vzájemným působením letící roztavené částice s okolní atmosférou. Výskyt oxidických vměstků ve struktuře zvyšuje tvrdost povlaku, pochopitelně však také vyšší křehkost. Množství oxidů ve struktuře je jedním z parametrů charakterizující kvalitu povlaku, jelikož velká koncentrace oxidů na jednom místě může vést ke snížení kohézní pevnosti.

Další důležitá vlastnost, která má na kvalitu povlaku vliv je **porezita** (pórovitost**)**. Ta je vnímána jako nežádoucí, jelikož vysoký obsah pórů ve struktuře je spojován s nízkou kohezí povlaku a také vysokým počtem nenatavených či špatně natavených částic, což může způsobovat defekty jako odlupování nebo praskání povlaku. Větší míra porezity dále může způsobovat vznik koroze, oxidaci základního materiálu, různé povrchové nehomogenity, neumožňuje dosažení zrcadlově lesklého povrchu, požadujícího např. u ložiskových uložení.

Příčin vzniklé porezity může být mnoho. Mezi ty nejzásadnější patří druh přídavného materiálu, smršťování během tuhnutí či malá smáčivost povrchu substrátu nebo splatů. V některých případech se však vyšší porezita vyžaduje. Např. u povlaků tepelných bariér, pro filtrační účely nebo při nástřiku samomazných výstelek ložisek, kdy jsou parametry procesu voleny záměrně tak, aby se míra porezivity pohybovala v intervalu od 10 do 30 %. Při chodu zařízení je do pórů infiltrován lubrikant.

Míru porezity je tak třeba podle potřebnosti řídit a kontrolovat. Eliminovat jej lze např. ovlivněním míry protavení částic, jelikož čím jsou kapky roztaveného nanášeného materiálu tekutější, tím hustší je struktura povlaku. Další faktor, ovlivňující porezitu povlaku je rychlost jednotlivých částic. S rostoucí rychlostí klesá porezita. Vliv na porezitu může mít i úhel dopadu částic na součást. Při nástřiku pod příliš ostrým úhlem může docházet k tzv. stínění, které vede k lokálnímu zvýšení porezity.



Obr. 24 Vznik porezity při nástřiku pod ostrým úhlem [2]

3.4 Vlastnosti žárových nástřiků [1], [2]

Vlastnosti povlaku žárových nástřiků mohou být buď obecného nebo také specifického charakteru, jenž jsou dány zejména použitou metodou nebo materiálem.

Mezi typicky obecné vlastnosti, které se u žárových nástřiků monitorují jsou např.:

- Pevnost povlaku
- Adheze povlaku k substrátu
- Tvrdost
- Tepelné vlastnosti
- Odolnost proti korozi
- Elektrické vlastnosti
- Magneto-optické vlastnosti
- Obrobitelnost
- Pórovitost

Jako speciální vlastnosti povlaku lze uvést např.:

- Odolnost proti propustnosti plynů
- Odolnost proti erozi
- Odolnost proti náhlým teplotním změnám
- Součinitel měrné tepelné roztažnosti
- Odolnost proti korozi

3.5 Technologie žárových nástřiků [1], [2]

Pro požadovanou kvalitu a vlastnosti naneseného povlaku je nutno dodržet určitý postup a zásady, které je značně ovlivňují. Technologické postupy se pro jednotlivé technologie žárových nástřiků v mnoha bodech liší. Zde je stručně popsán obecný postup pro všechny metody, konkrétní postup pro zadaný experiment je obsažen v kapitole 4, v praktické části.

Technologický postup lze rozdělit do několika částí: příprava součásti před nástřikem, samotný nástřik včetně optimalizace parametrů nástřiku a úpravy součásti po nástřiku.

- **Příprava součásti před nástřikem** [1], [2],[37]

Nejprve je potřeba provést vstupní kontrolu součásti. Je nutno zkontrolovat případné praskliny, trhliny, zbytky povrchových úprav, geometrické odchylky (ovalita, kuželovitost), odchylky součásti vůči kótám na výkrese atd.

Povrch povlakované součásti je nutno dokonale odmastit a zbavit jej veškerých nečistot, včetně rzi. Plochy přímo sousedící se stříkanou je nutno zakrytovat. Používají se plechy, silikonová guma, speciální pasty aj. Krytování nesmí zasahovat do stříkané plochy.

Z důvodu dalšího zbavení nečistot, zlepšení drsnosti a pevnosti povrchu se používá tryskání. Používá se více druhů tryskacího média - záleží na materiálu podložky, velikosti, tvaru základního materiálu a typu přídavného materiálu. Po tryskání je nutno zkontrolovat, zda nebylo porušeno krytování. Upnutí musí být realizováno tak, aby se součást nepovolila a nedošlo k mechanickému poškození. Používá se vhodných přípravků, které mohou být leckdy jednoúčelové.

- **Nástřik součásti a optimalizace technologických parametrů [1], [2]**

Je nutné nastavit optimální parametry, které jsou rozdílné pro každou technologii nástřiku. Společné je však to, že parametry musí byt voleny tak, aby došlo k optimálním požadavkům nástřiku, tzn. dostatečnému natavení přídavného materiálu, zamezení nežádoucímu tepelnému ovlivnění a deformaci povlakované součásti.

Dále je nutno zkontrolovat stav stříkacího zařízení, včetně kontroly trysek, spalovací komory nebo injektorů prášku. Připravit se musí také přídavný materiál. Použije-li se drát, musí se před nasazením řádně očistit a zbavit rzi, zbytku maziva po tažení a jiných mastnost. Důležité je také jeho vyrovnání a zkontrolování celkového stavu. Práškové přídavné materiály musí byt precizně vytřízeny.

Samotnému nástřiku, je-li to požadováno, předchází předehřev součásti. V průběhu nástřiku je potřeba kontrolovat teplotu povlakované součásti, která by neměla přesáhnout 150°C (pokud není předepsáno jinak). Další kontrola by se měla zabývat průběžnými rozměry naneseného povlaku (v případě nemožnosti měření přímo na součásti, použití etalonu k porovnání). Konečná kontrola musí být prováděna za pokojové teploty.

- **Úprava součásti po nástřiku** [38], [1]

Po vytvoření samotného nástřiku je třeba provést některé úkony, které jsou pro tuto technologii nezbytné. V první řadě je potřeba odstranit veškeré krytování a nežádoucí přestřiky. Dále je nutno zkontrolovat povrch nástřiku, konkrétně jeho celistvost, případné vady v podobě prasklin, deadheze apod.

Povlakované součásti je v některých případech kvůli daným vlastnostem (přesnost rozměrů, nízká drsnost) ještě potřeba obrábět. V tom případě musí být nanesený povlak navýšen o přídavky na obrábění. Jako nejčastější technologie pro obrábění povlaků žárových nástřiků se používá soustružení a broušení. Soustružit lze pouze povlaky s dobrými plastickými vlastnostmi a nízkou tvrdostí, vhodnými materiály jsou např. $CuSn_6$, CuAl, nicméně ověřují se i možnosti obrábění jiných, např. keramických materiálů. Při soustružení je nutno použít vysokou řeznou rychlost a malý posuv.

Při broušení je stejně jako u soustružení z důvodu rizika vytrhávání částic nástřiku potřeba nastavit optimální řezné podmínky. Velice důležité je použití intenzivního chlazení, jelikož jeho nepoužití může vést ke vzniku sítě povrchových trhlin.

3.6 Metody žárových nástřiků [1], [2], [39]

Srovnání hlavních metod žárových nástřiků přináší tab. 2. Nejstarší metodou je nástřik **plamenem**, její výhody jsou zejména jednoduchost a ekonomičnost. Avšak vzhledem k nízké dopadové rychlosti částic a nízké teploty plamene se jedná o nástřiky nižší kvality.

Pro aplikace nástřiků **elektrickým obloukem** je v případě přídavného materiálu nutno použít dva elektricky vodivé dráty. Kvalita povlaku je závislá na stabilitě elektrického oblouku. Výhodou metody je dobrá mobilita.
Metoda **HVOF** je obdobou klasické metody detonačního nástřiku, kdy jsou plyny stlačovány ve spalovací komoře, s tím rozdílem, že plnění spalovací komory a hoření plynů probíhá kontinuálně. Vzhledem k vysoké rychlosti natavených částic se jedná o kvalitní povlaky s vysokou přilnavostí. Pro nástřik keramiky je však limitována nízkou teplotou plamene. Pro tento požadavek se využívá metoda nástřiku **plazmou**, která je podrobněji popsána v kapitole 3.7.

