

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



**ZVYŠOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI NÁSTROJŮ URČENÝCH K
LISOVÁNÍ ŽÁROVZDORNÝCH MATERIÁLŮ**

INCREASE OF REFRACTORY PRESSING TOOLS DURABILITY

DISERTAČNÍ PRÁCE

Autor: Ing. Jiří Kyncl
Studijní obor: Strojírenská technologie
Školící pracoviště: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Školitel: prof. Ing. Antonín Zelenka, CSc.
Školitel specialista: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Praha

2019

Přehled disertační práce:

Vysoká škola:	České vysoké učení technické v Praze Fakulta strojní
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí ústavu:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Téma disertační práce:	Zvyšování životnosti nástrojů určených k lisování žárovzdorných materiálů
Akademický rok:	2018/2019
Autor:	Ing. Jiří Kyncl
Školitel:	prof. Ing. Antonín Zelenka, CSc.
Školitel specialista:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Klíčová slova:	Žárovzdorné materiály; Lisovací nástroje; Životnost; Zvyšování životnosti; Abraze; Zkoušky abrazivního opotřebení;

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	158
Počet obrázků:	103
Počet tabulek:	16
Počet příloh:	1

Dissertation Thesis Overview:

University:	Czech Technical University in Prague Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Machining, Process Planning and Metrology
Head of the Department:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Dissertation Thesis Theme:	Increase of Refractory Pressing Tools Durability
Academic Year:	2018/2019
Author:	Ing. Jiří Kyncl
Supervisor:	prof. Ing. Antonín Zelenka, CSc.
Supervisor Specialist:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Keywords:	Refractory; Pressing tools; Durability; Durability increase; Abrasion; Abrasion wear tests;

Scope of Dissertation Thesis:

Number of pages:	158
Number of pictures:	103
Number of tables:	16
Number of attachments:	1

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou disertační práci vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Antonína Zelenky, CSc. a Ing. Libora Beránka, Ph.D. Dále prohlašuji, že jsem použil pouze podklady (literaturu, projekty, software atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 30.9.2019

.....

podpis

Poděkování

Tímto děkuji školiteli své disertační práce prof. Ing. Antonínu Zelenkovi, CSc. a školiteli specialistovi Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, a především za jeho vstřícnost a čas. Dále děkuji společnosti P-D Refractories CZ a.s. a jejím zaměstnancům za poskytnutí potřebných dat, umožnění rozsáhlých testů a za čas věnovaný konzultacím při řešení daných problémů.

Anotace

Tato disertační práce s názvem „Zvyšování životnosti nástrojů určených k lisování žárovzdorných materiálů“ se zabývá vývojem nové metodiky experimentálního ověřování životnosti konstrukčních materiálů v extrémních podmínkách, jako je například lisování žárovzdorných materiálů. Na základě analýzy mechanismu vzniku opotřebení lisovacích nástrojů a rešerše standardních metod experimentálního ověřování životnosti materiálů lisovacích nástrojů byla vyvinuta nová experimentální metoda pro určení abrazivní odolnosti konstrukčních materiálů. Touto metodou bylo testováno a následně porovnáno 117 konstrukčních materiálů. Výsledky provedených experimentů byly aplikovány na prototyp reálného lisovacího nástroje. Výsledkem práce je dosažení řádového zvýšení životnosti lisovacích nástrojů.

Klíčová slova

Žárovzdorné materiály; Lisovací nástroje; Životnost; Zvyšování životnosti; Abraze; Zkoušky abrazivního opotřebení;

Annotation

This dissertation thesis with the title „Increase of Refractory Pressing Tools Durability“, deals with the development of a new methodology for experimental verification of the durability of structural materials in extreme conditions, such as pressing refractory materials. Based on the analysis of the mechanism of wear of pressing tools and research of standard methods of experimental verification of durability of materials of pressing tools, a new experimental method was developed to determine the abrasive resistance of structural materials. Then 117 construction materials were tested and compared with this method. The results of the experiments were applied to the prototype of a real pressing tool. The result of this work is to achieve a multiple increase in tool life.

Key words

Refractory; Pressing tools; Durability; Durability increase; Abrasion; Abrasion wear tests;

Seznam použitých symbolů a zkratk

MPa	Megapascal
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
SiO ₂	Oxid křemičitý
CaO	Oxid vápenatý
Cr ₂ O ₃	Oxid chromitý
ZrO ₂	Oxid zirkoničitý
WC	Karbid wolframu
μm	Mikrometr
mm	Milimetr
cm	Centimetr
R _a	Střední aritmetická úchylka profilu
DSRW	Dry-sand, Rubber-wheel Wear test
POD	Pin-On-Drum abrasive wear test
RTG	Rentgenové záření
SEM	Scanning Electron Microscopy
EDX	Energy Dispersive X-ray spectroscopy
AV ČR	Akademie věd České republiky
WSP	Water Stabilised Plasma
HVOF	High Velocity Oxygen Fuel
CVD	Chemical Vapor Deposition
PACVD	Plasma Assisted CVD
PVD	Physical Vapor Deposition

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
1. Úvod	11
2. Přehled současného stavu problematiky opotřebení lisovacích nástrojů pro žárovzdorné materiály	12
2.1 Problematika opotřebení materiálů	12
2.2 Žárovzdorné materiály.....	19
2.3 Současné materiály pro výrobu lisovacích nástrojů pro žárovzdorné materiály.....	26
2.4 Opotřebení nástrojů určených k lisování žárovzdorných materiálů.....	28
3. Experimentální ověřování životnosti materiálů lisovacích nástrojů a proces vzniku opotřebení	30
3.1 Popis standardních ověřovacích metod	31
3.2 Rešerše metod úprav povrchu pro zvýšení životnosti strojních součástí.....	38
3.3 Úvodní zkoušky materiálů na základě výsledků standardních metod testování.....	55
3.4 Závěry kapitoly a motivace pro další řešení	59
4. Cíle disertační práce	60
5. Návrh metody experimentálního ověřování životnosti odpovídající reálnému lisovacímu cyklu	61
5.1 Charakteristika mechanismu vzniku opotřebení	62
5.2 Základní kritéria pro návrh nové metodiky testování	73
5.3 Vývoj experimentálního zařízení	77
5.4 Uvedení experimentálního zařízení do provozu a stanovení parametrů experimentálního zařízení	87
5.5 Zařízení pro experimentální ověřování životnosti lisovacích nástrojů určených pro lisování žárovzdorných materiálů.....	94
5.6 Metoda pro porovnání výsledků z experimentálního ověřování materiálů	96
5.7 Ověření experimentálního zařízení	101
5.8 Výsledky experimentálních zkoušek.....	102
5.9 Shrnutí experimentálního testování a výběr varianty	113
6. Aplikace výsledků na reálný lisovací nástroj	116
6.1 Konstrukční řešení lisovacího nástroje	117
6.2 Výroba prototypu	120
6.3 Provozní zkoušky prototypu lisovacího nástroje	121
6.4 Závěry kapitoly a shrnutí výsledků provozních zkoušek	125
7. Závěry a diskuze výsledků	126
7.1 Splnění cílů práce.....	129
7.2 Přenositelnost řešení.....	131
7.3 Důsledky pro vědu a průmyslovou praxi	132
7.4 Navazující výzkum.....	133

8. Bibliografie	134
9. Publikace autora	139
9.1 Publikace přímo související s disertační prací.....	139
9.2 Ostatní publikace a tvůrčí činnost autora.....	140
Seznam obrázků.....	145
Seznam tabulek	149
Seznam použitého software	149
Seznam příloh.....	150
Textové a grafické přílohy	I
Příloha A – Patentový spis 305959	II

1. Úvod

Doktorská práce s názvem „Zvyšování životnosti nástrojů určených k lisování žárovzdorných materiálů“ se zabývá problematikou abrazivní odolnosti materiálů v průmyslovém využití, kde při uplatnění moderních technologií ve výrobních procesech jsou díky vysokým působícím napětím zvyšovány nároky na používané materiály výrobních strojů. Opotřebením nástrojů pro lisování žárovzdorných materiálů je jedním z klíčových faktorů určující kvalitu žárovzdorných lisovaných výrobků, které nalézají uplatnění v tradičních výrobních oborech jako je sklářský, keramický či ocelářský průmysl.

Práce se zaměřuje primárně na oblast výroby žárovzdorných materiálů. Výroba lisovaných žárovzdorných materiálů patří mezi výrobní procesy, při kterých jsou lisovány keramické materiály s extrémní tvrdostí, jako je například korund, a otěruvzdornost ploch, které jsou lisování účastny, je kritická jak pro životnost lisovacího nástroje, tak pro kvalitu výsledného výrobku. V současné době se pro výrobu lisovacích nástrojů pro produkci žárovzdorných materiálů používají běžné nástrojové oceli odolné proti opotřebením, kalené ve vakuu, kdy je nutné velmi často provádět jejich opravy vzhledem k relativně nízké životnosti, která se pohybuje na hranici cca 5000 odlisovaných tvarovek.

Cílem doktorské práce je na základě teoretického základu i praktických měření stanovit metodiku pro zvyšování životnosti nástrojů určených k lisování žárovzdorných materiálů. Jedním z dílčích cílů disertační práce je navržení metody experimentálního ověřování životnosti lisovacích nástrojů odpovídající reálnému lisovacímu cyklu při lisování žárovzdorných výrobků pomocí hydraulického lisu. Následně na základě rešerše určit varianty vhodného materiálového složení funkční vrstvy lisovacího nástroje, s očekávanou řádově vyšší životností v porovnání s běžnými nástroji, a jednotlivé varianty podrobit experimentálnímu ověření životnosti. Na základě výsledků experimentálních zkoušek, navrhnout aplikaci konstrukčního a materiálového řešení na funkční díly lisovacího nástroje, které zajistí nástroji řádové zvýšení jeho užitné hodnoty. Vlastní řešení následně prostřednictvím prototypu testovat v reálném výrobním procesu v rámci výrobního podniku v České republice.

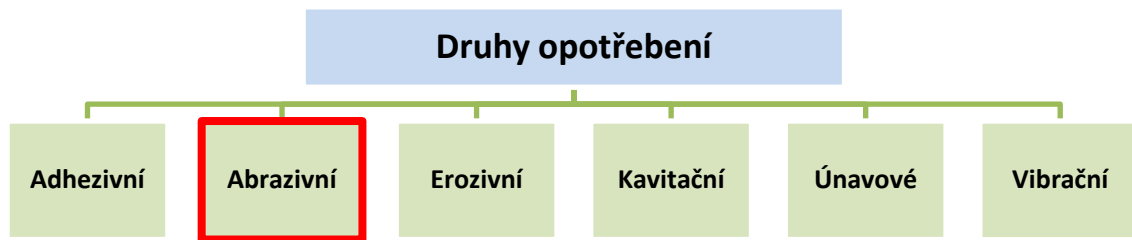
2. Přehled současného stavu problematiky opotřebení lisovacích nástrojů pro žárovzdorné materiály

Problematika životnosti a opotřebení je obecně v průmyslovém prostředí velice diskutovaným tématem. Napříč průmyslovým spektrem se můžeme s touto problematikou setkat v souvislosti s různými produkty a technologiemi, kde právě například pro výrobu produktů, které musí z pohledu konkurenceschopnosti a spolehlivosti dosáhnout kritéria nízkého opotřebení a s tím spjaté dlouhé životnosti. Z tohoto důvodu je nutné se v principech opotřebení orientovat a zároveň se věnovat možnostem pro snížení opotřebení. Životnost a opotřebení nástrojů je jednou z kategorií, která se týká téměř celého průmyslového prostředí. Disertační práce svým zaměřením cílí nikoliv na nejvíce zastoupenou problematiku obráběcích nástrojů, ale na problematiku opotřebení a životnosti nástrojů určených pro lisování. Kapitola je rozdělena do tří základních celků, které jsou spojeny s řešením disertační práce. První část charakterizuje problematiku opotřebení materiálů, následuje problematika žárovzdorných materiálů a jako poslední část je uvedena problematika konstrukčních materiálů pro nástroje určené k lisování žárovzdorných materiálů. Následující text je věnován charakteristice opotřebení materiálů.

2.1 Problematika opotřebení materiálů

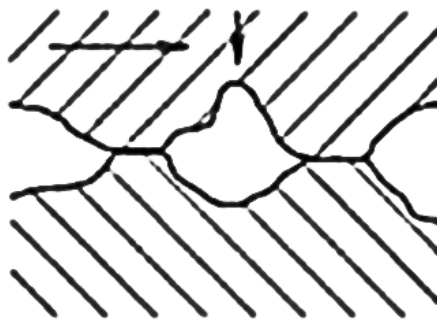
Opotřebení se věnovala norma ČSN 01 5050 (platná do roku 2007), kde bylo uvedené obecně platné názvosloví týkající se problematiky opotřebení. Názvosloví se používá i v současné době. Z tohoto důvodu bude v následujícím textu toto názvosloví použito. Dle normy ČSN 01 5050 je opotřebení definováno jako nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobená buď vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a media. Opotřebení se projevuje jako odstraňování nebo přemísťování částic hmoty z funkčního povrchu mechanickými účinky, případně doprovázenými i jinými vlivy (např. chemickými, elektrochemickými nebo elektrickými). [1]

Procesy opotřebení se dají rozdělit do 6 základních druhů. Toto rozdělení je uvedeno na Obr. 2.1. Lze říci, že v běžném provozu zařízení, strojů či nástrojů dochází k situacím, kdy současně působí více druhů degračních procesů opotřebení.



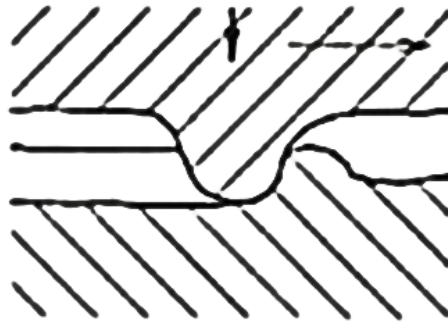
Obr. 2.1: Druhy opotřebení [1]

Jednotlivé druhy opotřebení jsou dále charakterizovány mechanismem vzniku vlastní degradace povrchu součástí. Adhezivní opotřebení lze z pohledu mechanismu vzniku chápat jako přenos částic, rýhování nebo vytrhávání částic. K vlastní degradaci povrchu dochází oddělováním a přemísťováním částic z míst, kde při relativním pohybu funkčních povrchů došlo k jejich vzájemnému dotyku, například při porušení povrchových kluzných či oxidických vrstev, a kovovému styku obou materiálů. K adhezivnímu opotřebení dochází porušováním mikrospojů vzniklých interakcí povrchových nerovností, kdy dojde k částečnému natavení nerovností vzájemným tlakem a otěrem a jejich přilnutí, a následným utržením spoje od jedné nebo druhé součásti. [2] Mechanismus vzniku adhezivního opotřebení je znázorněn na Obr. 2.2.