Obr. 25 Rozdělení technologie žárového nástřiku [2]

Tab. 2 Srovnání metod žárových nástřiků [2]

Metoda	HVOF	Plasma	El. oblouk	Plamen
Forma materiálu	prášek	prášek	drát	prášek, drát
Teplota plamene	3000	5000 ÷ 25000	3000 ÷ 6000	2700 ÷ 3000
Rychlost částic	400 ÷ 800	80 ÷ 300	50 ÷ 150	80 ÷ 100
Typické materiály	kovy, slitiny, cermety	keramika	kovy, slitiny, cermety	kovy, slitiny, plasty
Vlastnosti povlaku	velká hustota, výborná adheze	v případě keramiky porézní	vysoká hustota, větší tloušťka	vyšší porezita a obsah oxidů
Vhodné aplikace	ochrana proti opotřebení, korozi	tepelné bariéry, izolátory	otěruvzdorné povlaky, renovace	méně náročné aplikace

3.7 Plazmatický nástřik

- **Charakteristika plazmatického plamene** [37]

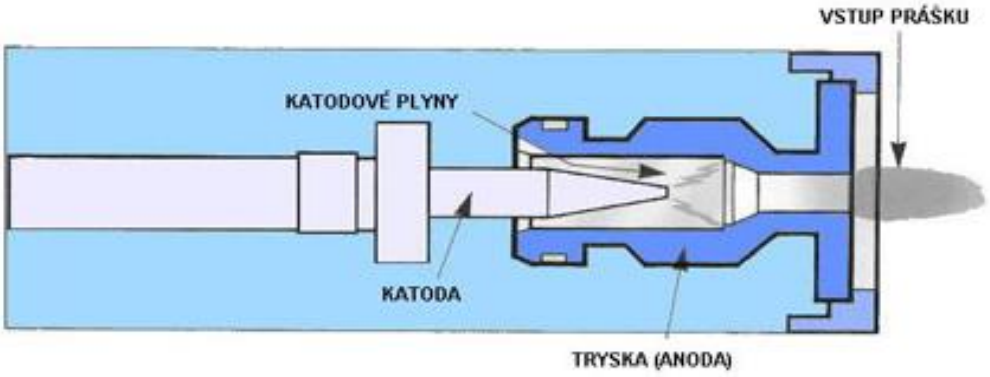
Plazmou se nazývá vysokoionizovaný stav hmoty, složený z molekul, atomů, elektronů a fotonů. Vlastnosti plynu primárně závisí na pohybu jeho jednotlivých molekul, při kterém dochází ke srážkám jejich elementárních částic. V tomto důsledku si molekuly vzájemně vyměňují energii a hybnost. Rychlost tohoto pohybu závisí na množství přivedené energie plynu. Čím je rychlost vyšší, tím častější jsou také vzájemné srážky částic. Rychlost částic může mít takovou hodnotu, při které se molekuly rozpadají na atomy. Důsledkem tohoto energetického pochodu je zvyšování teploty ovlivněného plynu. Tento proces se nazývá **disociace**.

Při dodání další energie může rychlost dosáhnout takových hodnot, že nedochází pouze k rozpadu molekuly, ale také k vyřazení elektronů z jejich elektronového obalu. Pro uskutečnění tohoto procesu je potřeba vyšší energie než pro disociaci. Označuje se jako energie ionizační a celý proces, jenž se stejně jako disociace odehrává v plazmovém oblouku, nazýváme **ionizací.** V tomto stádiu lze rozlišovat dvě částice – první je ionizovaný atom (bez jednoho elektronu), druhou je volný elektron. Ten má tendenci nejrychlejším způsobem dosáhnout stav nejnižší energie, proto se vrátí na původní dráhu, kde dosáhne původní energetický stav. Vzniklá energie se odevzdá ve formě kinetické energie nebo elektromagnetického záření. Konečný důsledek procesu disociace a ionizace je plazma jako stav hmoty, který obsahuje elektricky nabité vodivé částice.

- **Popis metody** [1], [2], [3], [37]

Metoda plazmatického nástřiku je výsledkem zdokonalené plamenové metalizace, požadující vysoké teploty plamene, kterých ostatní metody nedosahují. Princip spočívá v hoření elektrického oblouku mezi wolframovou vodou chlazenou katodou a válcovou měděnou anodou, která tvoří zároveň trysku plazmového hořáku. Plazmový oblouk je stabilizován buď pomocí plynu (obvykle argon, vodík či jiný inertní plyn) či pomocí kapaliny

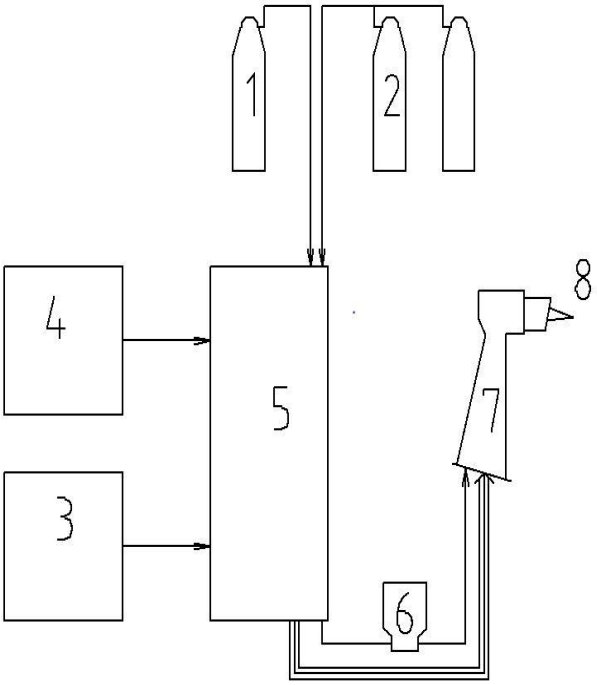
(voda). Obě metody mají své opodstatnění, avšak plynová stabilizace má značně širší zastoupení. Jako přídavný materiál se používá většinou ve formě prášků.



Obr. 26 Schéma zařízení pro plazmatický nástřik [2]

Teplota plazmového plamene závisí především na stupni ionizace, kterou ovlivňuje druh plazmového plynu a pracovní parametry plazmového hořáku. Interval teploty plazmy se pohybuje v rozmezí 5000 až 30000 K. To umožňuje použití pro všechny druhy materiálů žárových nástřiků, včetně keramiky. Takto vysoké teploty však způsobují i různé nevýhody, jelikož mohou vést ke změně fázového složení, oxidaci nebo vyhořívání některých prvků nanášeného materiálu v průběhu nástřiku.

Výhodou použití prášku jako přídavného materiálu oproti drátu spočívá zejména v širším výběru volby, jelikož některé materiály nelze vyrobit ve formě drátu (např. karbidy, oxidy nebo vysokotavitelné materiály). Vhodný prášek má mít dobré sypké vlastnosti, má se lehko vznášet v plazmovém plameni, částice prášku mají mít nejlépe sférický tvar. Konstrukce zařízení pro nanášení plazmatického nástřiku se dle použité elektrody, způsobu chlazení či materiálům zařízení mohou lišit. To umožňuje dosažení různých rozsahů průtoků plynů, množství vnesené energie či použití různých druhů prášků přídavných materiálů.



Obr. 27 Schéma principu žárového nástřiku plazmou [1]
1,2 – tlakové láhve s plazmovými plyny, 3,4 – zdroj elektrického proudu (usměrňovač), 5 – ovládací a regulační jednotka, 6 – podávací zařízení přídavného materiálu, 7 – plazmový hořák, 8 – plazmový paprsek

Rozlišují se tři základní typy plazmatického nástřiku:

- Atmosferický plazmatický nástřik (APS)
- Vakuový plazmatický nástřik (VPS)
- Nástřik pomocí radiofrekvenčního plazmatu (RF plazma)

Při APS nástřiku se mísí inertní plazmový plyn s plyny v atmosféře. Ty mohou s letícími natavenými částicemi reagovat a vytvářet oxidické či jiné vměstky ve struktuře povlaku. Pro dosažení extrémně vysoké hustoty, čistoty a přilnavosti povlaku se využívá metoda VPS, která probíhá v uzavřené komoře za sníženého tlaku. Od konvenční metody se liší zejména některými konstrukčními prvky jako dálkové ovládání pistole, chlazení nástřikové komory nebo vakuový systém. Při porovnání s APS metodou se dosahuje vyšší hustoty povlaku, širšího a delšího proudu plazmatu, povlaku bez oxidických vměstků nebo možnosti nanášet větší tloušťky. K vysoké hustotě povlaku a bezoxidické struktury dochází rovněž u RF metody.