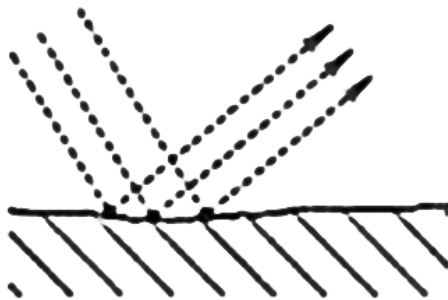
Obr. 2.2: Mechanismus vzniku adhezivního opotřebení [1]

Abrazivní opotřebení lze popsat jako oddělování částic z funkčního povrchu vlivem tvrdosti a drsnosti druhého povrchu, se kterým přijde do kontaktu, nebo vlivem abrazivních částic. Mechanismus vzniku abrazivního opotřebení je znázorněn na Obr. 2.3.



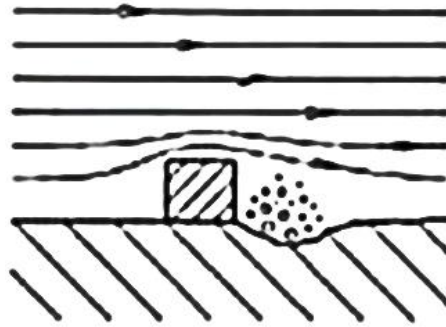
Obr. 2.3: Mechanismus vzniku abrazivního opotřebení [1]

Mechanismus vzniku erozivního opotřebení je chápán jako poškození funkčního povrchu součástí částicemi nesenými proudem kapaliny, plynu či kapkami páry. V průmyslovém prostředí se jedná o opotřebení součástí čerpadel, turbín, potrubí, ventilátorů, nebo třeba náběžných hran rychle letících letadel apod. Mechanismus vzniku erozivního opotřebení je znázorněn na Obr. 2.4



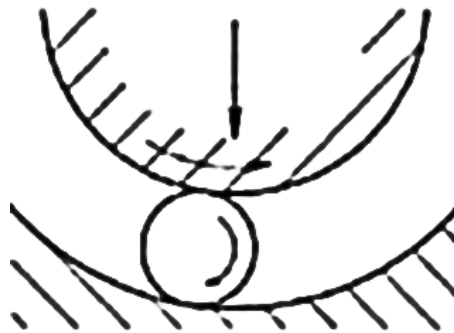
Obr. 2.4: Mechanismus vzniku erozivního opotřebení [1]

Opotřebení kavitační má mechanismus vzniku pomocí imploze bublinek, tzv. kavitačních dutin, vzniklých při lokálním podtlaku v kapalině, například za malým výstupkem v potrubí, kde u tohoto výstupku vznikne rychlostí proudící kapaliny tak vysoký podtlak, že se začnou tvořit malé bublinky nasycených par kapaliny. Tento mechanismus je znázorněn na Obr. 2.5.



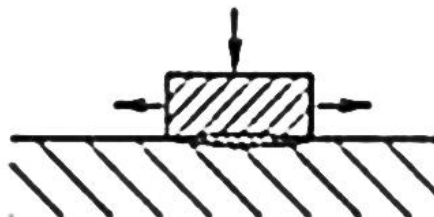
Obr. 2.5: Mechanismus vzniku kavitacího opotřebení [1]

K únavovému opotřebení dochází při opakovaném či cyklickém namáhání materiálu, kdy vzniká množství poruch krystalové mřížky a díky kumulaci poruch dochází k prasklinám, vylamování či celkovým lomům součástí. Mechanismus je znázorněn na Obr. 2.6.



Obr. 2.6: Mechanismus vzniku únavového opotřebení [1]

Posledním typem opotřebení je tzv. vibrační opotřebení. Ke vzniku tohoto typu opotřebení dochází na plochách součástí, které konají vzájemný tangenciální pohyb o malé amplitudě v řádu 0,1 μm až 100 μm . Mechanismus je znázorněn na Obr. 2.7. Vlivem malé amplitudy mezi povrchy zůstávají vzniklé produkty mezi styčnými plochami, pokud ale amplituda přesáhne hodnotu cca 100 μm , začne docházet k odstraňování částic otěru z oblasti kontaktu a místo vibračního opotřebení zde probíhá opotřebení adhezivní.



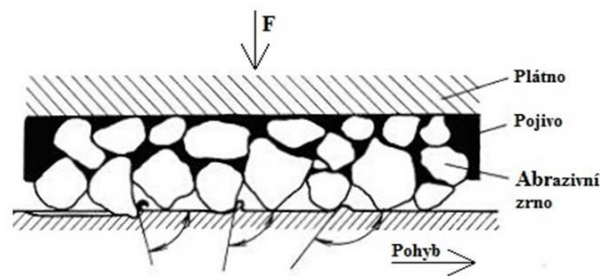
Obr. 2.7: Mechanismus vzniku vibračního opotřebení [1]

Obecně literatura uvádí, že přibližně polovina opotřebení je způsobena opotřebením abrazivním. Z výčtu jednotlivých typů opotřebení a ze znalosti problematiky lisování žárovzdorných materiálů je možné konstatovat, že i mechanismus vzniku opotřebení právě lisovacích nástrojů nejvíce odpovídá abrazivnímu druhu opotřebení. Následující text se proto bude věnovat právě tomuto typu opotřebení.

2.1.1 Abrazivní opotřebení

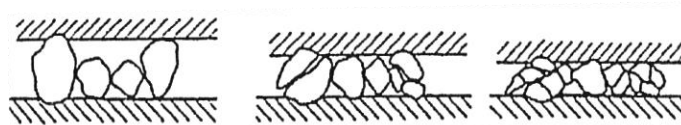
Vhodná volba konstrukčního materiálu pro strojní součásti je jeden z hlavních faktorů, který zásadním způsobem ovlivňuje životnost strojních součástí, jeho provozní náklady, ale i náklady na vlastní výrobu. Další důležité vlastnosti strojních součástí plynoucí z vhodné volby konstrukčního materiálu jsou samozřejmě i odolnost proti mechanickému a tepelnému namáhání a v neposlední řadě odolnost proti degradačním procesům, které působí na povrch součástí. Stejná situace je i v oblasti nástrojů pro lisování žárovzdorných materiálů. Tato průmyslová oblast je velice specifická z pohledu vzniku a charakteru degradačních procesů. Jako hlavní degradační proces spojený s opotřebením nástrojů určených pro lisování žárovzdorných materiálů je proces abrazivního opotřebení. Opotřebení je vyvolané zejména interakcí tvrdých částic lisovaného materiálu s funkčním povrchem lisovacího nástroje. V souvislosti s vysokým lisovacím tlakem dochází na funkčním povrchu lisovacího nástroje k intenzivnímu abrazivnímu opotřebením s velkým úběrem materiálu. Obecně lze říci, že abraze je jeden z nejčastějších druhů opotřebení. Literatura uvádí, že až 50% případů veškerého opotřebení strojních součástí je způsobeno právě procesy abraze.

Abrazivní opotřebení je charakterizováno oddělováním a přemísťováním částic materiálu při rýhování a řezání tvrdými částicemi. Tyto částice mohou být volné nebo určitým způsobem vázané. Abrazivní opotřebení je rozdělováno na dva hlavní případy, kdy v prvním dochází k otěru funkčního celku tvrdými částicemi, v druhém případě jde o opotřebení dvou funkčních celků, mezi kterými jsou abrazivní částice. [3] Schéma mechanismu vzniku prvního případu opotřebení, které je způsobeného vzájemným působením tvrdých abrazivních vázaných částic a funkčního povrchu je znázorněno na Obr. 2.8.



Obr. 2.8: Vzájemné působení tvrdých abrazivních vázaných částic a funkčního povrchu [3]

Schéma mechanismu vzniku druhého případu opotřebení, které je způsobeno relativním pohybem dvou funkčních povrchů, mezi kterými je přítomno množství abrazivních částic, je zobrazeno na Obr. 2.9

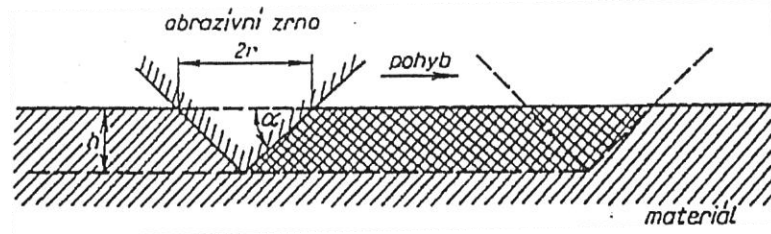


Obr. 2.9: Postupné zatěžování a fragmentace abrazivních částic mezi funkčními povrchy [3]

Z teoretických poznatků v oblasti abrazivního opotřebení vychází tzv. modely abrazivního opotřebení. Z pohledu kovových materiálů se jedná o základní model abrazivního opotřebení, kdy u dvou těles pevně vázané tvrdé částice nebo nerovnosti povrchu vnikají do povrchu a při relativním pohybu částic a měkčího opotřebovávaného povrchu kovu ho rýhují. Tento proces může a také nemusí vést k oddělování třísek opotřebovávaného materiálu. V praxi existují 2 extrémní případy. V prvním případě dochází vlivem vzájemného pohybu funkčního povrchu a částice k plastické deformaci, která se tvoří před abrazivní částicí vlivem jejího vtlačování do funkčního povrchu a jejího pohybu. Tento nárůstek je kontinuálně vytlačován z funkčního povrchu, kde následně vzniká rýha s hranami vystupujícími nad povrch funkčního povrchu. Otěr materiálu je v tomto případě způsoben vyčerpáním deformační schopnosti poškozovaného materiálu a jeho následnou delaminací. [4] Ve druhém případě je tvorba rýh spojena s odstraňováním materiálu z povrchu mikrořezáním. Extrémem v tomto případě je odstranění celého objemu materiálu rýhy ve formě třísky bez tvorby valů po stranách rýhy. [3]

Dle literatury [5] model abrazivního opotřebení křehkých materiálů je založen na hypotéze, že k odstraňování materiálu dochází tvorbou bočních trhlin. Tyto trhliny se vytvoří, pokud normální zatížení na částici překročí kritickou hodnotu, která je závislá na lomové houževnatosti materiálu

K_{1C} , a na jeho tvrdosti H . Při kluzu ostrého hrotu částice po povrchu se tvoří plastická rýha, boční trhliny se šíří až k volnému povrchu. Zjednodušený model abrazivního opotřebení kuželovou nerovností, která je charakteristická právě pro žárovzodorné materiály, je znázorněn na Obr. 2.10.



Obr. 2.10: Zjednodušený model interakce abrazivní částice s funkčním povrchem součásti [6]

Pro tento zjednodušený model interakce abrazivní částice s funkčním povrchem součásti platí následující vzorec pro rovnováhu sil.

$$F = p_m \cdot \pi \cdot r^2 \quad [3] \quad (1)$$

Kde p_m je tvrdost povrchu, respektive tlak potřebný k dosažení plasticity povrchových vrstev materiálu a r je poloměr vtisku v úrovni původního povrchu.

Dále pak platí, že se při pohybu kužele po dráze l odstraní objem materiálu dle následujícího vzorce.

$$dW_0 = r \cdot h \cdot dl = \frac{F \cdot \operatorname{tg} \alpha}{p_m \cdot \pi} \cdot dl \quad [3] \quad (2)$$

Hodnota p_m zde není konstantní a mění se s úhlem α . Celkový objem odstraněného materiálu W_0 je výsledkem působení velkého množství abrazivních částic s různým úhlem α . Tento závěr je přenositelný i na problematiku opotřebení nástrojů určených pro lisování žárovzodorných materiálů. Disertační práce se bude dále věnovat návrhu metodiky pro testování abrazivní odolnosti materiálů za podmínek vysokých lisovacích tlaků, tedy velkého silového působení, a velkého rozptylu velikosti abrazivních částic od 0,001 mm až po 1 mm.

2.2 Žárovzdorné materiály

Charakter materiálů určených pro lisování žárovzdorných výrobků má zásadní vliv na opotřebení lisovacích nástrojů, a to zejména z důvodu vysokého obsahu tvrdých částic jako je Al_2O_3 a SiO_2 . Z tohoto důvodu bude v následujícím textu teoreticky uvedeno základní dělení žárovzdorných materiálů a následně bude popsána technologie výroby lisovaných žárovzdorných materiálů.

Definice žárovzdorných materiálů je dána mezinárodní normou. Jsou to nekovové materiály nebo výrobky, kterým chemické a fyzikální vlastnosti umožňují jejich použití při vysokých teplotách [7]. Tyto materiály se řadí mezi hrubozrnnou keramiku - mikrostruktura je tvořena zrny větších rozměrů. Žárovzdorné materiály se skládají z oxidů a jejich kombinací a jsou používány například pro vyzdívky pecí a tepelných zařízení v různých odvětvích průmyslu.

Jako základní vlastnost žárovzdorných materiálů je chápána schopnost odolávat vysokým teplotám (1 000°C a více). To znamená, že všechny hlavní fáze materiálu mají vyšší teplotu tavení, než je teplota okolí při jejich použití.

Jak bylo řečeno, žárovzdorné materiály se řadí mezi keramiku. Za keramiku se považují ve vodě prakticky nerozpustné polykrystalické látky, které byly získány z anorganických nekovových surovin, většinou na bázi silikátů. Po zpracování výrobků do požadovaného tvaru a následném výpalu, vzniká samotný keramický výrobek. Během procesu výpalu dochází ke slinování částic keramické směsi a k vytvoření nové mikrostruktury. Díky slinování má keramika požadované fyzikální a chemické vlastnosti. Základními prvky každé keramické směsi jsou ostřivo (například oxidy křemene či hliníku) a pojivo (například jíl). Prvky ostřiva se mohou ve směsi vyskytovat jak v páleném, tak v nepáleném stavu. Další příměsi mohou být plniva a ostatní látky, které upravují parametry směsi v páleném i surovém stavu. [8]

2.2.1 Vlastnosti keramiky

Hlavním prvkem směsi pro výrobu keramiky jsou horniny obsahující jílu. Většina keramiky vzniká z jílovité směsi vytvářením za studena (lisování, extruze, atd.) při různých vlhkostech surové směsi. Vlhkost směsi se může pohybovat od téměř tekuté směsi až po suchou, a to v závislosti na druhu keramického výrobku. Po výpalu surové hmoty vzniká vlastní keramická hmota zvaná také keramický střep. [8] [7]

Jemnost keramiky je závislá na velikosti zrn použitého ostřiva. Keramický výrobek je složen ze zrn různých velikostí, jejichž poměr ovlivňuje výsledné vlastnosti keramického výrobku. Keramika s menšími zrny je jemnější, má tedy jemnozrný střepek a hladký povrch. Taková keramika se používá na výrobky z porcelánu nebo sanitární keramiky. Keramika s většími zrny je hrubá keramika, jejíž zrna mohou dosahovat velikostí až několika milimetrů. Žárovzdorné výrobky svými vlastnostmi spadají do kategorie hrubé keramiky. Pověšinou jsou složeny ze zrn různých velikostí. [9]

Kromě velikosti zrn lze keramiku také dělit v závislosti na pórovitosti výsledného výrobku. Pórovité keramické výrobky jsou vhodné do aplikací, kde je nutná menší hmotnost výrobku nebo kde není nutné zamezit přístupu vzduchu (pasivní filtrace), popřípadě se využívá jejich izolačních vlastností.