Tab. 3 Srovnání metod žárového nástřiku[2]

	APS	VPS	RF
Hustota	90-95	90-99	95-99
Adheze	<68 MPa	>68 MPa	>68 MPa
Obsah oxidů	střední	žádný	žádný

3.7.3 Použití plazmatického nástřiku [37], [40]

Plazmové nástřiky mají v průmyslu široký rozsah využití. Odolnost proti vysoké teplotě, kavitaci, korozi nebo opotřebení jsou toho důvodem. Funkci tepelných bariér tvoří zejména v automobilovém průmyslu a energetice - jako povlaky turbín, výfuků či tepelně namáhaných součástí motoru. Užití nacházejí také v chemickém průmyslu, pro součásti pracující v korozním prostředí. Ve válcovnách a lisovnách se mohou využívat jako otěruvzdorné vrstvy pro renovaci různých velkorozměrných součástek těžkých strojů, u kterých by byla výměna za nové ekonomicky velice nevýhodná. V elektrotechnice se používají zejména jako elektricky vodivé vrstvy Cu, Al, W, polovodičové a elektroizolační (keramické) vrstvy. Nezastupitelnou úlohu plní také jako biokompatibilní materiály užívané v lékařství.

Obr. 28 Nástřik povlaku kyčelní jamky [40]

Obr. 29 Nástřik výfuku Audi TT [41]

4 PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 Volba materiálu

- **Keramické materiály** [1], [42]

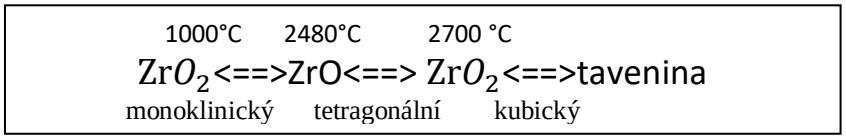
Hlavní požadavky brzdné plochy již byly zmíněny v kapitole 2.2. Mezi ty nejprioritnější patří mechanická odolnost a stálá účinnost brždení za vysokých teplot. Zadáním práce bylo použití některého z keramických materiálů, které se vyznačují zejména vysokou tepelnou odolností. Jako technologie nanesení povlaku bylo zvoleno žárového nástřiku. Žádná jiná technologie, jako např. smaltování či lepení by se pro tuto aplikaci nehodila. Vzhledem k vysokým teplotám tavení keramických částic pak nástřik pomocí plazmy.

Keramické povlaky se dají rozdělit na oxidické a neoxidické. Jako nejrozšířenější přídavné materiály na bázi oxidické keramiky se používají Al_2O_3, Cr_2O_3, ZrO_2 a $ZrSiO_4$. Zcela ojediněle se tyto materiály používají ve formě jediné čisté složky, např. Al_2O_3. Ve většině případů se keramické oxidické materiály používají spolu s tzv. stabilizátory jako TiO_2, MnO, CaO, MgO a jiné, které stabilizují jistou fázi těchto materiálů a zajišťují nanesenému povlaku požadované vlastnosti.

Neoxidické materiály tvoří zejména karbidy, boridy, nitridy a další. Typickými příklady těchto materiálů jsou např. WC, TiC nebo SiC. Samostatně se karbidy z důvodů nedostatečné přilnavosti nepoužívají. Využívají se však ve spojení s kovem jako tzv. cermety, např. velmi rozšířený cermet je WC + Co.

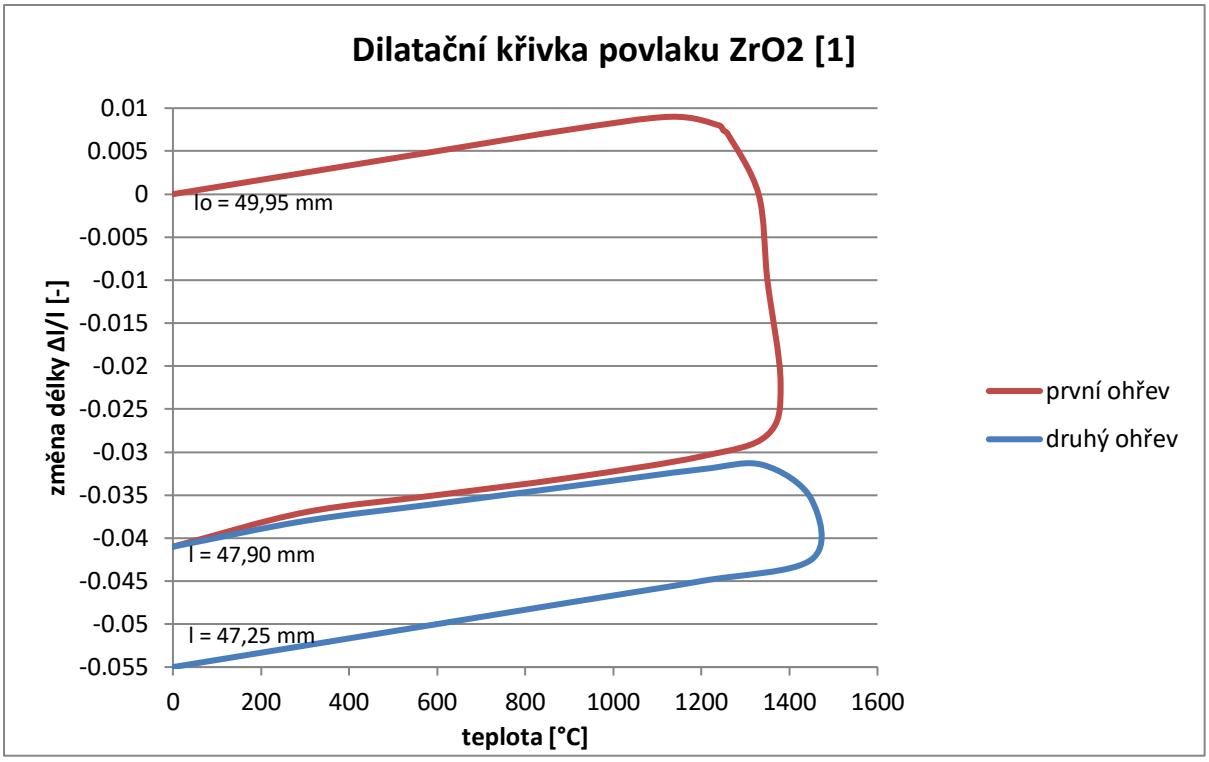
- **Vlastnosti zvoleného materiálu** [1],[3],[37]

Jako vnější materiál povlaku pro brzdnou plochu kotouče byl zvolen ZrO_2se stabilizátorem v podobě Y_2O_3. Důvodem zvolení byly jeho užitné vlastnosti jako odolnost proti tepelným šokům, odolnost proti opotřebení nebo odolnost proti povrchové oxidaci. Čistý ZrO_2 se u žárových nástřiků v praxi nevyužívá. Důvodem jsou fázové transformace, ke kterým dochází při ohřevu na teplotu tavení. To popisuje schéma:



Velice důležitá je zde fázová transformace z monoklinického na tetragonální, která způsobuje zmenšení objemu v průměru o 3%. To by zapříčiňovalo vznik tahových napětí, což velmi často vede k destrukci, fragmentaci až oddělení nanesené vrstvy od základního materiálu. Z toho důvodu je nutné použití stabilizátoru, který společně se ZrO_2 tvoří až do teploty tavení stabilní kubickou fázi. Jak již bylo zmíněno, v našem případě byl jako stabilizátor zvolen Y_2O_3, který dává nejlepší výsledky při 8-10 hm. %.

Toto chování dobře znázorňuje graf na obr. 30, zkoumající dilatační chování ZrO_2. Svislá osa grafu představuje poměr změny délky povlaku, vzniklou během ohřevu a následného ochlazování, vůči původní délce před tímto procesem. Vodorovná osa značí teplotu povlaku. Experiment byl vytvářen za podmínek ohřevu rychlostí 5°C/min na max. teplotu, kde zůstal 15 min na výdrži a poté ochlazování rychlostí rovněž 5°C/min. Lze vyčíst, že do teploty cca 1100 °C se povlak ZrO_2 jeví jako objemově stabilní, poté dochází k fázové přeměně, doprovázené výraznou kontrakcí. Při následujícím, druhém ohřevu nedocházelo do teploty cca 1300 °C k žádným objemovým změnám a poté už nebyla kontrakce tak výrazná.