Z pohledu chemického složení jsou v současné době keramické materiály převážně syntetické, na bázi nekovových sloučenin s vysokým bodem tání (oxidy, nitridy, karbidy, boridy). Tyto materiály se uplatňují jako moderní konstrukční materiály v různých aplikacích.

Žárovzdorné výrobky jsou chemickým složením jednodušší než moderní konstrukční keramické výrobky. Jak již bylo řečeno, hlavními prvky jsou oxidy. Z toho je odvozen název této kategorie: oxidová keramika. Na základě chemického složení se keramika dělí do 3 kategorií: oxidová keramika, neoxidová keramika a kompozitní (směsná) keramika. [9]

Do oxidové keramiky patří materiály získané jednak z jednoduchých kovových oxidů Al_2O_3 (alumina), ZrO_2 , BeO , CaO , MgO nebo ze složitějších sloučenin jako cordierit, mullit nebo spinel. Nejpoužívanějším materiálem je Al_2O_3 . Jedná se o tvrdý oxid pevný v tlaku a s dobrými elektrickými izolačními vlastnostmi. [10] [11]

Neoxidová keramika se skládá ze sloučenin lehkých prvků ze třetí až páté skupiny tabulky prvků. Jsou to zejména karbidy a nitridy boru, křemíku a hliníku. Tato skupina keramických výrobků má výrazné využití v aplikacích od vysoce tvrdých abraziv (B_4C , BN), řezných nástrojů (WC), raketových trysek (TiB_2), elektrod pro tavení kovů (ZrB_2), po např. topné články (MoSi_2). Nejdůležitějšími konstrukčními neoxidovými prvky jsou karbid křemíku SiC , nitrid křemíku Si_3N_4 a tak zvané sialony (Si-Al-O-N) – nitridová keramika s proměnlivým obsahem oxidů. [10] [11]

Výrobky spadající do kategorie kompozitní keramiky jsou tvořeny materiály vícefázových systémů. Přidáním dalších fází do keramických směsí lze dosáhnout nejen zvýšení houževnatosti, ale často tak zvýšení pevnosti a ostatních užitečných vlastností. [11]

2.2.2 Žárovzdorné výrobky

V předchozí kapitole byly popsány základní vlastnosti keramických materiálů. Žárovzdorné materiály se vyznačují odolností proti vysokým teplotám a zejména pak stálostí fyzikálních a mechanických vlastností za vysokých teplot, které často dosahují 1500°C i více. Vlastní schopnost materiálů odolávat žáru je přímo spjata s teplotou tání dílčích stavebních složek žárovzdorného materiálu, tyto složky jsou uvedeny v následující Tab. 2.1. Jako další velice důležité vlastnosti žárovzdorných výrobků lze chápat zejména pevnost v žáru, odolnost proti tečení, objemová stálost, odolnost proti změnám teploty a odolnost proti korozi struskou. [12]

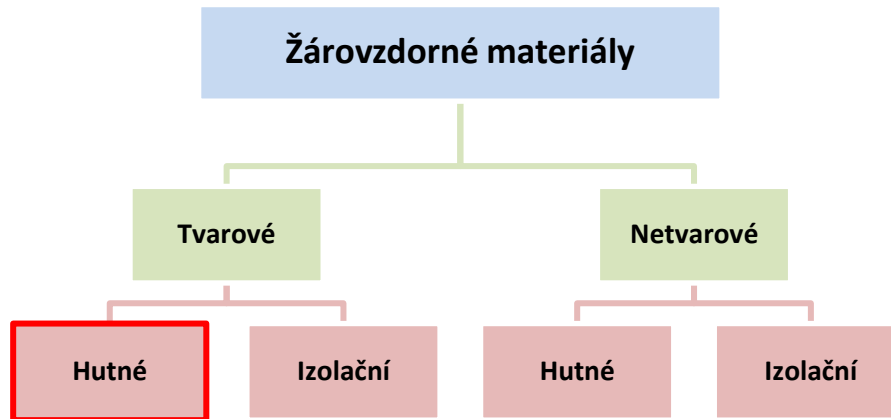
Žárovzdornost materiálu je kromě jeho chemicko-mineralogického složení ovlivněna také výrobní technologií, parametry výpalu či sušení, hutností a vlhkostí lisované směsi. [11] [12]

Tab. 2.1: Teploty tání oxidů [13]

Oxid	Teplota tání [°C]
MgO	2852
ZrO ₂	2700
CaO	2625
Cr ₂ O ₃	2265
Al ₂ O ₃	2054
SiO ₂	1726

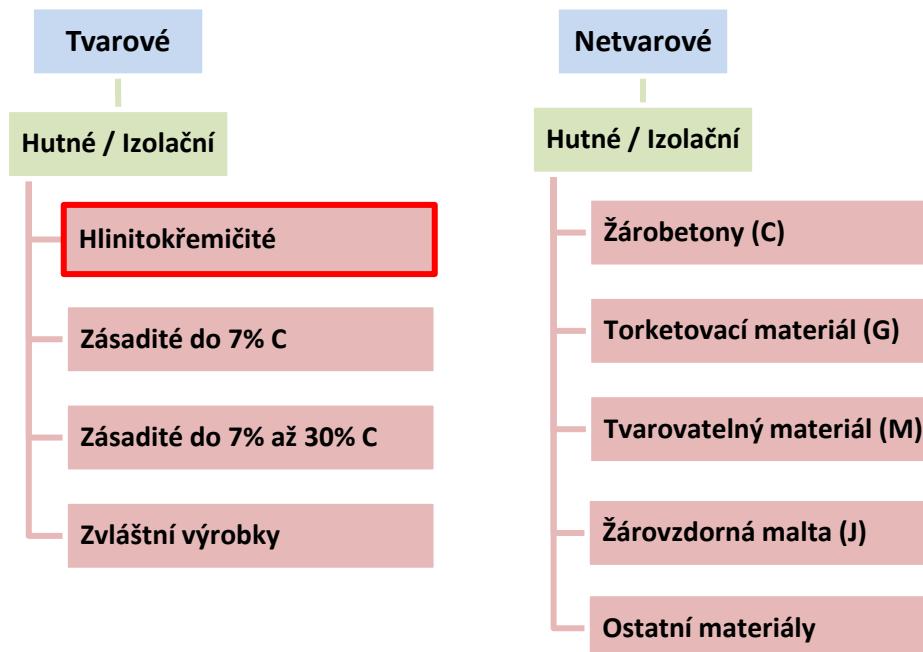
Stejně jako keramické materiály se dají i žárovzdorné materiály členit, ovšem klasifikační normy nejsou pro výrobce ani pro výrobky závazné. Dle dostupné literatury lze použít členění z již neplatné normy ČSN EN ISO 10081-1, uvedené na Obr. 2.11. Z pohledu základního rozdělení žárovzdorných materiálů, je možné je dělit na tvarové a netvarové. Jako tvarové lze charakterizovat například tvarové kameny, tedy lisované žárovzdorné výrobky a jako netvarové zde můžeme chápat výrobky v podobě malty nebo tmelu. Další možné dělení žárovzdorných materiálů je uváděno jako dělení na hutné a na izolační, kde je mezi nimi základním rozdílem pórovitost, která je u izolačních materiálů vyšší než 45 %. Chemické složení hutných a izolačních materiálů je stejné. [12] Problematika opotřebení lisovacích nástrojů, určených pro výrobu

žárovzdorných materiálů je spjata se skupinou tvarových materiálů a primárně spadá do podskupiny hlinitokřemičitých. Příslušné skupiny, do kterých problematika opotřebení lisovacích nástrojů spadá v největší míře, jsou v následujících schématech vyznačeny červeným rámečkem.



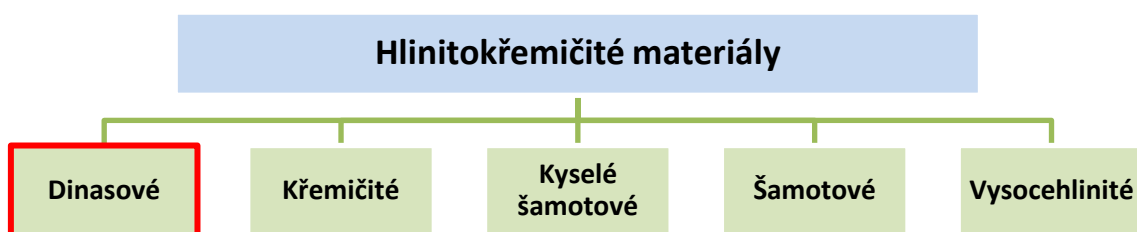
Obr. 2.11: Hlavní rozdělení žárovzdorných materiálů [12] [14]

Hutné tvarové žárovzdorné materiály lze dále členit podle chemického charakteru, technologie výroby a například podle jejich fyzikálních vlastností. Z titulu použitého ostřiva jsou pro potřeby této práce materiály členěny podle normy ČSN EN ISO 10081-1. Členění je uvedeno na Obr. 2.12.



Obr. 2.12: Detailnější rozdělení žárovzdorných materiálů [12] [14]

Nástroje určené pro lisování žárovzdorných materiálů je obecně možné použít na jakékoliv chemické složení materiálů. Nicméně nejrozšířenějšími materiály, které jsou pomocí těchto nástrojů lisovány, jsou materiály hlinitokřemičité. Tyto materiály nazývané též alumino-silica, jsou nejrozšířenější a také nejstarší skupinou materiálu pro výrobu žárovzdorných výrobků hromadné spotřeby. Materiály jsou hojně využívány z důvodu dostupnosti surovin pro jejich výrobu a výbornými vlastnostmi při vysokých teplotách. Jako hlavní složky ostřiva hlinitokřemičitých materiálů jsou prvky v soustavě $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$. [12] Hlinitokřemičité materiály lze rozdělit podle Obr. 2.13.



Obr. 2.13: Rozdělení hlinitokřemičitých žárovzdorných materiálů

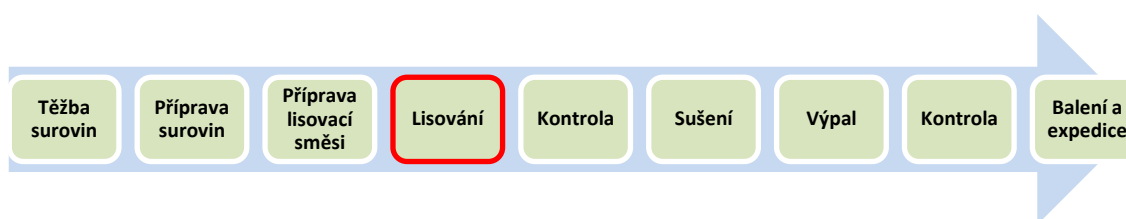
Z pohledu žárovzdornosti jsou nejlepší vysocehlinité výrobky, dále pak šamotové a nejhůře dinasové. Z pohledu chemické odolnosti je tomu naopak, kdy nejodolnější jsou dinasové výrobky a nejméně odolné jsou vysocehlinité výrobky. [12] Jako šamotové materiály lze označovat materiály s charakteristickým obsahem Al_2O_3 v rozmezí 10 – 45%. Další dělení těchto materiálů je na kyselé s obsahem Al_2O_3 pod 30% a běžné šamotové materiály s obsahem Al_2O_3 v rozmezí 30 – 45%. Jako dinasový materiál označujeme materiál, který má jako hlavní složkou SiO_2 s obsahem okolo 95 %. Další složky dinasového materiálu jsou pak CaO a Al_2O_3 , ovšem oxid hlinitý je v tomto případě považován za nežádoucí přísadu. [7]

Práce se zabývá opotřebením lisovacích nástrojů, ke kterému dochází při lisování žárovzdorných materiálů. Pokud uvažujeme nejrozšířenější materiály, viz Obr. 2.13, pak z hlediska degradace materiálu lisovacího nástroje je nejvíce degradujícím žárovzdorným materiálem dinas, který bude také použit k experimentům. O světové produkci těchto materiálů lze říci, že nejvíce zastoupeným materiálem je šamot a následuje dinas. V České Republice existují jednotky výrobců žárovzdorných materiálů. Nejvýznamnějším českým producentem žárovzdorných materiálů je společnost P-D Refractories CZ a.s., jejíž produkce, stejně jako ta světová, je zaměřena především na výrobu šamotových a dinasových materiálů. Tato společnost umožní realizaci experimentů souvisejících s řešením disertační práce na vlastním výrobním zařízení a

s produkčními žárovzdornými materiály. Pro doplnění teoretických znalostí, je také nutné seznámit se s celým procesem výroby žárovzdorných materiálů, který je uveden v následující kapitole.

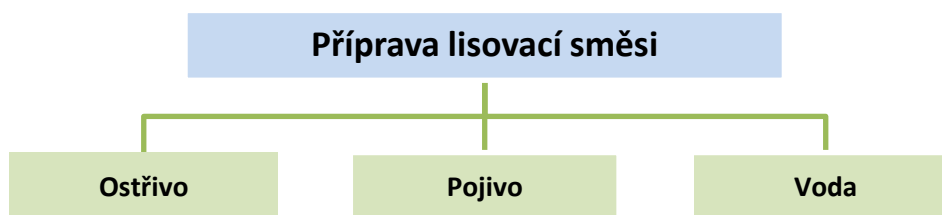
2.2.3 Technologie výroby žárovzdorných výrobků

Obecně platí, že technologie výroby žárovzdorných materiálů je vysoce energeticky náročná a pracná. Proces výroby je možné rozdělit do devíti samostatných kroků. Pro přehlednost je proces výroby zpracován v Obr. 2.14.



Obr. 2.14: Schéma výroby lisovaných žárovzdorných výrobků

Těžba surovin a následná příprava surovin z pravidla probíhá mimo výrobní závod producentů žáromateriálů. Jako přípravu surovin lze chápat jejich separaci, drcení a mletí na požadovanou zrnitost. K přípravě lisovací směsi dochází již ve výrobních závodech. Příprava lisovací směsi je mísení jednotlivých složek lisovacího materiálu v určitém, přesně stanoveném poměru. Jednotlivé složky jsou uvedeny na Obr. 2.15.