Obr. 30 Dilatační křivka povlaku ZrO_2 [1]

Důležitým aspektem při volbě materiálu ZrO_2 je měrná tepelná vodivost. Ta závisí na řadě faktorů. Mezi ty základní patří zejména pórovitost nástřiku (množství pórů, jejich velikost a distribuce), médium obsažené v pórech nebo také velikost pracovní teploty. Změnou množství pórovitosti lze tepelnou vodivost regulovat v poměrně širokých mezích. Obecně vzato se dá říci, že zvětšení pórovitosti nástřiku snižuje jeho součinitel měrné tepelné vodivosti. V případě ZrO_2 je tento součinitel v porovnání s ostatními keramickými materiály velice nízký (víz tab. 4).

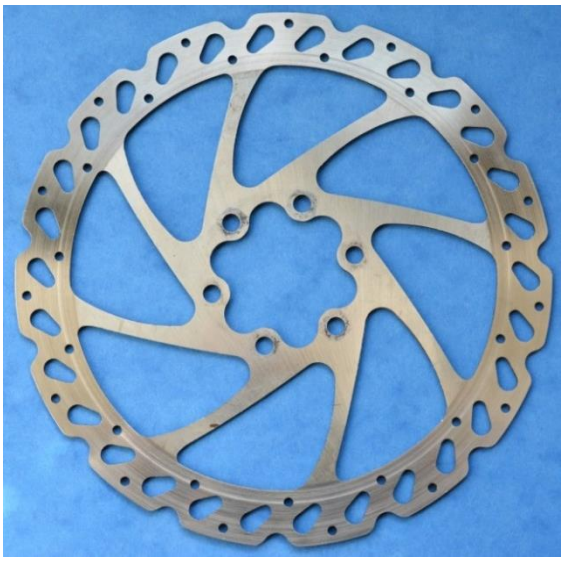
Tab. 4 Porovnání měrné tepelné vodivosti pro různé materiály[1]

Typ materiálu povlaku	Měrná tepelná vodivost pro homogenní mat. povlaku $[W.\ m^{-1}.K^{-1}]$
Al_2O_3	22,44
Al_2O_3+ 1% Cr_2O_3	22,44
ZrO_2	1,96
Cr_2O_3	8,6
$ZrSiO_4$	5,69

Tloušťka vrstvy povlaku na brzdovém kotouči byla zvolena 0,085 mm. Vzhledem k optimálnímu seřízení brzdy, kdy je brzdný systém konstruován pro konvenční tloušťku kotouče (v případě experimentu 1,8 mm) bylo nutno zvolit tloušťku vrstvy povlaku v takřka nejmenší možné mezi. Obecně platí, že zvyšování provozních teplot je úzce spojeno se zvyšováním tloušťky keramického povlaku. Vzhledem k relativně nízkým provozním teplotám brzdového kotouče (cca 300 – 400 °C) však tato skutečnost nehraje velkou roli. Zvyšování tloušťky keramické vrstvy ZrO_2- Y_2O_3 pak také vede k vyšším zbytkovým napětím a poklesu adhezi vrstvy. Jako vazná mezivrstva byl zvolen materiál s 95% Ni a 5 % Al.

4.2 Popis brzdového kotouče pro experiment

Pro experiment byl použit brzdový kotouč Tektro o průměru 160 mm a původní tloušťce 1,78 mm. Materiálem kotouče je korozivzdorná ocel. Jedná se o již dříve využívaný kotouč, původně osazen na sériovém kole, který však ideálně posloužil k daným účelům, jelikož nebyl nijak výrazně mechanicky poškozen (zejména ve smyslu pokřivení). Jak lze vidět z obr. 31, upnutí k náboji je realizováno pomocí šesti šroubů. Kotouč je svým tvarem uzpůsoben redukci hmotnosti a také dobré ventilaci (víz kapitola 2.1).



Obr. 31 Brzdový kotouč Tektro

4.3 Technologický postup a vliv procesních parametrů [1], [2], [37], [44]

1. *Rozměrová kontrola*

Nejprve byla ověřena původní tloušťka kotouče. Vzhledem k tomu, že se jednalo o již použitý kotouč, bylo nutno ji změřit v místech, kde při brždění nedocházelo ke styku s destičkou. Naměřená hodnota dosahovala 1,78 mm. Poté byla změřena tloušťka opotřebované části v místech ve styku s destičkou, kde byla naměřena hodnota 1,63 mm.

2. *Odmašťování*

Pro dobrou adhezi nanášeného povlaku je důležité kvalitní odmaštění povrchu součásti. Jako odmašťovací prvek byl použit ISO Propanol.

3. *Tryskání*

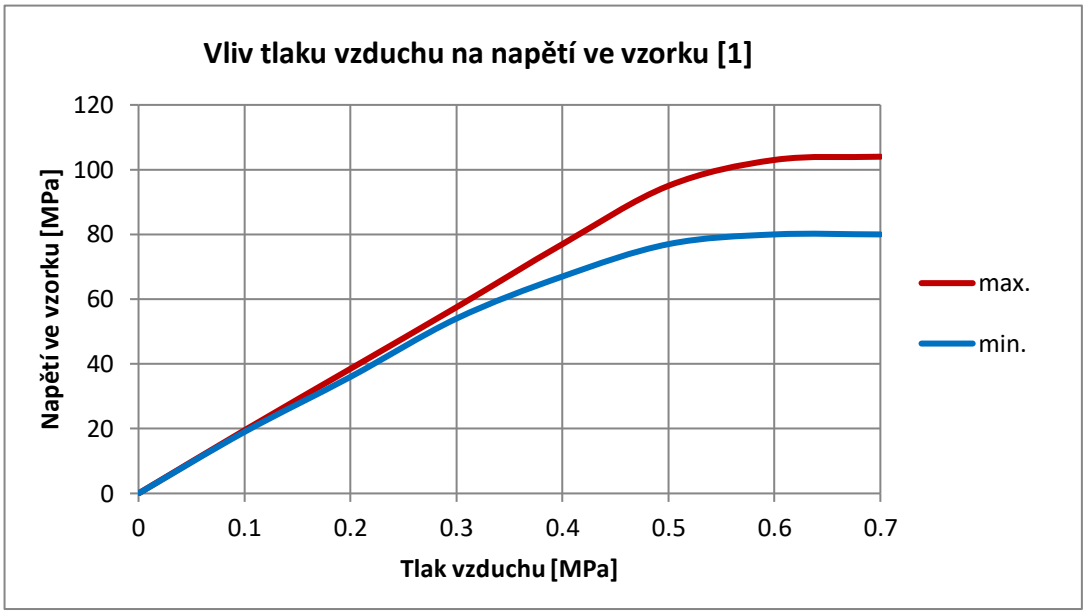
Dosažení drsného povrchu, větší plochy podložky, dochází k odstranění oxidů a korozních zplodin, povrch se přivede do stavu chemické nerovnováhy s okolním prostředím. Povrch se chemicky aktivuje v důsledku meziatomárních vazeb povrchových atomů a reaguje s okolním prostředím. V důsledku toho, že tato aktivace má omezenou životnost, je nutné nástřik provést v krátké době po tryskání. Tryskáním se výrazně deformačně zpevňuje povrch kovových substrátů. Vliv napětí ve vzorku je závislý na více faktorech.

Přípravu ocelových povrchů před nanesením nátěrových hmot a obdobných výrobků hodnotí norma ČSN EN ISO 8501-1. Povrch kotouče bylo nutno tryskat na nejvyšší stupeň SA3, což norma hodnotí jako tryskání až na vizuálně čistý povrch. Ten se vyznačuje nulovou viditelností olejů, mastnoty, okují, rzí apod. Stupeň SA3 se vztahuje na aplikaci žárových nástřiků obecně. Jednotlivé parametry tryskání shrnuje tab. 5.

Tab. 5 Zvolené parametry tryskání

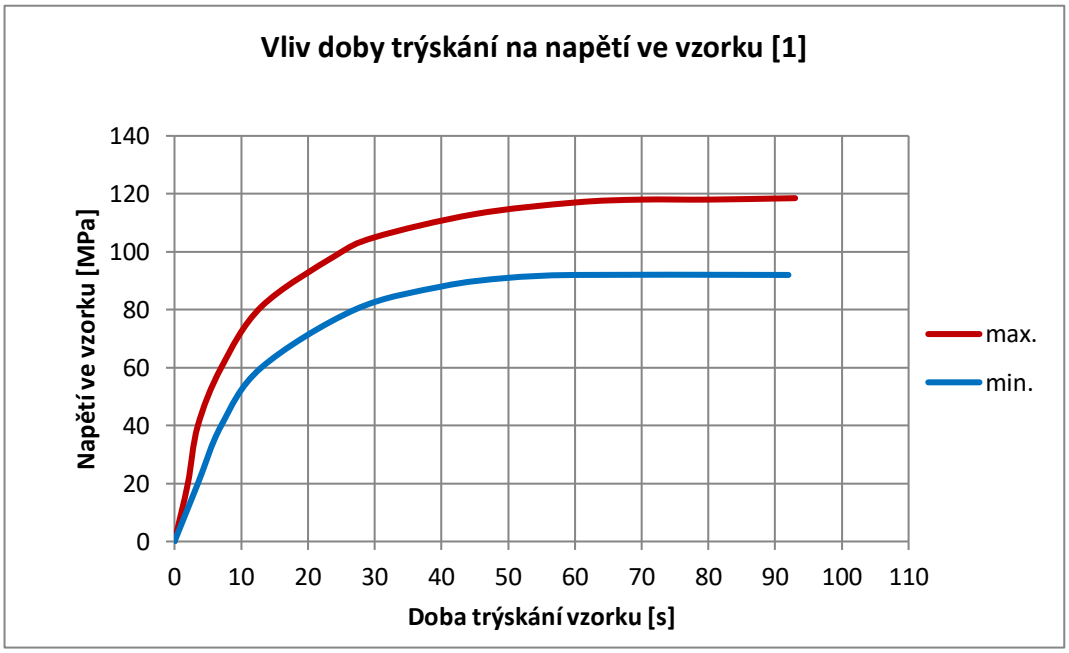
Tryskací parametry	
zrnitost [-]	22
Tlak[MPa]	0,6
doba tryskání[s]	30
vzdálenost tryskání[mm]	200

Níže zmíněné závislosti plynou z výzkumu [1], kdy byla pomocí tenzometru zkoumána hodnota napětí ve vzorku při různých vlivech, které napětí ve vzorku nejvíce ovlivňují. Grafy zobrazují oblasti s minimálním a maximálním naměřeným napětím. Graf na obr. 32 řeší závislost napětí ve vzorku na tlaku vzduchu při tryskání. Ze závislosti plyne, že stoupající tlak vzduchu při tryskání se projevuje vzrůstem napětí v podložce, a to až do tlaku vzduchu 0,6 MPa. Další zvýšení tlaku už se nejeví jako účelné. Z tohoto důvodu bylo užito tlaku 0,6 MPa i v rámci experimentu této práce.



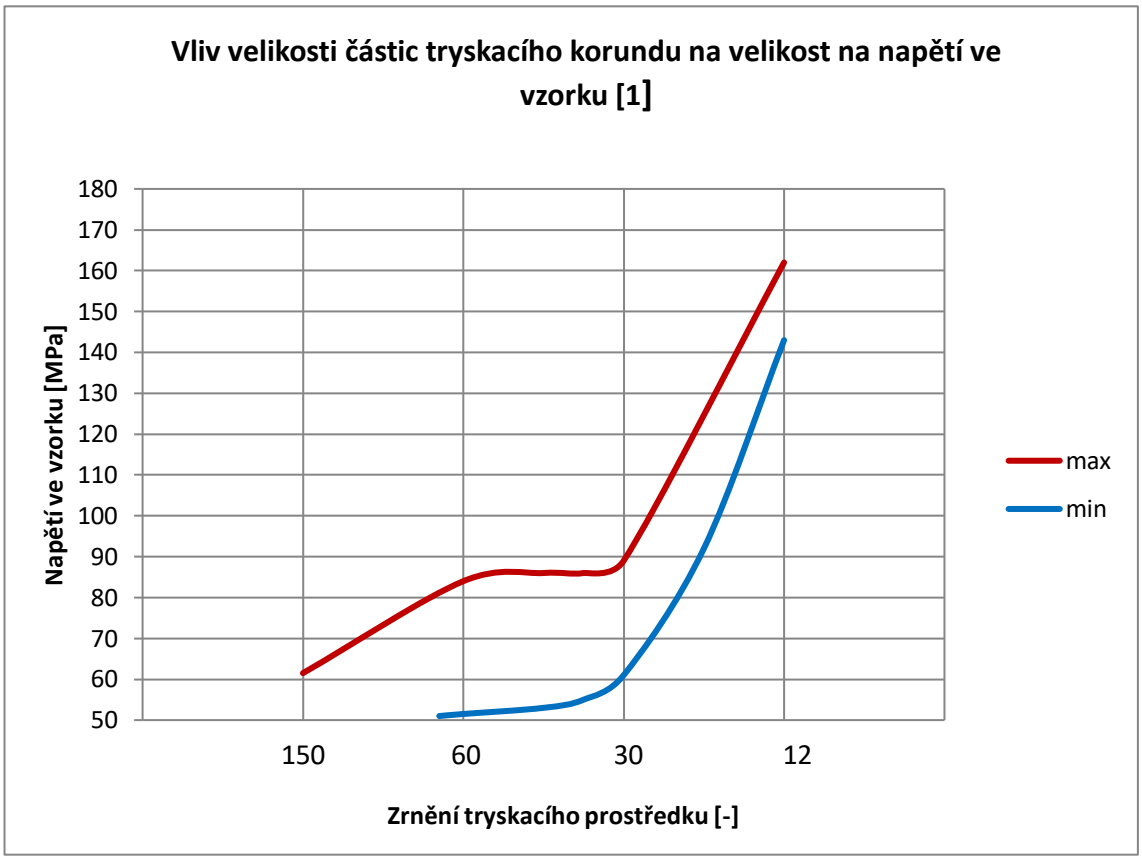
Obr. 32 Graf vlivu tlaku vzduchu na napětí ve vzorku [1]

Z grafu na obr. 33 je zřejmá závislost doby účinného tryskání – to platí do cca 50 sekund, pak už se velikost napětí ve vzorku nezvětšuje. V případě našeho experimentu byla doba tryskání 30 sekund. To podle grafu na obr. 33 sice není hodnota, při které by se dosahovalo největšího napětí, nicméně s přibývající dobou až do zmíněných 50 sekund už napětí příliš nestoupá.



Obr. 33 Graf vlivu doby tryskání na napětí ve vzorku [1]

S rostoucí velikostí částic tryskacího média (klesající zrnění) roste i vnesené napětí ve vzorku. To potvrzuje i graf na obr. 34, důležité je však počítat s tím, že zároveň roste také nerovnoměrnost rozložení vneseného napětí a také drsnost podložky. Pro konkrétní experiment bakalářské práce bylo použito tryskacího média o velikosti zrnění 22.

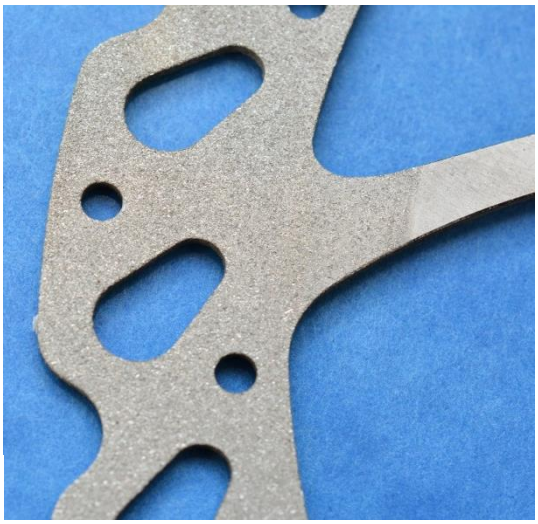


Obr. 34 Graf vlivu zrnění tryskacího média na napětí ve vzorku [1]