Obr. 2.15: Složky žárovzdorného materiálu

Jako ostřivo se označují zrnité, buď pálené (Al_2O_3) nebo těžené (SiO_2) rozměrově stálé suroviny. Pojivem v případě žárovzdorných materiálů rozumíme žárovzdorné jíly a následně je zde zastoupena voda v poměru 4-6%. Zásadní fází výroby žárovzdorných výrobků je vlastní lisování, kdy vznikají veškeré kvalitativní specifikace finálních výrobků, kterými jsou rozměrová přesnost a hutnost výrobků. Při samotném lisování nedochází pouze ke zhutnění, ale i prostřednictvím lisovacího nástroje k vytvarování lisované směsi do finální podoby daného výrobku. Pro lisování

se standardně používají automatizované hydraulické lisy. Při zpracování šamotových materiálů se lisovací tlaky pohybují v rozmezí 30 – 120 MPa. U dinasových materiálů jsou používány lisovací tlaky v rozmezí 25 – 50 MPa. Lisovací tlaky jsou závislé na zpracovávaném materiálu, tvaru finálního výrobku, rozměrech finálního výrobku, ale také na požadavcích na funkci výrobku, která je dána jeho hutností. Hutnosti výlisků odpovídá lisovací tlak a předem stanovená optimální vlhkost lisované směsi, kdy platí přímá úměra, že při zvyšující se hodnotě tlaku klesá vlhkost, která ale na druhé straně zabezpečuje nižší pórovitost. Směsi s optimální vlhkostí už bývají při daném lisovacím tlaku náchylné k přelisování, používají se v technologické praxi směsi se sníženou vlhkostí, ale jen natolik, aby se výrazně nezvýšila pórovitost výrobků. [15] [16]

Vzhledem k přítomnosti vody je další nutnou výrobní operací sušení výrobků. Dle typu a vlhkosti směsi může být sušení realizováno buď při teplotě okolí, nebo se výrobky suší v sušárnách při teplotě cca 80 – 150 °C. Výrobky je nutné vysušit pod 1% vlhkosti, jelikož vlhkost je nežádoucí při výpalu, z důvodu možného poškození výrobků. Výpal dává žárovzdorným výrobkům finální vlastnosti. Při výpalu ve výrobcích probíhají fázové a strukturní změny a přeměny, které jsou charakterizovány zpevněním a zhutněním výrobků. Výpal probíhá při teplotě, která zabezpečí, že se ve vypalovaném výrobku začíná tvořit tavenina, která ovlivňuje procesy spékání a fázové přeměny. Při výpalu rovněž dochází k objemovým změnám žárovzdorných výrobků a to jak k nárůstu, tak smrštění podle druhu materiálu. Orientační teploty výpalu pro jednotlivé druhy hlinitokřemičitých výrobků jsou uvedeny v Tab. 2.2.

Tab. 2.2: Orientační teploty výpalu pro jednotlivé druhy hlinitokřemičitých výrobků [15] [16]:

Hlinitokřemičitý materiál	Orientační teplota výpalu [°C]
Běžné druhy šamotových výrobků	1250 až 1400°C
Špičkové druhy šamotových výrobků	1400 až 1500°C
Korundové výrobky	1600 až 1700°C
Dinasové výrobky	1430 až 1470°C

Po výpalu žárovzdorných výrobků následuje zpravidla 100% kontrola výrobků z pohledu mechanického poškození, jako jsou trhliny, praskliny či vytaveniny, a rozměrová kontrola. Následně jsou výrobky zabaleny na paletu a expedovány.

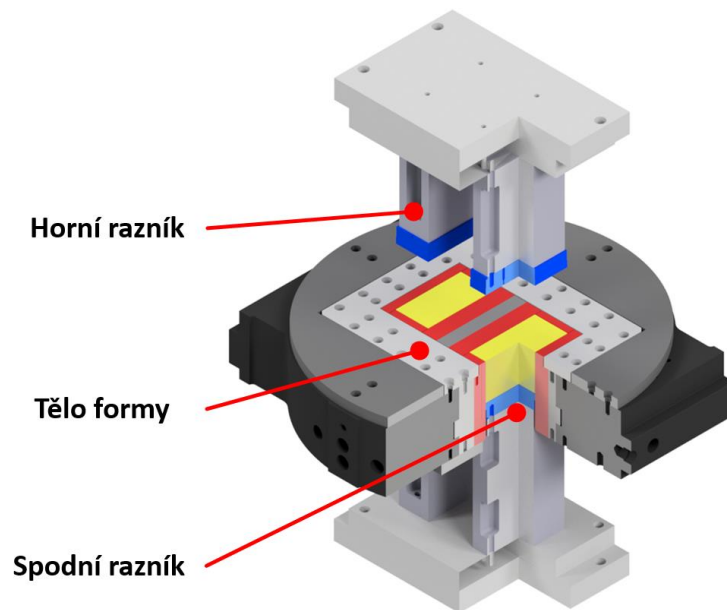
2.3 Současné materiály pro výrobu lisovacích nástrojů pro žárovzdorné materiály

Problematiky opotřebení lisovacích nástrojů je úzce spjata se současně používanými materiály pro vlastní výrobu těchto nástrojů. Nástroje určené k lisování žárovzdorných materiálů jsou vystaveny extrémnímu silovému namáhání a s tím i extrémnímu abrazivnímu opotřebení. Tato skutečnost je způsobena především charakterem materiálů určených pro lisování žárovzdorných výrobků, které obsahují ostřívo ve formě tvrdých částic jako je například Al_2O_3 v podobě šamotových materiálů nebo SiO_2 v podobě dinasových materiálů. Kombinace těchto materiálů a vysoké hodnoty lisovacího tlaku (na úrovni 30 – 100 MPa) nutného pro zhutnění lisovaných materiálů na požadovanou kvalitu, hraje zásadní roli pro volbu konstrukčních materiálů pro výrobu lisovacích nástrojů. Základní požadavky na tyto materiály jsou uvedeny na Obr. 2.16.



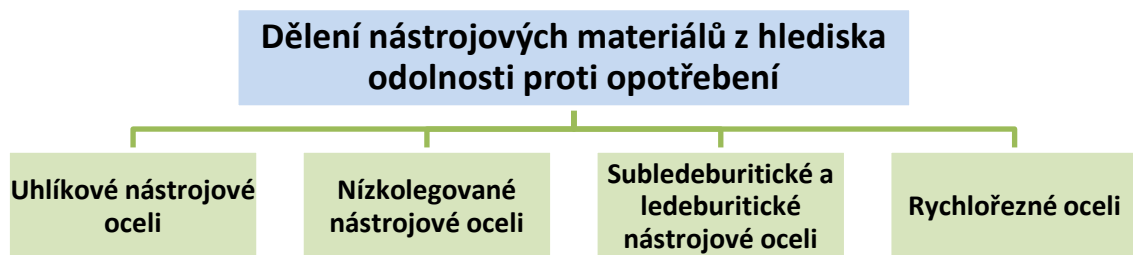
Obr. 2.16: Základní požadavky na konstrukční materiály pro výrobu lisovacích nástrojů

Materiály určené pro konstrukci lisovacích nástrojů pro lisování žárovzdorných materiálů jsou oceli legované a oceli nástrojové. Zejména použití kombinace nástrojových ocelí a následného tepelného zpracování je v současné době mezi výrobci žárovzdorných materiálů nejpoužívanějším řešením. Konkrétní volba konstrukčních materiálů je vždy předmětem vlastního know-how výrobců žárovzdorných materiálů, ovšem zpravidla vždy se jedná o tepelně zpracovanou nástrojovou ocel. Kombinace zaručí na jedné straně příznivou ekonomiku výroby lisovacích nástrojů a na straně druhé dosažení zvýšené odolnosti materiálu proti opotřebení a odolnosti proti korozi při zachování houževnatosti základního materiálu. Lisovací nástroj jako takový je z pohledu volby konstrukčního materiálu možné rozdělit do dvou základních celků, a to jsou razníky a tělo formy. Toto základní rozdělení je uvedeno na Obr. 2.17.



Obr. 2.17: Základní dělení konstrukce lisovacího nástroje

Z pohledu materiálového řešení a s ohledem na deponitní systémy konstrukčního řešení je předmětem disertační práce rozhraní mezi lisovaným materiálem a materiálem formy. Přímo do kontaktu s lisovaným materiálem přichází horní s spodní razník a vyložení formy. Materiály použité pro výrobu těchto prvků jsou nástrojové oceli, které jsou charakterizované v následujícím textu. Nástrojové oceli je možné z hlediska odolnosti proti opotřebení (zejména ve vztahu k abrazivnímu opotřebení) rozdělit dle Obr. 2.18.



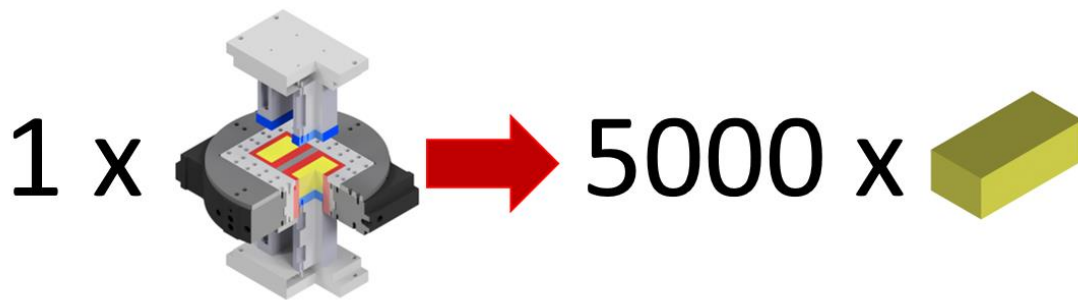
Obr. 2.18: Dělení nástrojových materiálů z hlediska odolnosti proti opotřebení [3]

Z hlediska odolnosti proti abrazivnímu opotřebení jsou nejvýznamnější subledeburitické a ledeburitické nástrojové oceli. Lze mezi ně zařadit například oceli jako EN 1.2080 (ČSN 19436), EN 1.2436 (ČSN 19437), EN 1.2363 (ČSN 19571) nebo EN 1.2601 (ČSN 19572) pro konstrukci funkčních dílů těla formy a materiál 1.2714 (ČSN 19663) určený jako konstrukční materiál pro razníky. Materiály vykazují vysokou odolnost proti abrazivnímu opotřebení, a to zejména z

důvodu výskytu komplexních karbidů v jejich mikrostrukturu [3]. Subledeburitické a ledeburitické nástrojové oceli jsou konstrukční materiály pro součásti, které podléhají intenzivnímu opotřebení. Jedná se právě například o nástroje určené k lisování keramiky, cihlářských výrobků, brusných prostředků, kovokeramiky a skla. Hlavním důvodem volby těchto materiálů je kombinace vysoké mechanické pevnosti a tvrdosti. Dalším důvodem, který hraje roli při volbě těchto materiálů je relativně příznivá cena, a to i vzhledem ke skutečnosti, že nástrojové oceli, s ohledem na ostatní druhy ocelí, patří mezi dražší materiály. Ovšem ve srovnání s materiály, které by mohly nástrojové oceli v oblasti lisování žárovzdorných materiálů nahradit, je jejich cena naopak příznivá. Nové a perspektivní materiály, jako například různé druhy keramických materiálů nebo kompozitních materiálů v naprosté většině případů nejsou dosud schopny nástrojovým ocelím konkurovat. Změna těchto poměrů je ovšem reálná, zejména za předpokladu, kdy by došlo k rozšíření využití perspektivních materiálů, rozšíření jejich výroby a tím i k poklesu ceny.

2.4 Opotřebení nástrojů určených k lisování žárovzdorných materiálů

Jak již bylo zmíněno, nástroje určené k lisování žárovzdorných materiálů jsou vystaveny extrémnímu silovému namáhání a s tím i extrémnímu abrazivnímu opotřebení. Z pohledu opotřebení je rozhodující etapou výroby žárovzdorných výrobků etapa lisování. Lisování žárovzdorných materiálů je spojeno zejména s vysokým tlakem, který je nutný pro zhutnění lisovaných materiálů na požadovanou kvalitu výrobku (až 100 MPa). Druhým zásadním faktorem je přítomnost tvrdých částic ostřiva Al_2O_3 a SiO_2 . Tyto částice, v kombinaci s vysokým tlakem, způsobují značné opotřebení funkčních částí lisovacího nástroje. Standardní lisovací nástroj určený pro lisování dinasových materiálů, tedy hutných křemičitých materiálů s vysokým obsahem SiO_2 , dosahuje standardně opotřebení 0,5 mm na vnitřním rozměru vyložení po cca 5000 kusech výlisků. Standardní lisovací nástroj určený pro lisování šamotových materiálů, tedy hutných hlinitých materiálů s vysokým obsahem Al_2O_3 , dosahuje standardně opotřebení 0,5 mm na vnitřním rozměru vyložení po cca 7000 kusech výlisků. Z pohledu opotřebení a z pohledu řešení této práce bude dále uvažován extrémnější případ opotřebení, tak jak je uvedeno na Obr. 2.19.



Obr. 2.19: Životnosti lisovacích nástrojů při použití dinasové lisovací směsi

Následně je nutné lisovací nástroj renovovat nebo vyrobit nový. Různorodost abrazivních procesů a zároveň nedostatečná znalost těchto procesů, v jejichž důsledku vzniká opotřebení lisovacích nástrojů, způsobují, že abrazivní opotřebení lze pouze velice obtížně pro konkrétní aplikaci dopředu stanovit, případně modelovat. Z toho důvodu, ale i z důvodu řádového zvýšení životnosti lisovacích nástrojů pro žárovzdorné materiály je kladen vysoký důraz na provedení zkoušek odolností materiálů proti opotřebení, které budou poskytovat objektivní informace o abrazivní odolnosti konstrukčních materiálů vůči abrazivním žárovzdorným materiálům.