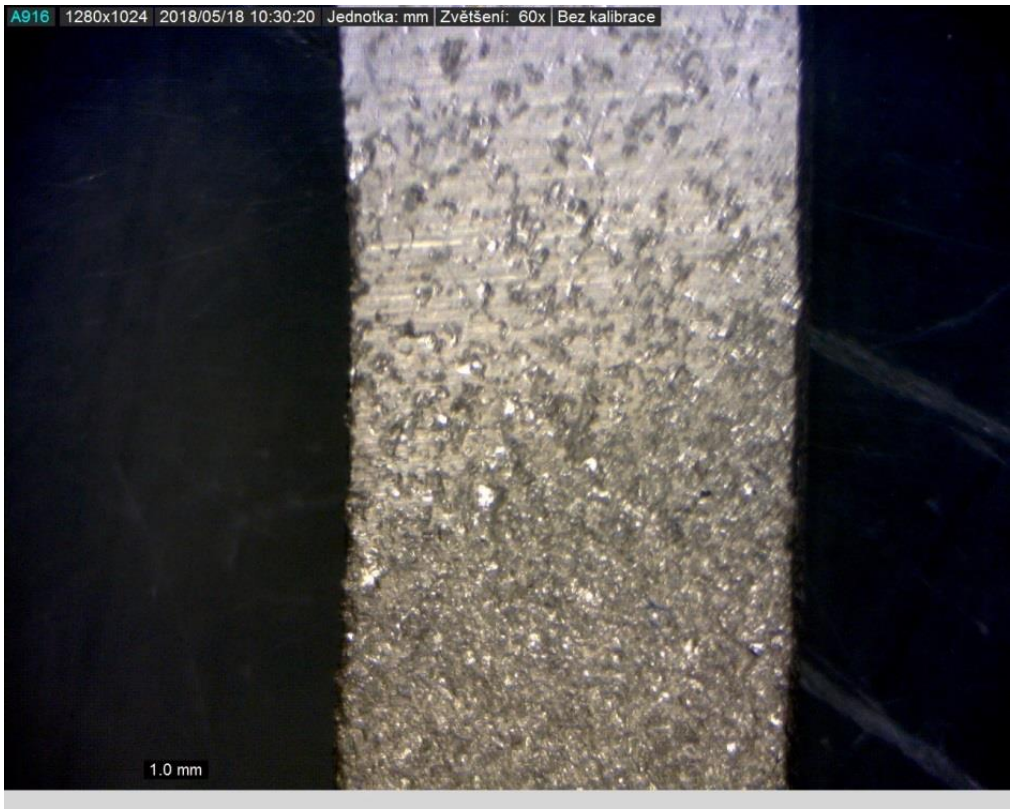
Jako další parametry, ovlivňující vnitřní napětí ve vzorku lze brát také vzdálenost tryskání, s kterou napětí ve vzorku lineárně roste. Stoupající tendence však není příliš výrazná, z čehož plyne, že vzdálenost tryskací hubice od součásti nemá na vnesenou deformaci příliš výrazný vliv. To neplatí o úhlu tryskání. Zde bylo podle výzkumu [1] zaznamenáno nejvyšších hodnot napětí při úhlu tryskání cca 70° , zhruba poloviční napětí pak bylo zaznamenáno při tryskacím úhlu 40°. V tomto případě je ale kromě vneseného napětí nutno sledovat další dva efekty - čistící účinek a zvětšování styčné plochy podložky.

4. Kontrola deformace

Nutnost kontroly tryskacího procesu, sleduje se souvislost tryskání. Nutnost odstranění tryskacího média pomocí vhodných prostředků. Jakékoliv znečištění před nástřikem je nepřípustné, proto je nutné vyhýbat se styku podložky holou rukou. Při tryskání byl střed kotouče krytován. Z obr. 35 lze dobře vidět přechod mezi tryskanou vrstvou a původní netryskanou plochou. Tryskání však způsobilo mírné pokřivení kotouče, což není vzhledem k jeho funkčnosti příznivé.



Obr. 35 Přechod mezi tryskanou a neotryskanou vrstvou



Obr. 36 Detail přechodu mezi tryskaným materiálem a původní plochou kotouče

5. *Vlastní nástřik*

Při samotném nástřiku keramického povlaku byly nanášeny dvě vrstvy – první z nich byla mezivrstva NiAl s obsahem niklu 95% a hliníku 5%. Mezivrstva plní vaznou funkci, tzn. lepší přilnavosti této vrstvy k podložce a zároveň vytváření dobrých podmínek k přilnutí následující povrchové vrstvy. Z důvodu snahy o co největší styčnou plochu mezi mezivrstvou a vnější povrchovou vrstvou se používá prášků hrubšího zrnění, v případě experimentu naší práce bylo použito velikosti prášku v rozmezí 45 – 90 μm. Použitá vrstva NiAl je pro toto využití velmi častá, jelikož kromě velice dobrých adhezních vlastností k většině kovových a keramických materiálů se vyznačuje také malou pórovitostí. Kromě tohoto materiálu se pro nanášení mezivrstev používají také NiCr v poměru 80/20 nebo NiTi v poměru 93/7. Jednotlivé parametry k procesu nanesení mezivrstvy shrnuje tab. 6.

Tab. 6 Parametry nástřiku při nanášení mezivrstvy

Parametry žárového nástřiku při nanášení mezivrstvy			
výrobce	Häganäs - Belgie	napětí	60 V
číslo tavby	LOT B-7800	vzdálenost nástřiku	120 mm
chemické slož.	95% Ni, 5% Al	průtok plazmového plynu	Argon - 38 l/min
velikost prášku	45 - 90μm		Vodík - 9,3 l/min
elektrický proud	450 A	průtok nosného plynu	Argon - 2,1 l/min

Po realizaci mezivrstvy následovalo nanesení vnější vrstvy, která tvoří povrch brzdné části kotouče. Jako materiál byl použit prášek o složení 92 % ZrO_2 a 8 % Y_2O_3. Velikost částic použitého prášku se pohybovala v rozmezí 20 – 45 μm. Konkrétní parametry nástřiku jsou shrnuty v tab. 7.

Tab. 7 Parametry nástřiku při nanášení povrchové vrstvy

Parametry žárového nástřiku při nanášení povrchové vrstvy			
výrobce	GTV mbH Německo	napětí	70 V
číslo tavby	LOT P-3621	vzdálenost nástřiku	120 mm
chemické slož.	92% ZrO_2 , 8%Y_2O_3	průtok plazmového plynu	Argon - 41,5 l/min
velikost prášku	20 - 45 mmm		Vodík - 12 l/min
el. proud	600 A	průtok nosného plynu	Argon - 2,1 l/min

Obr. 37 ukazuje část již povlakovaného kotouče. Z fotky lze dobře rozeznat přechod mezi vrstvou nástřiku oproti tryskané ploše. Detailněji to lze vidět na snímku, pořízeném mikroskopem na obr. 38. Střed kotouče byl stejně jako u tryskání krytován pomocí ocelové trubky. Tloušťka nanesených vrstev dosahovala 0,085 mm. Tloušťka kotouče tak z původních (po opotřebení) 1,63 mm vzrostla na 1,8 mm, což je standartní rozměr nového kotouče. Lze konstatovat, že tloušťka vrstvy nástřiku tak byla zvolena optimálně.

Obr. 37 Viditelný přechod mezi nástřikem a tryskáním

Obr. 38 Detail přechodu mezi nástřikem a tryskáním

Obr. 39 Detail nástřiku kotouče 1

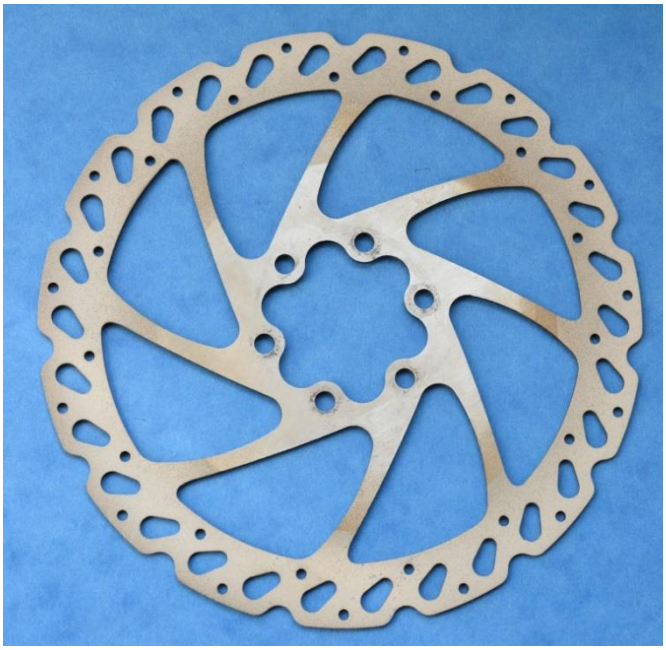
Obr. 40 Detail nástřiku kotouče 2

6. Očištění kotouče

Kotouč bylo před nasazením na náboj nutno ještě pomocí brusného papíru precizně očistit a zjemnit povrchovou vrstvu od nečistot.

Výsledkem tohoto technologického postupu byl již dříve používaný brzdový kotouč s nově nanesenou keramickou vrstvou o tloušťce 0,085 mm. Dobré adhezi natavených částic předcházelo odmaštění a hlavně tryskání původní plochy. Jako nedostatek lze hodnotit mírné pokřivení kotouče během tryskání, které komplikovalo následné seřízení brzdy. Jinak nebyl shledán žádný jiný závažný defekt.

Následovalo ještě testování, kdy byl kotouč nasazen na náboj zadního kola bicyklu a testován při jízdě v reálných podmínkách.