3. Experimentální ověřování životnosti materiálů

lisovacích nástrojů a proces vzniku opotřebení

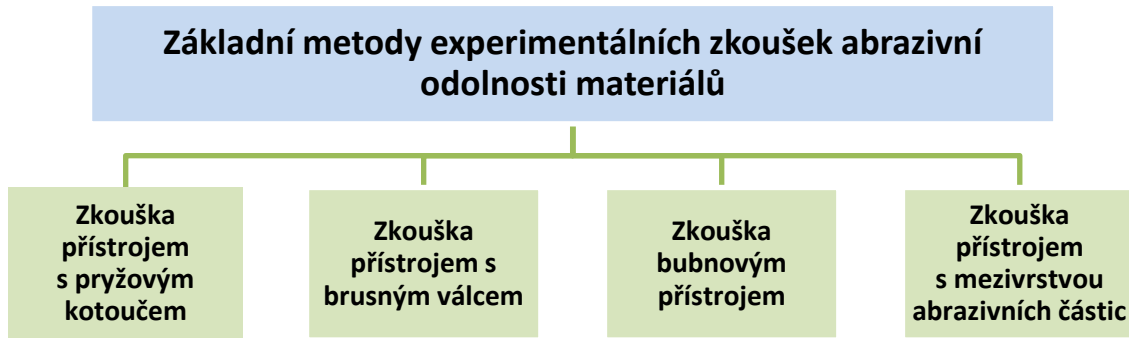
Jak již bylo zmíněno, abrazivní opotřebení je jedním z nejvýznamnějších druhů opotřebení v průmyslové praxi. V této souvislosti existuje velké množství experimentálních zkoušek abrazivní odolnosti materiálů používaných při konstrukci strojů a strojních částí. Hlavními důvody širokého spektra zkoušek je velké množství parametrů mechanismu vzniku opotřebení, které svým způsobem zásadně ovlivňují vznik a velikost výsledného opotřebení. Různé parametry jsou velice často spjaty s konkrétním případem v průmyslovém prostředí. Obecně lze zkoušky opotřebení rozdělit na dva základní způsoby, a to monitoringem, nebo experimentální zkouškou. Z pohledu monitoringu opotřebení reálného nástroje v provozním prostředí je možné získat výsledky, které přesně popisují danou problematiku mechanismu vzniku opotřebení, ovšem tyto data jsou z pravidla získána za vysokých nákladů, které jsou spojeny s opotřebení reálného lisovacího nástroje v reálném provozu. Data z monitorování reálného provozu jsou k dispozici většinou až po ukončení životnosti dané součásti. Z tohoto důvodu jsou tyto metody nevhodné pro porovnání životnosti lisovacích nástrojů. Obecně lze říci, že v průmyslovém prostředí se více používají metody laboratorní.

Pod tímto názvem si můžeme představit zkoušky opotřebení, které jsou realizovány prostřednictvím laboratorních zkušebních zařízení. Zkušební zařízení svým technickým řešením většinou odpovídají charakteru mechanismu vzniku opotřebení pro konkrétní případ. Této skutečnosti odpovídá i základní dělení experimentálních metod, které odpovídá způsobu zatěžování a uspořádání jednotlivých částí systému. Výstupní data z laboratorního experimentálního testování abrazivní odolnosti materiálů většinou nemají zcela přesnou vypovídající hodnotu, jako data získaná monitoringem reálného provozního opotřebení strojní součásti. Tato skutečnost je dána jednak vlastní konstrukcí laboratorního zařízení, ale i nutnou úpravou fyzikálních veličin či samotného procesu z důvodu proveditelnosti zařízení a udržení nákladů na výrobu a provoz zařízení v dostupných mezích. Dalším důvodem neobjektivních výsledků je také skutečnost, že konstrukce experimentálních zařízení je postavena tak, aby bylo možné simulovat co největší spektrum způsobů abrazivního opotřebení z pohledu nasazení strojních součástí v provozu. V následující kapitole budou popsány základní experimentální metody pro laboratorní určení abrazivní odolnosti materiálů.

3.1 Popis standardních ověřovacích metod

Opotřebení je vážným problémem v průmyslových odvětvích ražby, zemních prací, těžby a zpracování nerostných surovin. Snižování opotřebení se v průmyslové praxi řeší u nejrůznějších výrobků, jako jsou čepele buldozerů, zuby rypadel, vrtáky, drtiče, kolové mlýny, frézy, kalová čerpadla nebo i lisovací nástroje pro lisování výrobků z abrazivních materiálů. Opotřebení dílů, náklady na opravy a výměnu těchto dílů a prostoje související s těmito činnostmi, mají pro tuto průmyslová odvětví značné dopady na nákladovou strukturu jejich výrobků. Z velké části je provádění rozsáhlých testů opotřebení nákladné, náročné na práci a vyžaduje dlouhou dobu k dokončení a vyhodnocení. Z důvodu snížení nákladů na testování a zrychlení vývoje materiálů, byly vyvinuty laboratorní testy opotřebení. [17] Mnoho z těchto testů jsou obvykle specifické pro danou společnost či aplikaci a sestávají se z dat shromážděných po mnoho let. Tato data se pak používají ve spojení se zkušenostmi pro navrhování a výběr materiálů pro použití v produktových řadách v rámci dané společnosti. Tyto údaje však obvykle nejsou k dispozici široké veřejnosti. Ve výzkumném středisku Albany byla vytvořena sada laboratorních zkoušek abrazivního opotřebení s mechanismy opotřebení, které jsou charakteristické pro každý laboratorní test opotřebení. Byly shromážděny údaje o opotřebení různých ocelí odolných proti opotřebení, ocelí a kompozitů na bázi železa a vytvořeny jednoduché korelace mezi zkouškami a tvrdostí materiálů. [18]

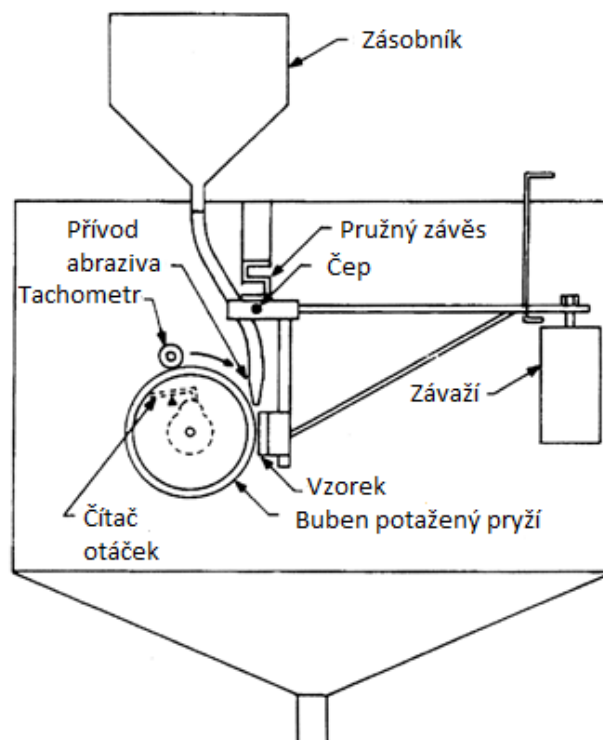
Procesy opotřebení abrazivem jsou typicky rozděleny do dvou základních režimů, a to za vysokého, nebo nízkého tlaku. Opotřebení s vysokým namáháním, ke kterému dochází např. v mlecích mlýnech, probíhá ve velmi malém kontaktu, kde částice abraziva jsou vháněny mezi mlecí kola nebo mezi mlecí kolo a vložkou mlýna. Vysoký kontaktní tlak způsobuje poškození povrchu a drtí a rozmělnuje částice abraziva. Tvrdé minerály, jako jsou oxidy křemíku, jsou schopné poškodit i martenzitické oceli, které mají mez kluzu v hodnotě až 3000 MPa. Opotřebení za nízkého tlaku nastává, když se lehce zatížené abrazivní částice pohybují po opotřebovaném povrchu. Laboratorní zkoušky abrazivního opotřebení jsou často klasifikovány podle typu použitého zkušebního zařízení. Tato zařízení lze obecně klasifikovat podle úrovně napětí a konstrukčního uspořádání komponent zařízení. [19] Pokud je zatížení dostatečně robustní pro drcení abrazivních částic, tak se následné opotřebení nazývá opotřebení při vysokém tlaku. Pokud se částice v experimentálním zařízení nenadrtní, tak se opotřebení nazývá při nízkém tlaku. Základní experimentální metody pro laboratorní určení abrazivní odolnosti materiálů jsou uvedeny na Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Základní metody experimentálních zkoušek abrazivní odolnosti materiálů

3.1.1 Zkouška přístrojem s pryžovým kotoučem

Metoda zkoušky přístrojem s pryžovým kotoučem (Dry-sand, Rubber-wheel Wear test - DSRW) je založena na principu přitlačování vzorku ve formě destičky na pogumovaný buben. Princip této metody je patrný z Obr. 3.2. Mezi vzorek a válec je přiváděno abrazivum, jež je unášeno po obvodu válce a tím dochází k opotřebování experimentálního vzorku. Zásadní podmínkou pro správnou funkci metody je využití dostatečně sypkého abraziva. Vlhkost směsi abraziva musí být kontrolována. Z tohoto důvodu se metoda jmenuje „Dry-sand“ – suchý písek. [18]



Obr. 3.2: Schéma zkouška přístrojem s pryžovým kotoučem [18]

Zařízení je složeno z ocelového kotouče potaženého pryží, o průměru 228mm a šířce 12,7mm. Dalším prvkem je zásobník na abrazivo, který je napojen trubkou na výstupní trysku. Propustnost výstupní trysky má být cca 250 – 350 g/min. Dalším stěžejním prvkem je počítadlo otáček bubnu. Experimentálním vzorkem je destička (destička 25x75 mm o tloušťce 3-13 mm), která je zatěžována závažím přes pákový mechanismus. Zkouška má dvě hlavní proměnné. První je počet otáček válce a druhá je přítlačná síla působící na vzorek. Kombinace těchto dvou proměnných tvoří 4 standardizované postupy zkoušek, které jsou uvedeny v Tab. 3.1. [18]

Tab. 3.1: Parametry používané u zkoušky přístrojem s pryžovým kotoučem [18]

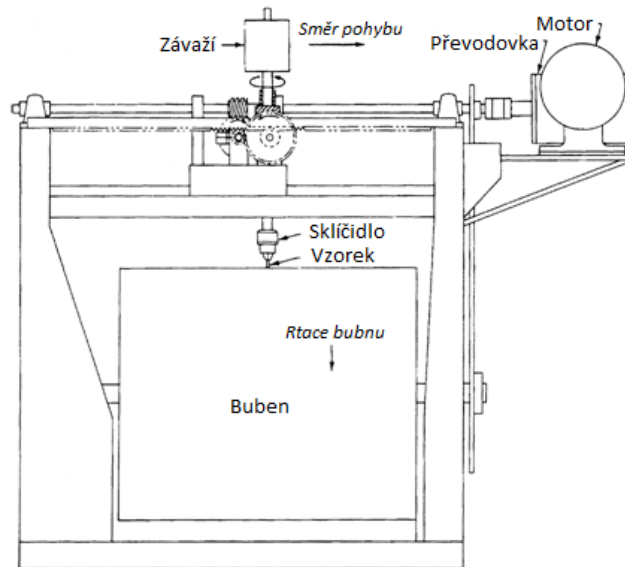
Typ zkoušky	Přítlačná síla [N]	Počet otáček	Opotřebená vzdálenost [m]
A	130	6000	4309
B	130	2000	1436
C	130	100	71,8
D	45	6000	4309

Metoda zkoušky přístrojem s pryžovým kotoučem je vhodná pro zkoušení abrazivní odolnosti u součástí používaných primárně v těžebním průmyslu. Pro tuto aplikaci se jedná se o jednoduchý a rychlý test s vysokou vypovídající hodnotou. Pro testování konstrukčních materiálů určených pro nástroje k lisování žárovzdorných materiálů není metoda vhodná z důvodu relativně nízké přítlačné síly a velké relativní rychlosti testu.

3.1.2 Zkouška přístrojem s brusným válcem

Metoda zkoušky brusným válcem (Pin-on-drum abrasive wear test - POD) je zaměřena na testování abrazivní odolnosti materiálů proti opotřebení a spadá do kategorie vysokonapěťových testů. Metoda je založena na principu pohybu konce vzorku (tvar válečku) po brusném papíře na povrchu válce. Princip metody je znázorněn na Obr. 3.3. Zkouška byla odvozena z podobného uspořádání zkušebního zařízení, tzv. Pin-on-disk, kde je jako vzorek využíván rovněž váleček, ale opotřebování vzorku je zprostředkováno pohybem po ploše pokryté brusným papírem. Zkušební vzorek se může pohybovat buď po kruhové, nebo spirálové dráze. Nevýhodami je, že v případě kruhové dráhy dochází k zanášení a opotřebení brusného papíru a v případě spirálové dráhy dochází ke změně rychlosti vzájemného pohybu systému vzorek-disk při konstantních otáčkách disku – tento vliv lze eliminovat řízením otáček disku. Experimentální zařízení fungující na principu POD obě nevýhody eliminuje. Složením rotačního pohybu válce a příčného pohybu vzorku ve směru osy válce je dosaženo konstantní vzájemné

rychlosti a nedochází k opotřebení brusného papíru pouze v jednom místě. Experimentální zkouška má 3 proměnné: zatížení (přítlačná síla) působící na vzorek, posuv ve směru osy válce a rychlost otáčení válce. Běžná hodnota zatížení je 66,7 N. Válec o $D=0,5$ m, pokrytý brusným papírem se otáčí rychlostí $1,7 \text{ m}^{-1}$, tedy obvodovou rychlostí 2,67 m/min. V rámci jedné otáčky dojde k posunutí vzorku o 12,7 mm ve směru osy válce. Zkušebním vzorkem při této experimentální zkoušce je váleček o průměru 6,35 mm a délce 20-30 mm. [18]

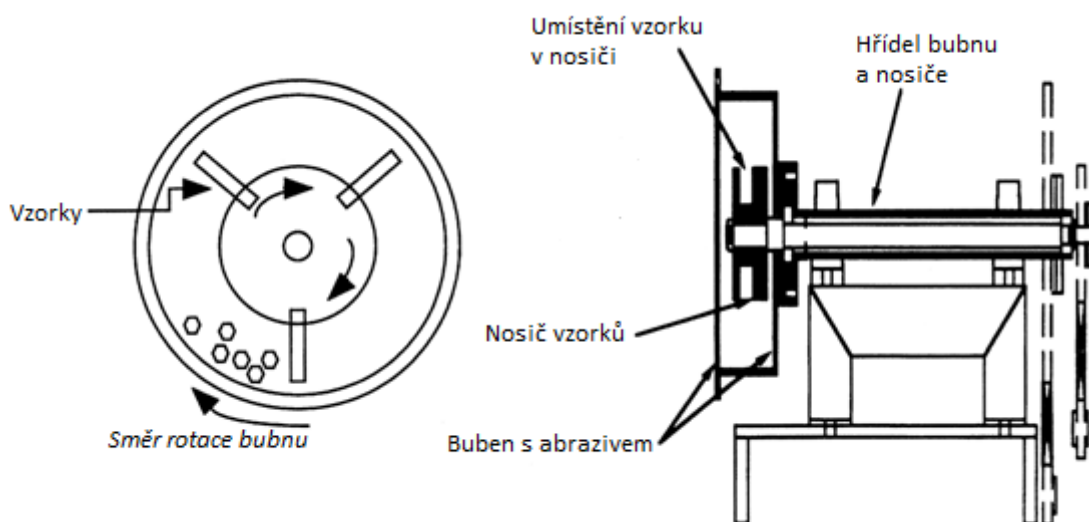


Obr. 3.3: Schéma zkoušky brusným válcem [18]

Metoda zkoušky brusným válcem je vhodná pro zkoušení abrazivní odolnosti u drobných strojních součástí zpracovatelského průmyslu. Pro tuto aplikaci se jedná o jednoduchý a rychlý test. Pro testování konstrukčních materiálů určených pro nástroje k lisování žárovzdorných materiálů není metoda vhodná z důvodu nízké přítlačné síly.