Obr. 41 Brzdný kotouč po nanesení povlaku

4.4 Testování kotouče v reálných podmínkách

Pro vyhodnocení funkčnosti naneseného povlaku bylo kotouč nutno vyzkoušet při jízdě v reálných podmínkách. Vzhledem k tomu, že smysl a cíle této práce jsou zaměřeny zejména na samotnou technologii žárového nástřiku a pouze teoretický rozbor problematiky kotoučových brzd, nebylo k dispozici žádných odborných měřících zařízení a zhodnocení bylo možno popsat zejména na základě vlastních subjektivních dojmů.

Po očištění následovalo nasazení kotouče na zadní náboj jízdního kola. K testování bylo použito jízdní kolo na rámu NS bikes Clash s hydraulickými brzdami Shimano. Jako brzdové destičky byly použity organické Shimano. Brzdu bylo nutno seřídit tak, aby při rotaci náboje s kotoučem nedocházelo k třecím kontaktům mezi kotoučem a destičkami. To však nebylo jednoduché, jelikož při tryskání došlo k mírnému pokřivení kotouče. Přesto se brzdu

povedlo seřídit, ikdyž k mírným a velice krátkým třecím kontaktům mezi destičkou a kotoučem stále docházelo, avšak nikoliv v tak velké míře, která by funkčnost brzdy znatelně omezovala.

Obr. 42 Montáž kotouče na jízdní kolo

Vzhledem ke krátké časové době mezi nanesením povlaku a termínem odevzdání této práce se nejednalo o žádné dlouhodobé testování, ale pouze krátkodobý jednorázový test. Před nasazením kotouče byla ještě změřena tloušťka brzdových destiček. Naměřeno bylo hodnoty 3,1 mm. Po seřízení brzdy následovalo krátké projetí a první vyzkoušení brzdného účinku. Při výměně destiček nebo kotouče je obecně typické, že brzdný účinek je většinou slabšího charakteru a poté se zvyšuje postupným brzděním. Stejně tak tomu bylo v našem případě. K testování byl využit prudký lesní úsek o délce cca 1 km, simulující sjezdové podmínky. Poté následoval asi 3 km úsek po asfaltové cestě, kde se dal brzdný účinek rovněž zhodnotit.

Po absolvování tohoto úseku lze konstatovat, že brzdný účinek byl s použitím keramického povlaku kotouče mírně slabší než při použití konvenčního ocelového. Nicméně vzhledem k použití dobře účinných hydraulických brzd i tak docela dobře plnil svou funkci a nedocházelo k žádnému ohrožení bezpečnosti během jízdy. Větší rozdíl by byl pravděpodobně znatelnější při použití mechanických brzd.

Obr. 43 Kotouč během testování

Tloušťka destiček byla změřena opět na hodnotu 3,1 mm, stejně tak tloušťka kotouče se nezměnila, jelikož zůstala na hodnotě 1,8 mm. Jak lze vidět z obr. 44, kotouč byl po brzdění znečištěn černými šmouhami. To bylo mírně matoucí, jelikož tento vzhled vzbuzoval dojem opotřebení povlaku. Nicméně po očištění vrstvy brusným papírem dostal povrch kotouče původní vzhled (viz obr. 45). Znečištění musel způsobit kontakt s brzdovými destičkami, nejednalo se o mechanické poškození povlaku.

Obr. 44 Znečištěný kotouč

Obr. 45 Kotouč po očištění

5 ZÁVĚR

V práci bylo zkoumáno použití metody žárového nástřiku pro nanesení keramického povlaku na brzdný kotouč jízdního kola. Z hlediska vysoké teploty tavení keramických materiálů byla z důvodu nejvyšších provozních teplot zvolena metoda plazmatického nástřiku. Materiál povlaku se skládal ze dvou vrstev – vazné o koncentraci 95% Ni a 5% Al a vnější (povrchové) o koncentraci 92 % ZrO_2 a 8 % Y_2O_3. Tento materiál měl povlaku zajišťovat dobrou otěruvzdornost a také vysokou odolnost proti tepelným šokům.

Pro experiment byl využit již dříve využívaný ocelový kotouč značky Tektro o průměru 160 mm. Procesu nanesení povlaku předcházel klasický technologický postup, popsaný v kapitole 4. Během tryskání došlo k mírnému pokřivení kotouče, což posléze komplikovalo seřízení brzdy. Zvolená tloušťka vrstvy naneseného povlaku byla 0,085 mm, což dalo kotouči původní rozměr jeho tloušťky, jelikož byl už značně opotřeben. Jako brzdové destičky byly použity konvenční organické.

Testování kotouče při samotném brzdění nebylo založeno na odborném sběru dat, ale pouze na subjektivních dojmech testujícího. Kotouč byl testován v reálných sjezdových podmínkách, kde byl poměrně značně zatěžován. Při brzdění bylo shledáno mírně menšího brzdného účinku než u konvenčního ocelového kotouče. Z toho lze usoudit, že koeficient tření zvoleného materiálu je při daných brzdných podmínkách nižší než v případě konvence. Přesto se nedalo říct, že by funkce brzdy byla větším způsobem omezena, ani že by během jízdy docházelo k ohrožení cyklisty. Na tom měla pravděpodobně zásluhu dobrá účinnost hydraulické brzdy.

Během krátkého testování nebyl zaznamenán žádný úbytek materiálu, a to jak v případě destiček, tak i kotouče. Vrstva povlaku byla pořád stejně souvislá a nedošlo k žádným mechanickým poškozením, pouze povrchovým šmouhám, způsobených kontaktem s destičkami. Nicméně vzhledem ke krátkosti testu nelze tyto informace brát velmi důvěryhodně, jelikož pro dosažení větší věrohodnosti je potřeba dlouhodobého testování, které však bude nadále probíhat.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AMBROŽ, Oldřich a Jiří KAŠPAR. *Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN ISBN 80-030-0347-4.

2. ISBN 978-80-227-2708. HOUDKOVÁ, Š., ENŽL, R., BLÁHOVÁ, O., 2003: *Žárové nástřiky*. Dostupné na: http://www.*kmm*. zcu.cz/CD/index.htm [2010-11-22].

3. KUNEŠ, Josef, Zdeněk VESELÝ a Milan HONNER. *Tepelné bariéry*. Praha: Academia, 2003. ISBN ISBN 80-200-1218-4.

4. MOHYLA, Miroslav. Technologie povrchových úprav kovů. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1995. ISBN 80-7078-267-6.

5. Žárové nástřiky. In: *VZÚ Plzeň* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: https://www.vzuplzen.cz/sluzby/zarove-nastriky/

6. Povrchové úpravy. In: *Vítkovice MACHINERY GROUP* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: http://www.vitkovice.cz/povrchove-ochrany-1

7. Jak vybrat kolo?. In: *KUPSIKOLA* [online]. 2014 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: http://www.kupsikola.cz/magazin-jak-vybrat-kolo-detail-7573

8. Mondraker Dune R 2018. In: *Heureka* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: https://jizdni-kola.heureka.cz/mondraker-dune-r-2018/

9. PERNICA, Jakub. MATERIÁLY RÁMŮ KOL. *Cyklisti.cz* [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: http://www.cyklisti.cz/novinky-a-clanky/materialy-ramu-kol.html

10. HOPE, Dan, Polly WREFORD a Steve BEHR. *Horské kolo*. Praha: Svojtka a Vašut, 1997. ISBN ISBN 80-7180-214X.

11. MONDRAKER SUMMUM PRO TEAM DH. In: *Katmar* [online]. [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: https://www.katmar.cz/mondraker-summum-pro-team-dh-2012-ram-vel-m-p-1533.html?zenid=d6qk0n52mhsnhcc26di0mrjvn6

12. Jak vybrat odpruženou vidlici. In: *SPOKE* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: https://www.spoke.cz/jak-vybrat-odpruzenou-vidlici/

13. Odpružená vidlice SR-Suntour XCR AIR. In: *Šlapací kolo* [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: https://www.slapacikolo.cz/Odpruzena-vidlice-SR-Suntour-XCR-AIR-24-cerna-d15364.htm

14. Jak vybrat vhodnou kazetu na kolo. In: *Bike-eshop.cz* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: https://www.bike-eshop.cz/jak-vybrat-vhodnou-kazetu-na-kolo

15. HALO SUB-4 MXR-FW 20" ZAPLETENÉ KOLO BMX RACE - ZADNÍ FREEWHEEL. In: *Katmar* [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: https://www.katmar.cz/halo-sub4-mxrfw-20-zapletene-kolo-bmx-race-zadni-freewheel-p-2685.html?zenid=pebadcq0b56m9a904ktt9f4cr2

16. VAŇHARA, Vojtěch. Volba materiálu pro ráfky jízdních kol. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inţenýrství, 2015. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D..