3.1.3 Zkouška bubnovým přístrojem

Experimentální zkouška bubnovým přístrojem (Impeller–tumbler impact abrasion test) je určená pro zkoušení abrazivní odolnosti povrchu materiálů vůči dopadajícími částicím (viz. náčrt zařízení na Obr. 3.4). Experimentální zařízení se skládá z dutého bubnu, ve kterém je umístěn abrazivní materiál a držák se vzorky. Každá část je uložena na vlastních ložiscích tak, aby mohly nezávisle na sobě rotovat kolem své osy. Každou součást pohání samostatná pohonná jednotka nebo hřídel s volitelnými výstupními otáčkami. Experimentální měření poté spočívá v rotaci obou částí stejným směrem, ale rozdílnou obvodovou rychlostí. Buben, který se otáčí pomaleji než držák se vzorky, je zevnitř potažen pryží tak, aby bylo dosaženo většího tření mezi bubnem a abrazivním materiálem. Rozdíl v rychlosti jednotlivých částí zařízení vytváří systém opotřebovávání vzorků jejich omíláním.



Obr. 3.4: Schéma zkoušky bubnovým přístrojem [18]

Zařízení má v držáku upevněny tři vzorky o rozměrech 75x75x12,5 mm. Při zkoušce držák rotuje rychlostí 620 min⁻¹. V bubnu je umístěn abrazivní materiál. Zkouška probíhá v intervalech, z nichž každý trvá 15 minut a po každém intervalu je vyměněn abrazivní materiál. Po proběhnutí 4 intervalů je zkouška ukončena a je posuzováno opotřebení vzorků. [18]

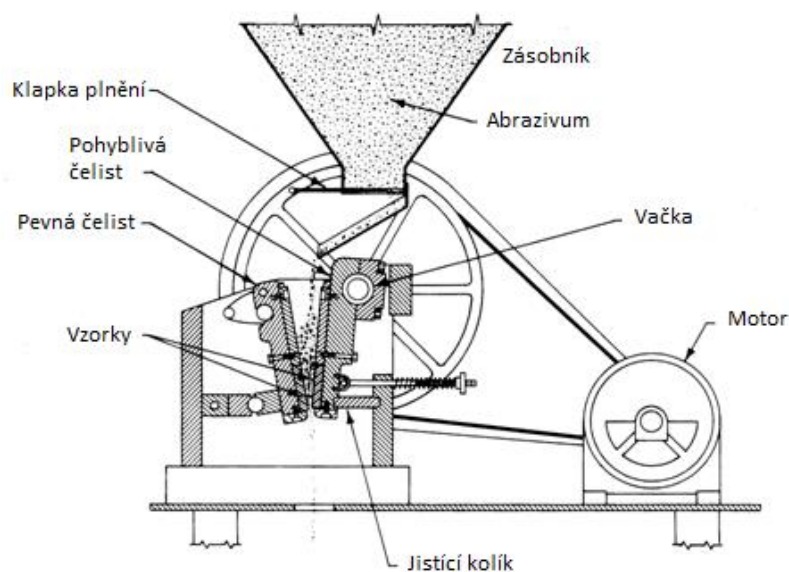
Metoda zkoušky bubnovým přístrojem je vhodná pro zkoušení abrazivní odolnosti u drobných strojních součástí zpracovatelského průmyslu, kde probíhá opotřebení způsobem omílání. Pro testování konstrukčních materiálů určených pro nástroje k lisování žárovzdušných materiálů je

metoda zcela nevhodná z důvodu nulové přitlačné síly abraziva na testovaný povrch a z důvodu principiálně jiného mechanismu vzniku opotřebení.

3.1.4 Zkouška přístrojem s mezivrstvou abrazivních částic

Experimentální metoda zkoušky přístrojem s mezivrstvou abrazivních částic (Jaw crusher gouging abrasion test) zkoušení abrazivní odolnosti materiálů simuluje procesy vznikající vzájemným posuvným pohybem vzorku a abrazivního materiálu, nebo dvou vzorků, mezi kterými se vyskytuje abrazivní materiál. Zkouška je mnohdy považována za nejpřesnější simulaci opotřebení těžce namáhaných strojních součástí, které přichází do styku s abrazivním materiálem. Schéma experimentálního zařízení je patrné z Obr. 3.5.

Experimentální zařízení je složeno ze dvou vzorků (destiček). První vzorek je ukotven na čepu a na táhlu s pružinou a vykonává vratný kyvný pohyb. Druhý vzorek je připevněn k čepu a klice, která přes pohonný mechanismus zajišťuje vzájemný posuvný pohyb obou vzorků. Materiály vzorků mohou být různé, ale mohou se také shodovat. Zařízení zobrazené na Obr. 3.5 pracuje s frekvencí 260 cyklů/minutu.



Obr. 3.5: Schéma zkoušky přístrojem s mezivrstvou abrazivních částic [18]

Výsledkem výše popsané zkoušky je poměrné opotřebení. Závěrem tedy není jasná informace o tom, jestli je možné pro konkrétní zadání objektivně porovnat zkoušené materiály s jinými materiály. To je způsobeno různými vlivy jednotlivých parametrů na abrazivní opotřebení součástí při různých aplikacích. Pro sestavení zkoušky za účelem přesného posouzení vlastnosti

materiálů je nezbytné provést zkoušku na několika různých vhodných materiálech. Další možností je sestavit, to se týká obecně testování abrazivní odolnosti, zařízení, které bude přesně simulovat mechanismy opotřebení konkrétní aplikace. [18]

Experimentální metoda zkoušky přístrojem s mezivrstvou abrazivních částic není z důvodu naprosto odlišného mechanismu vzniku opotřebení vhodná pro testování konstrukčních materiálů určených pro nástroje k lisování žárovzdorných materiálů.

Výše uvedené podkapitoly disertační práce mapují běžně dostupné experimentální zařízení a s tím spojené metody pro určování a porovnávání abrazivní odolnosti konstrukčních materiálů. Kromě výše zmíněných metod existuje v celosvětovém měřítku velké množství alternativních řešení a rozšíření k základním metodám, ovšem všechny tyto metody mají společného jmenovatele, a to, že výstupní data z testování abrazivní odolnosti materiálů většinou nemají zcela přesnou vypovídající hodnotu, jako data získaná monitoringem reálného provozního opotřebení strojní součástí, a to zejména z důvodu, že konstrukční řešení experimentálních zařízení je koncipováno tak, aby bylo možné simulovat co největší spektrum způsobů abrazivního opotřebení z pohledu nasazení strojních součástí v provozu. Negativní výstupy provedené rešerše dostupných testů abrazivních zkoušek jsou prvním předpokladem k vývoji vlastní experimentální metody testování abrazivní odolnosti konstrukčních materiálů určených pro lisování žárovzdorných materiálů.

3.2 Rešerše metod úprav povrchu pro zvýšení životnosti strojních součástí

V souvislosti se zvyšováním abrazivní odolnosti strojních součástí existuje velké množství metod úprav povrchu. V současné době jsou v průmyslu používány moderní výrobní technologie, u nichž jsou díky vysokým působícím napětím zvyšovány nároky na používané materiály výrobních strojů. Rozmanitost nových technologií i velikost působících napětí však rostou větším tempem, než počet materiálů, které jsou schopny vyhovět požadavkům konstruktérů, kontrolorů kvality finálních produktů, případně majitelům, kterým záleží na dlouhé životnosti výrobních zařízení. Tato problematika se týká zejména strukturálních materiálů vyrobených z materiálů na bázi železa. Přestože v oblasti metalurgie dochází stále k vyvíjení nových slitin i litin s lepšími mechanickými, chemickými a jinými vlastnostmi, stále existuje limit, kdy je nezbytné přistoupit ke zvýšení užitenosti prostřednictvím ochranných povlaků a vrstev, případně k některé ze speciálních technik úpravy povrchu.

V rámci disertační práce je procesem, před kterým je třeba chránit strukturální materiály, jejich otěr a abrazivní opotřebení. Cílem této části práce je vybrat materiál, případně úpravu povrchu, které zajistí významné zvýšení životnosti lisovacích ploch záložek, popřípadě razníků a trnů. Rozsah potenciálně vhodných materiálů je široký, zahrnuje kovové, keramické a cermetové materiály, včetně karbidů, boridů či nitridů některých kovů. Faktory, které je nutné při výběru vhodných materiálů zvažovat, se dají shrnout do následujícího seznamu [20]:

- Fyzikální, mechanické, chemické a strukturní vlastnosti vrstvy, její tvrdost, hustota, pórovitost, fázové složení, rozložení zbytkových napětí, mikrostruktura
- Odolnost vrstvy vůči působícím vlivům – otěru, značným vloženým napětím, případně momentům
- Kompatibilita vrstvy se základním materiálem, adheze k podkladnímu materiálu a koheze vrstvy
- Možnost vytvoření vrstvy na tvarově složitých a/nebo těžko dostupných plochách
- Finanční náklady, logistika a dostupnost dodavatelů vrstev

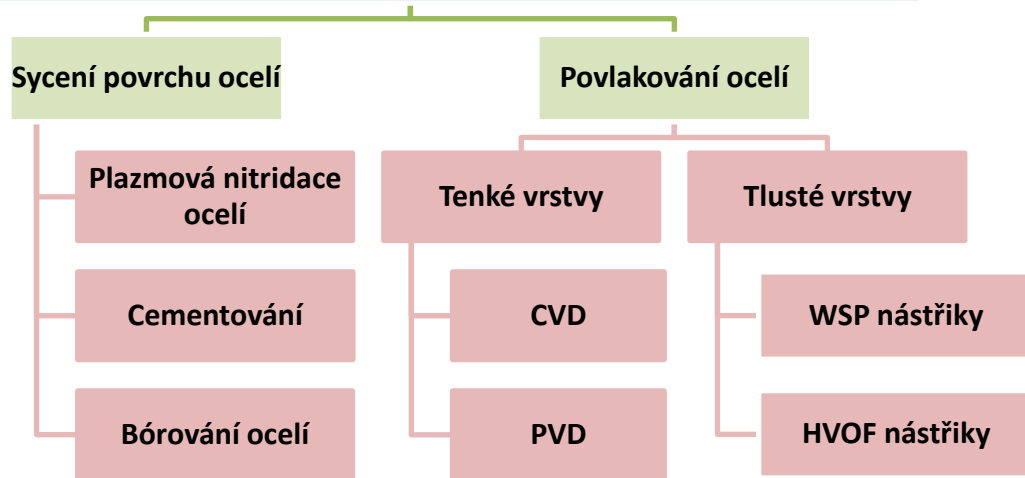
Ze seznamu také bezprostředně vyplývají experimentální metody zkoumání vrstev a povlaků. Například rentgenová difrakce může být využita pro určování stavu makroskopické zbytkové napjatosti, a to jak na povrchu, tak pod povrchem, zjištění přítomnosti krystalických fází, určení objemového podílu jednotlivých fází, určení podílu amorfní fáze nebo stanovení přednostní

orientace neboli textury vzniklých vrstev. Žádoucí je také využití elektronového rastrovacího mikroskopu (SEM – Scanning Electron Microscopy), k získání informací o mikrostruktuře povrchové vrstvy i přechodové oblasti vrstvy/základní materiál. Bude-li SEM doplněn o možnost stanovení prvkového složení metodou EDX (Energy Dispersive X-ray spectroscopy), bude se jednat o vhodné a žádoucí doplnění znalostí o fázovém složení. Dále je nezbytné měřit tvrdost a mikrotvrdost včetně jejich povrchové i hloubkové distribuce, sledovat drsnost a její vývoj s počtem vylisování, případně experimentálně změřit Youngův modul a Poissonovo číslo vrstev.

Při lisování žárovzdorných vysoce abrazivních materiálů působí lokálně značná napětí a abrazivní otěr. Při procesu lisování tvrdých materiálů, jako je korund, dochází k významnému zkrácení životnosti lisovacího nástroje. Výsledkem je proces vykazující jisté shodné prvky s indentací, kdy kromě pohybu ve směru vpichování dochází také k pohybu kolmému na tento směr. Dostupné zdroje v literatuře se komplexním opotřebením a abrazí nezabývají, nezbývá tedy než vycházet z materiálů doporučených pro aplikace snižující opotřebení. K nejčastěji zmiňovaným se počítají především dva cermety - karbid wolframu v kobaltové matici a karbid chromu v niklochromové matici a některé keramické materiály, nejvíce Al_2O_3 , Cr_2O_3 , případně některé kombinace oxidu hlinitého, například s oxidem titaničitým nebo oxidem chromitým. Následující text se zabývá nejen materiály, ale také metodami jejich přípravy.

Na Obr. 3.6 je uvedeno základní rozdělení metod úprav povrchu pro zvýšení životnosti strojních součástí. Zmíněné metody jsou využitelné pro úpravu povrchu lisovacích nástrojů. Jedná se o metody, kdy není nutná změna konstrukce lisovacích nástrojů, tedy metody sycení povrchu jednotlivých dílů lisovacích nástrojů a metody povlakování součástí pomocí tenkých vrstev. Druhou skupinou jsou metody termálních nástřiků, kdy ovšem z pohledu konstrukce lisovacích nástrojů bude nutné zcela změnit a přepracovat konstrukční prvky tak, aby bylo technologicky možné dosáhnout vhodné úpravy povrchu.

Metody úprav povrchu pro zvýšení životnosti strojních součástí



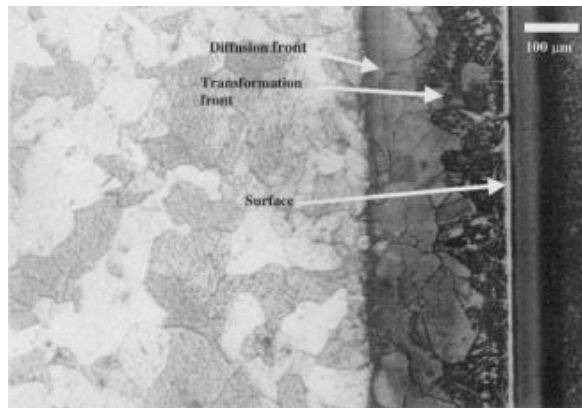
Obr. 3.6: Základní rozdělení metod úprav povrchu pro zvýšení životnosti strojních součástí

3.2.1 Sycení povrchu ocelí

Z pohledu stávající konstrukce lisovacích nástrojů se za účelem zvýšení jejich životnosti, nabízí procesy, při kterých současným tepelným a chemickým působením vznikají na povrchu ocelových součástí modifikované vrstvy. Tyto vrstvy, konkrétně s nitridy železa u procesu plazmové nitridace a boridy železa u boridování, se vyznačují několikanásobně vyšší tvrdostí ve srovnání s výchozím materiálem a také zvýšenou oteřuvzdorností. Procesy probíhají při teplotách přesahujících 500 °C, a proto bude klíčové zajistit tvarovou stálost, neboť nitridované a boridované součásti lze dále jen velmi obtížně opracovávat.

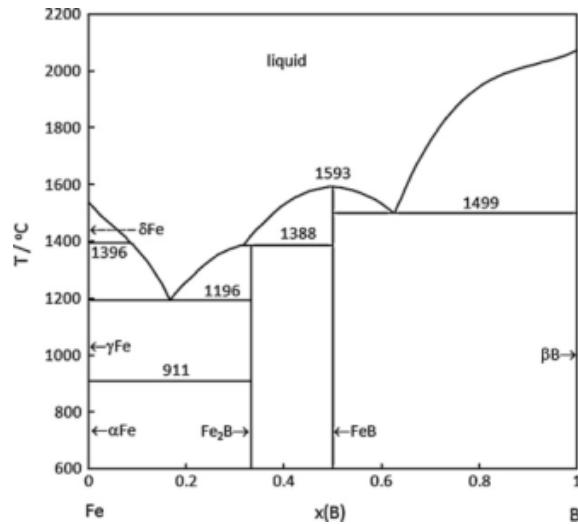
První metodou je plazmová nitridace ocelí. K nitridaci kovů lze využít plynný amoniak, případně solnou lázeň, tento odstavec se však věnuje průmyslově nejvíce využívanému procesu plazmové nitridace, která se někdy také označuje jako iontová nitridace. Při plazmové nitridaci je veden elektrický proud plynným dusíkem, přičemž stěna pece funguje jako anoda a nitridovaná součást jako katoda. Působením toku elektrického proudu dochází k anomálnímu výboji modro-fialové barvy, který stejnoměrně pokryje povrch nitridované součásti během procesu. Plazmová nitridace je tedy chemicko-tepelný proces, kdy na povrch nitridované součásti dopadají ionty dusíku, které dále difundují do materiálu díky koncentračnímu gradientu, nejčastěji ocelí a titanových nebo hliníkových slitin. Výsledkem procesu difuze dusíku do železa je modifikovaná povrchová a podpovrchová vrstva, která je z hlediska struktury tvořena nitridy

železa, především γ' -Fe₄N a ϵ -Fe₂₋₃N a jinými M_xN_y (často Cr_xN_y) precipitáty, jejichž zastoupení závisí na aktivitě plazmy, teplotě vzorku, jeho vstupní mikrostruktura a době nitridace. Obvyklá hloubka nitridované vrstvy je několik desítek mikrometrů s mnohem vyšší tvrdostí ve srovnání se základním materiálem (3 až 4 krát) [21]. Nitridy mají ve srovnání s α -Fe (kubické prostorově centrované železo) mnohem větší specifický objem, což má za následek vznik tlakových zbytkových napětí v nitridované vrstvě. Na rozhraní nitridované vrstvy a základního materiálu tato napětí přecházejí do tahových napětí, doprovodným jevem komplexního napěťového pole, v přechodové oblasti může být vznik trhlin [22, 23]. Pro nitridovanou vrstvu je charakteristická jemnozrná struktura patrná např. z Obr. 3.7. Tvrdost nitridovaných dílů však nedosahuje tvrdosti po procesu boridace, který je popsán v následujícím odstavci.



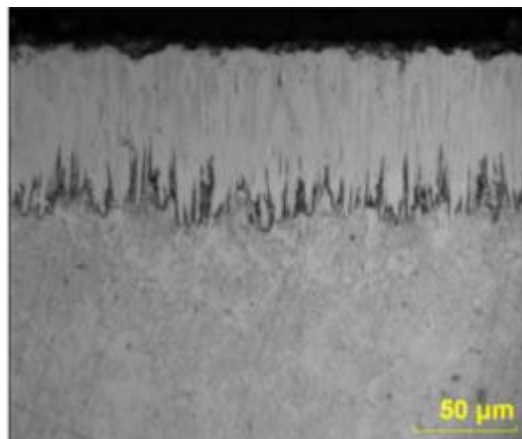
Obr. 3.7: Porovnání mikrostruktury základního materiálu a nitridované vrstvy slitiny Fe–5% Cr [24]

Druhou metodou, vhodnou pro lisovací nástroje, je metoda tak zvané bórování nebo boridace či boridování. Ta se řadí mezi nekonvenční technologie úpravy kovových povrchů, zejména ocelových a litinových, jimiž se zvyšuje jejich oteřuvzdornost a odolnost proti deformacím za tepla. Při procesu dochází k difuzi bóru do železného povrchu, kde bór vytváří s železem tvrdou sloučeninu. Atomy bóru jsou relativně malé a v železe se tedy mohou při difuzi rychle pohybovat. Vzniklá vrstva se vyznačuje nejen vysokou odolností proti abrazivnímu otěru, ale také malým sklonem k nalepování [25]. Podle fázového diagramu železo – bór (viz Obr. 3.8) mohou při reakci bóru se železem vznikat sloučeniny FeB (16,23 hm. % bóru) a Fe₂B (8,83 hm. % bóru). V závislosti na složení boridovacího prostředku, na vedení teplotního režimu a na době zpracování mohou vznikat jednofázové vrstvy (jen Fe₂B) nebo dvoufázové vrstvy (vně FeB, uvnitř Fe₂B). Jednofázová vrstva Fe₂B vykazuje výhodnější vlastnosti, protože borid Fe₂B je houževnatější, než je jen o málo tvrdší borid FeB.



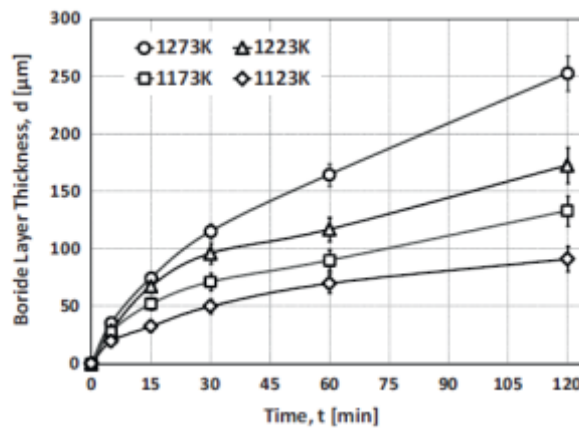
Obr. 3.8: Fázový diagram systém Fe-B [26]

Pro boridové vrstvy je charakteristické jejich zubové spojení se základním materiálem u nelegovaných a středně legovaných ocelí (viz Obr. 3.9).



Obr. 3.9: Typická zubovitá mikrostruktura vrstvy s boridy železa [27]

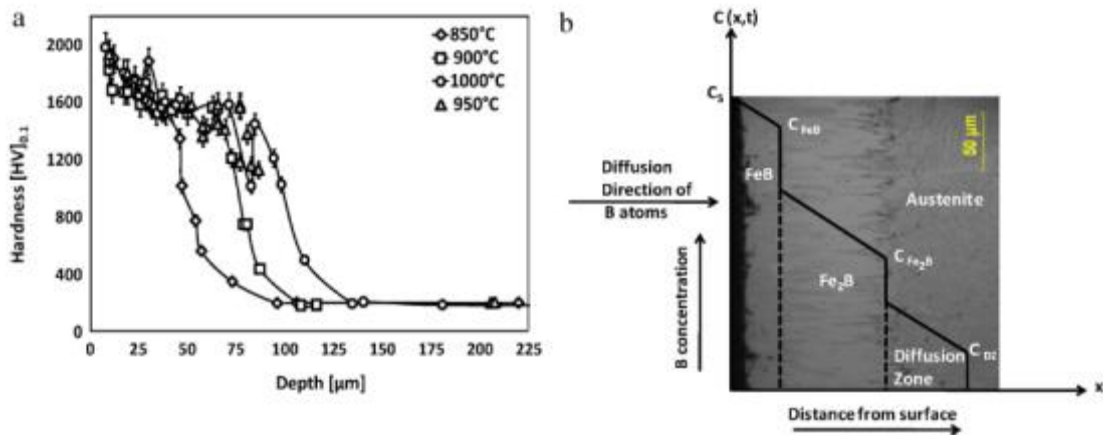
Dosažitelná síla boridové vrstvy je závislá na teplotě, době zpracování a na materiálu. Vývoj vrstvy závisí na stupni legování zvoleného materiálu, jak se vyvíjí tloušťka boridové vrstvy s teplotou a časem u nízko uhlíkové oceli AISI 1018 je znázorněno na Obr. 3.10.



Obr. 3.10: Vývoj tloušťky boridové vrstvy s časem při různých teplotách boridování nízkouhlíkové oceli [27]

Obecně většina legovacích prvků (C, Ni, Cr, atd.) představuje pro bórování překážku a výrazné zpomalení procesu, neboť při difuzi bóru mohou s bórem reagovat. Při konstantních podmínkách zpracování obvykle s narůstajícím obsahem legovacích prvků klesá míra zubového spojení a síla boridové vrstvy, naproti tomu se zvyšuje povrchová tvrdost. Při volbě materiálu existují dvě omezení, a to z hlediska obsahu křemíku, který nesmí být vyšší než 1 %, a obsahu hliníku, který by neměl být vyšší než 0,3 %. U takovýchto ocelí dochází k obohacování těchto prvků pod vytvářenou boridovou vrstvou, což vede k feritizaci. U bórování rychlořezných ocelí nastává problém s následným kalením, kdy austenitizační teplota leží nad teplotou 900 °C, při níž již dochází k natavování boridové vrstvy.

Nejvíce propracované je boridování v pevných prostředcích. Nově vyvinuté práškové boridovací prostředky zůstávají i po nasazení sypké a tím se značně usnadňuje vyjímání zpracovaných obrobků. K boridování se používají komorové pece, které umožňují odvod vznikajících zplodin, např. vytěšňováním pomocí argonu. Z důvodu vysoké tvrdosti vytvořené boridové vrstvy (až 1700 ± 200 HV, tedy ca 78 ± 2 HRC; viz Obr. 3.11) se zpravidla boridují hotově opracované díly. Pro díly citlivé na deformace se doporučuje uskutečnit před posledním mechanickým opracováním žíhání ke snížení pnutí. Teplota zpracování leží mezi 850 a 1 000 °C. Tloušťka boridové vrstvy závisí na zvoleném materiálu, teplotě a době zpracování a pohybuje se od 20 do 250 μm. Po uplynutí požadované doby zpracování se nádoby vyjmou z pece a zpravidla se ochlazují na vzduchu. Boridované obrobky se mohou zušlechťovat. Tím se dosáhne dobré únosnosti při vysokých hodnotách plošného tlaku a rovněž vysoké pevnosti. Ovšem austenitizační teplota musí ležet pod 1 050 °C, aby se předešlo natavování.



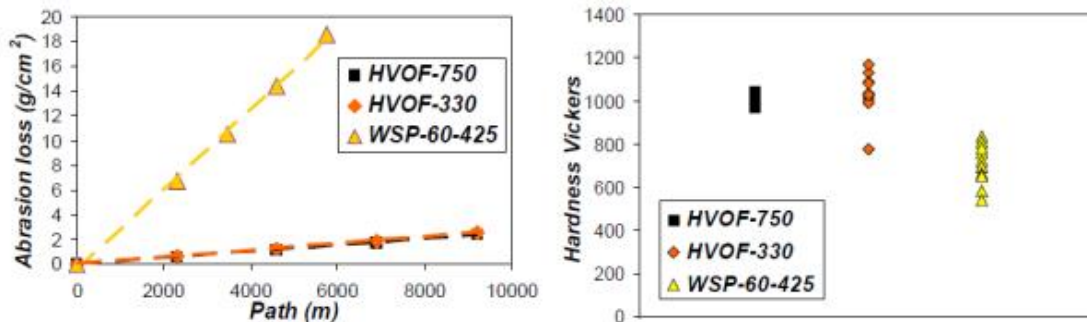
Obr. 3.11: Profil tvrdosti po boridování [27] nízkouhlíkové oceli po dobu 1 h při různých teplotách (a), hloubkový profil fázového složení po 1 h boridování při teplotě 950 °C (b)

Boridované obrobky se vyznačují vynikající ochranou při abrazivním namáhání, dobrou ochranou proti otěru, malým sklonem k nalepování, velmi vysokou tepelnou odolností. Na základě toho boridování nachází uplatnění zvláště při výrobě nástrojů, ve strojírenství a rovněž v technice těžebních a hnacích zařízení. Mezi aplikace patří například zvýšení životnosti vytlačovacích šneků termoplastických hmot vyztužených skleněnými vlákny, kde boridování nahradilo nitridování či navařování tvrdokovu.

3.2.2 Povlakování ocelí

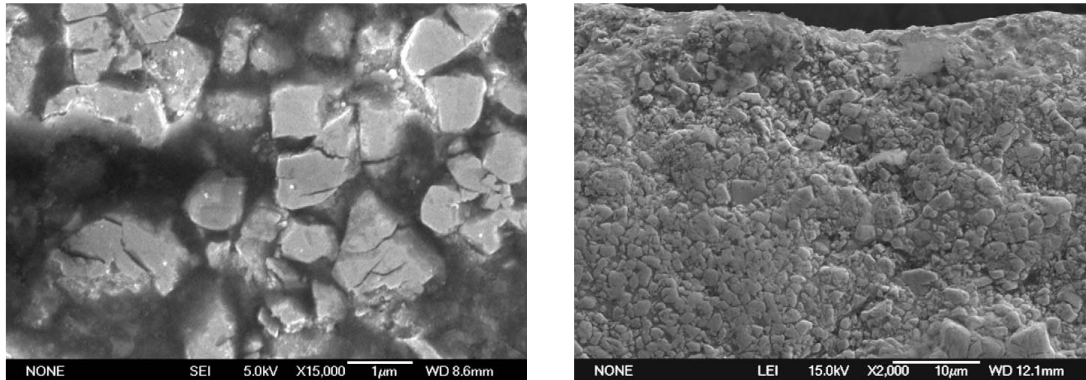
Deponování povlaků na kovové části již několik desítek let představuje jeden ze základních přístupů ke zvýšení korozní ochrany, odolnosti proti opotřebení. Použití několik mikrometrů tenkých vrstev, tak i řádově několik set mikrometrů tlustých nástřiků, vyplývá především z vysoké tvrdosti vybraných materiálů. Bude se jednat zejména o keramické vrstvy na bázi korundu, neboli tzv. α fáze Al_2O_3 , jehož tvrdost na Mohsově stupnici dosahuje čísla 9 (v jiných stupnicích kolem 1800 HV, případně ca 79 HRC), další z možných materiálů je Cr_2O_3 s tvrdostí na Mohsově stupnici kolem 8 až 8,5 (v jiných stupnicích kolem 1600 HV, případně ca 76 HRC). Kromě těchto dvou základních materiálů, lze v rámci zkoušek použít také další keramické materiály na bázi ZrO_2 . Všechny tři výše zmíněné materiály lze nanášet metodou WSP (Water Stabilized Plasma – nástřik pomocí vodou stabilizovaného plazmového hořáku), ovšem ve struktuře vzniklého nástřiku nebude v případě Al_2O_3 pouze korund, ale také jiné metastabilní a měkčí fáze. Al_2O_3 má několik krystalických fází, kromě korundu (α fáze) se vyskytuje v několika fázích obvykle označovaných jako fáze přechodové nebo metastabilní. [28] V literatuře jsou

dostupné informace také o stříkání Al_2O_3 metodou HVOF (High Velocity Oxy-Fuel – Vysoko rychlostní nástřik plamenem), výsledná struktura je homogennější, ovšem obsahuje také tyto metastabilní fáze. Nicméně tvrdost je vyšší než v případě WSP nástřiku, s menším rozptylem (viz Obr. 3.12) a HVOF nástřik má také mnohem lepší otěruvzdorné vlastnosti. V tomto experimentu byla také měřena rychlost částic dopadajících na podložku, u WSP činila 83 m/s a u HVOF 849 m/s.