17. Pohony jízdních kol. *Cyklisti.cz* [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: http://www.cyklisti.cz/novinky-aclanky/pohony-jizdnich-kol.html
18. Kliky a středová složení – typy a tipy. In: *Bajk.cz* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: http://www.bajk.cz/data/clanek.asp?id_clanek=757
19. Řidítka. *Cyklovybava.cz* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: https://www.cyklovybava.cz/riditka/

20. Řidítka MAX1 MTB Al 660/31,8 mm černá zvýšená. In: *Bike-centrum.cz* [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: http://www.bike-centrum.cz/riditka-max1-mtb-al-660318-mm-cerna-zvysena

21. HALUSKA, R. Analýza pohybu jízdního kola při jízdě v přímém směru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 116 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Bc. Marek Semela, Ph.D.

22. Brzdové destičky a kotouče. *Cyklisti.cz* [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: http://www.cyklisti.cz/novinky-a-clanky/brzdove-desticky-a-kotouce.html

23. Jak vybrat brzdy na kolo. *Bike-eshop.cz* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: https://www.bike-eshop.cz/jak-vybrat-brzdy-na-kolo

24. Seřízení mechanických kotoučových brzd. *Ivelo.cz* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: http://www.ivelo.cz/domaci-servis-kol/seerizeni-mechanickych-kotoucovych-brzd/

25. LINDSEY, Joe. The Beginner's Guide to Disc Brakes. *Bicycling.com* [online]. 2017 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: https://www.bicycling.com/bikes-gear/a20023166/the-beginners-guide-to-disc-brakes/

26. Sturmey-Archer náboj RX-RD5 5r. RX bubnová brzda 70mm. In: *AXIT Bikes* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: http://www.axit.cz/D153081_Sturmey-Archer_naboj_rx-rd5_5r-rx_bubnova_brzda_70mm.html

27. NORMAN, Paul. Is heat build-up in disc brakes something to worry about?. In: *Cycling weekly* [online]. 2017 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: http://www.cyclingweekly.com/news/product-news/is-heat-build-up-in-disc-brakes-something-to-worry-about-310878

28. TAHMID, Shadman a Saima ALAM. *Numerical analysis of frictional heat generation in bicycle disc brake*. Bangladesh, 2017. Bangladesh University of Engineering and Technology.

29. BOHACZ, Ray T. Get a Grip!. *Hemmings* [online]. 2011 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: https://www.hemmings.com/magazine/hcc/2011/10/Get-a-Grip-/3704521.html

30. Properties of Friction Lining and Pad Materials (Automobile). *What-when-how* [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: http://what-when-how.com/automobile/properties-of-friction-lining-and-pad-materials-automobile/

31. LEE, Nam Jim a Chul- GOO KANG. *The Effect of a Variable Disc Pad Friction Coefficient for the Mechanical Brake System of a Railway Vehicle*. Massachusetts, 2015. Massachusetts Institute Of Technology.

32. We love brakes. In: *GT 86 Drivers club* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: http://www.gt86.org.uk/forums/topic/2050-we-love-brakes/

33. ZHANG, S.Y., S.G. QU a W.P. CHEN. *Two-body abrasive behavior of brake pad dry sliding against interpenetrating network ceramics/Al-alloy composites*. 2010.

34. Brzdový kotouč - A-2-Z ATO. In: *Dookie* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: https://www.dookie.cz/brzdovy-kotouc-a-2-z-ato/?v=2278-3317

35. ICE Technologies. In: *Shimano* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: https://bike.shimano.com/en-EU/technologies/component/details/ice-technologies

36. SVOBODA, Jakub. Kompozitní kotouče SiCCC – TECH NEWS. *Bikeandride.cz* [online]. 2013 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: http://www.bikeandride.cz/2013/01/kompozitni-brzdove-kotouce-siccc-tech-news/

37. MATĚJKA, Dušan a Bernard BENKO. *Plazmové striekanie kovových a keramických práškov*. Bratislava: Alfa, 1988.

38. ŠILDBERGER, Radek. Optimalizace parametrů nástřiku elektrickým obloukem. Brno, 2008. 76 s., 10 příloh, 1CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Kubíček. Dostupný z WWW: <ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace>

39. ZAHRADNIČEK, Lukáš. *Žárové nástřiky ve strojírenství*. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické, Fakulta strojní. Vedoucí práce Petr Krašnar.

40. Žárové a plazmové nástřiky. In: *Fluxamat* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: https://www.fluxamat.cz/zarove-nastriky/

41. DEE, Tiffany. Audi TT RS turbo exhaust. In: *Pinterest* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: https://cz.pinterest.com/pin/146085581643822755/

42. Keramika. In: *Západočeská univerzita v Plzni, Oddělení povrchového inženýrství* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/keramika.pdf

43. KUBÍČEK, Jaroslav. *Tryskání (prezentace)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018.

44. Servis, údržba a opravy kol a součástí. In: *Cyklobanda* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: http://www.cyklobanda.com/index.php?page=servis/skolicka/popis

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1 Nanášení žárových nástřiků [5]
Obr. 2 Nanášení žárových nástřiků [6]
Obr. 3 Sjezdové kolo MondrakerDune R 2018 [8]
Obr. 4 Sjezdový rám Mondraker [11]
Obr. 5 Odpružená vidlice SR – Suntour se zdvihem 100 mm [13]
Obr. 6 Zapletená kola Halo 20 [15]
Obr. 7 Pohon jízdního kola [17]
Obr. 8 MTB řídítka MAX1 [20]
Obr. 9 Jednotlivé komponenty hydraulické kotoučové brzdy [23]
Obr. 10 Upnutí kotouče pomocí šestice šroubů [22]
Obr. 11 Centrlock systém upínání kotouče[22]
Obr. 12 Ráfková brzda [23]
Obr. 13 Bubnová brzda RX-RD5 [26]
Obr. 14 Tepelné rozložení materiálu brzdového kotouče v různých časových intarvalech[28]
Obr. 15 Rozložení tepelného toku brzdového kotouče v různých časových intervalech[28]
Obr. 16 Závislost koeficientu tření na teplotě brzdné plochy a obvodové rychlosti kotouče[30]
Obr. 17 Závislost koeficientu tření na brzdné síle [30]
Obr. 18 Závislost koeficientu tření na teplotě - ocelový kotouč, organická destička [31]
Obr. 19 Kotouč s duralovým unášečem [34]
Obr. 20 Struktura kotouče ICE Technologies [35]
Obr. 21 Karbon-keramický kotouč SiCCC [36]
Obr. 22 Princip žárového nástřiku [2]
Obr. 23 Schéma struktury žárového nástřiku [2]
Obr. 24 Vznik porezity při nástřiku pod ostrým úhlem [2]
Obr. 25 Rozdělení technologie žárového nástřiku [2]
Obr. 26 Schéma zařízení pro plazmatický nástřik [2]
Obr. 27 Schéma principu žárového nástřiku plazmou [1]
Obr. 28 Nástřik povlaku kyčelní jamky [40]
Obr. 29 Nástřik výfuku Audi TT [41]
Obr. 30 Dilatační křivka povlaku ZrO_2[1]
Obr. 31 Brzdový kotouč Tektro
Obr. 32 Graf vlivu tlaku vzduchu na napětí ve vzorku [1]
Obr. 33 Graf vlivu doby tryskání na napětí ve vzorku [1]
Obr. 34 Graf vlivu zrnění tryskacího média na napětí ve vzorku [1]
Obr. 35 Přechod mezi tryskanou a neotryskanou vrstvou
Obr. 36 Detail přechodu mezi tryskaným materiálem a původní plochou kotouče
Obr. 37 Viditelný přechod mezi nástřikem a tryskáním
Obr. 38 Detail přechodu mezi nástřikem a tryskáním
Obr. 39 Detail nástřiku kotouče 1
Obr. 40 Detail nástřiku kotouče 2

Obr. 41 Brzdný kotouč po nanesení povlaku
Obr. 42 Montáž kotouče na jízdní kolo
Obr. 43 Kotouč během testování
Obr. 44 Znečištěný kotouč
Obr. 45 Kotouč po očištění

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Srovnání kotoučových brzd jízdního kola[22], [23], [24]
Tab. 2 Srovnání metod žárových nástřiků[2]
Tab. 3 Srovnání metod žárového nástřiku[2]
Tab. 4 Porovnání měrné tepelné vodivosti pro různé materiály[1]
Tab. 5 Zvolené parametry tryskání
Tab. 6 Parametry nástřiku při nanášení mezivrstvy
Tab. 7 Parametry nástřiku při nanášení povrchové vrstvy