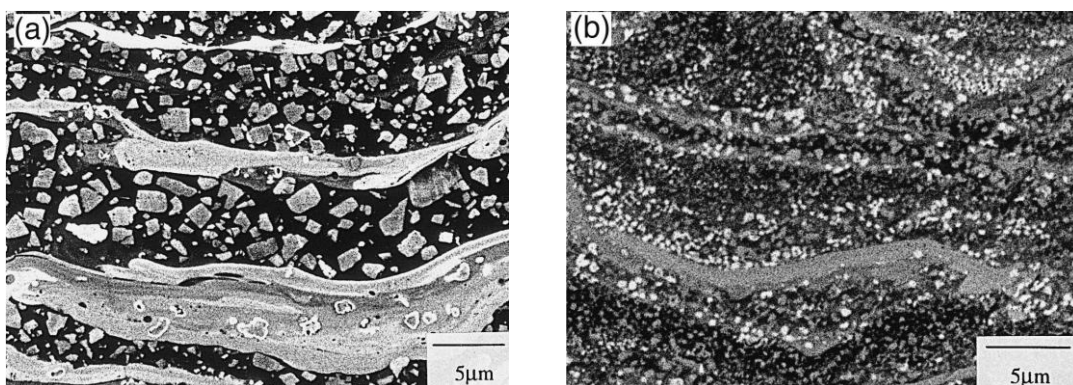
Obr. 3.12: Srovnání HVOF a WSP nástřiků na bázi Al_2O_3 ; vlevo srovnání otěruvzdornosti při tzv. „slurry abrazion“ testu, vpravo srovnání tvrdosti [29]

Vynikajících výsledků ve vztahu k otěruvzdornosti vykazuje karbid wolframu WC s hexagonální strukturou, jehož teplota tání je 2 870 °C a který je z hlediska tvrdosti srovnatelný s korundem. Jako ochrana proti otěruvzdornosti se nejčastěji používá ve dvou formách. Je-li WC připraveno tzv. sintrováním z kapalné fáze (liquid-phase sintering), má výsledná plocha podobu mozaiky složené z jednotlivých destiček. V druhém případě se WC nanáší na podložku jako nástřik metodou HVOF. Vzhledem ke skutečnosti, že při této technice nanášení lze částice WC velmi těžko plně roztavit, je ve vstupním prášku kromě WC také cobalt či chróm, a to v obou případech méně než 20 %. Po vstupu do plamenu dojde k roztavení kovových částic a výsledný nástřik je tvořen částicemi WC v matrici, obvykle amorfni, Co nebo Cr a jedná se tedy o tzv. cermet. Jako cermety (CERamic + METal) se označují kompozity kovových a keramických materiálů, původně vyvinuté v Německu za 2. světové války a po válce s úspěchem rozvíjené v USA. Oblast jejich uplatnění byla v prostředí s vysokými teplotami a vysokými působícími napětími, což byl případ u některých částí raketových motorů. Po delším používání tohoto kompozitního nástřiku dochází díky otěru Co nebo Cr matrice k obnažení WC zrn (viz Obr. 3.13). Rozdíl mezi oběma formami WC je také ve fázovém složení. Zatímco se u sintrovaných destiček WC vyskytuje fáze W_2C spíše výjimečně, je u HVOF nástřiků prakticky pravidlem. Významnou roli u WC nástřiku hraje velikost karbidových zrn ve vstupním prášku.



Obr. 3.13: Mikrostruktura WC-12Co nástřiku po opotřebení [30], vlevo povrch a vpravo příčný řez nástřikem

U standardních prášků je velikost WC zrn několik jednotek nebo desítek mikrometrů, u dražších nanokrystalických je velikost karbidových zrn menší než 100 nm, porovnání výsledných HVOF nástřiků je na Obr. 3.14. Nejvyšší v literatuře udávaná průměrná tvrdost nástřiku WC-Co je 2050 HV [31] a blíží se tedy vlastní (intrinzičné) tvrdosti karbidu wolframu (2000-2400 HV). Tento nástřik byl nanesen tzv. „Cold spray“ technologií (jedná se o technologii kinetického nanášení funkčních vrstev nebo-li nízkoteplotní nástřik) a vyznačoval se také velmi nízkou porozitou. Pokud je kinetická energie částic výchozího materiálu při tvorbě nástřiku významnější než tepelná, označuje se tento proces jako tzv. „Cold spray“ [32]. V nástřiku byly pouze krystalické fáze WC a Co a tvrdost WC zrn byla v rozsahu od 2200 do 2500 HV.



Obr. 3.14: Mikrostruktura HVOF nástřiku prášku se standardním (a) a nanokrystalickým (b) WC [33]

Mezi další materiály odolné abrazi, které by mohly být ve formě nástřiku nanášeny na razníky a záložky lisovacího stroje, lze zařadit také karbidy chromu. Ve formě HVOF nástřiku se jedná o systém $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, vstupní prášek je nejčastěji 75hm.% $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25hm.% (Ni20Cr)}$. Výhodou nástřiku s karbidem chromu je jeho mnohem lepší odolnost vůči korozi a oxidaci, zejména při vyšších teplotách, ve srovnání s WC.

Zmíněné keramické a cermetové vrstvy mají dobré předpoklady být úspěšnými kandidáty pro zvýšení životnosti lisovacích nástrojů, jejich úspěch je však do značné míry závislý na výsledné struktuře a mikrostruktuře povlaku, jeho adhezi k ocelovému podkladu a na mechanických vlastnostech. Dále je vzhledem k některým specifickým řešené problematice potřebná velmi nízká drsnost vzniklého povrchu ($R_a = 1\mu\text{m}$), povlaky by měly být dále opracovatelné, např. broušením či frézováním, a případně také renovovatelné. Vše s ohledem na celkovou finanční náročnost výroby lisovacího nástroje s povlakem a jeho životnost ve srovnání s lisovacím nástrojem bez povlaku.

Vzhledem k některým specifickým tvarům záložek či trnů, je třeba zvážit i povlakování těchto částí tenkými vrstvami. V této oblasti existuje celá řada kandidátů. Díky své vysoké tvrdosti mezi ně patří nitrid a karbid titanu, které na Mohsově stupnici dosahují tvrdosti 9 až 10, dále karbid křemíku či kubický nitrid bóru (CBN). Poslední dva jmenované materiály se nejčastěji připravují sintrováním a jejich nanášení na ocelové části metodami HVOF či WSP je prakticky vyloučeno, neboť oba se vyznačují absencí teplotního intervalu mezi pevnou a plynnou fází a přímo sublimují. SiC při teplotě ca 2700 °C a CBN při téměř 3000 °C.

3.2.3 Povlakování ocelí tenkými vrstvami

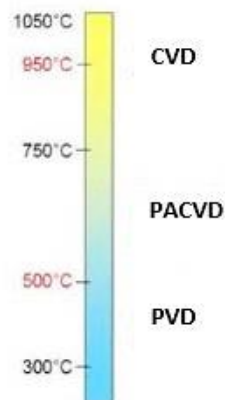
Tenká vrstva je pojem užívaný pro materiál o tloušťce přibližně mezi 0,1 nm a 10 μm , která je vytvořená na základním materiálu (substrátu). Ve strojírenství se jedná o povrchovou úpravu materiálů, pro zvýšení jejich životnost. V závislosti na předpokládaném použití, jsou tenké vrstvy z kovů, anorganických sloučenin, organických sloučenin nebo z biologických molekul. Proces nanášení neboli depozice tenké vrstvy musí být optimalizován tak, aby uspořádání atomů umožňovalo vrstvě plnit své funkce. Tenká vrstva společně se substrátem dosahuje specifických vlastností a chování. Tenké vrstvy mají odlišné vlastnosti od objemových materiálů a to nejen z důvodu své tloušťky, ale také kvůli způsobu depozice.

Tenké vrstvy lze získat různými metodami přípravy, které zaručují jiné vlastnosti a strukturu výsledné vrstvy. Základní metody depozice jsou fyzikální, někdy označované jako vakuové, a chemické. Mezi fyzikální patří např. napařování a napařování. Čím vyšší vakuum se při depozici dosáhne, tím je menší pravděpodobnost primární oxidace nanášené vrstvy. Obecně lze říci, že fyzikálními metodami se dosahuje velmi čistých vrstev v relativně velkém rozmezí tlouštěk.

Chemická metoda depozice (CVD – Chemical Vapor Deposition - Chemická depozice vrstev z plynné fáze) využívá chemické reakce v plynné fázi. Plyny přivedené do komory spolu chemicky

reagují a výsledný prvek či výsledná sloučenina se poté usadí na substrátu. CVD metodou se připravují odolné vrstvy s dobrými parametry přilnavosti a teplotní stability. Z důvodu využívání plynné fáze se mohou touto metodou povlakovat tenkou vrstvou těžko dostupné dutiny nebo tvarově velmi složité plochy. Přestože je tato metoda finančně nenáročná, což z ní činí vhodný nástroj pro použití ve velkovýrobě, je pro řadu substrátů naprosto nepoužitelná z důvodu nutnosti vysokých teplot (viz Obr. 3.15), při kterých již substrát začíná měnit svůj tvar či jinak degradovat. CVD metoda je vhodná pro přípravu vysoce čistých vrstev např. tantalu, titanu, wolframu, apod.

Další chemická metoda je metoda PACVD (Plasma Assisted CVD), což je metoda CVD používající plazmu. Pokud se zvýší energie v plynové komoře za vzniku plazmy, umožní to usazování vrstev již za nižší teploty, než u CVD. Lze tedy pracovat se širším sortimentem podkladních materiálů, touto metodou však již nelze dosáhnout tak čistých prvků jako u CVD.



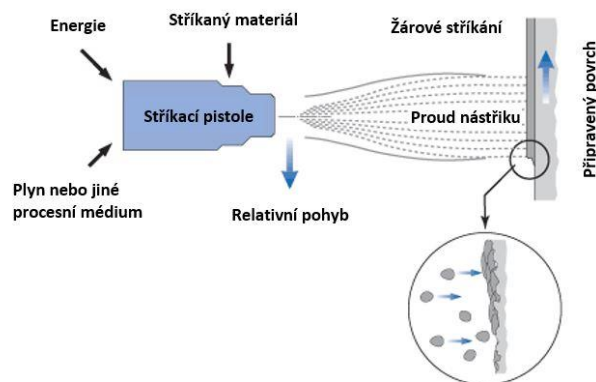
Obr. 3.15: Základní metody nanášení tenkých vrstev [34]

Vrstvy nanesené metodou PVD (Physical Vapor Deposition - Nanášení povlaků odpařením z pevné fáze) jsou odolné a mají nízký koeficient tření. PVD metoda pracuje při nízkých teplotách, ale za vysokého vakua, její princip spočívá v převedení materiálu do plynné fáze a nanesení na základní materiál. Naprašovací metoda používá nanášený materiál jako katodu, kde je jeho povrch bombardován ionty plynu. Výsledný prášek je poté odprašován na substrát. Největší užití má metoda ve strojírenství, kde jsou součástky vystaveny velkému tření, zejména vrtáky, šrouby, ložiska, apod. Parametry a zkušenosti s uplatnění metody PVD ve strojírenství z ní jednoznačně činí jednu z nejlepších úprav povrchu zejména tvarově složitých ploch lisovacích nástrojů, jejichž broušení by vyžadovalo značné finanční a technické nároky.

Jako perspektivní materiály pro zvýšení životnosti lisovacích nástrojů se z oblasti tenkých vrtev jeví vrstvy z materiálů titan karbid (TiC), který je velmi často používaný jako tenkovrstevný ochranný materiál. Má vysoký bod tání, vysokou tvrdost, tepelnou vodivost, i odolnost proti nárazům, což je při procesu lisování výhodné. Dalším možným materiálem je titan nitridu (TiN), který se ve strojírenství používá na řezné a brusné nástroje.

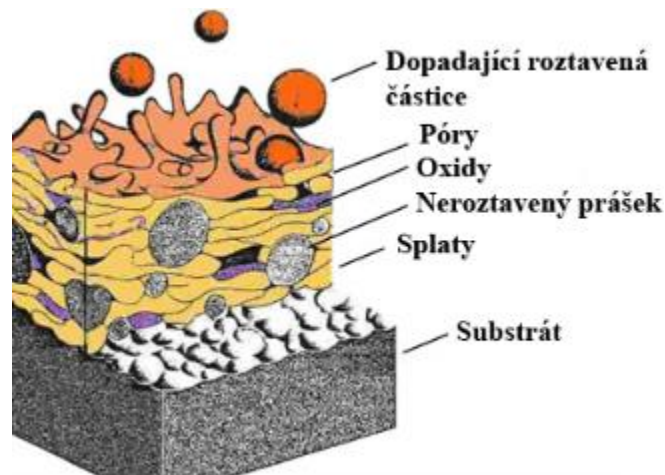
3.2.4 Povlakování ocelí tlustými vrstvami

Jako povlakování ocelí tlustými vrstvami je pro účel disertační práce označováno nanášení vrstev pomocí tzv. termických nástřiků. Termické nástřiky označované také jako žárové nástřiky jsou běžně využívány ke zlepšení povrchových vlastností celé řady průmyslových zařízení. Nástřiky, případně ochranné povlaky, z moderních materiálů, tj. speciálních legovaných ocelí, intermetalik, keramik, případně cermetů jsou nanášeny na běžně dostupné a relativně lehce obrobitelné konstrukční materiály, zejména oceli [35]. Pestrost dostupných procesů a technik žárového stříkání umožňuje značnou variabilitu výsledné mikrostruktury a fyzikálně-chemicko-mechanických vlastností nástřiků včetně jejich finanční náročnosti [36] [37] [38] [39]. Pojem žárové stříkání označuje nanášení dodatečného materiálu na povrch podložky tím způsobem, kdy materiál ve formě prášku, tyče, suspenze, či roztoku je přiváděn do stříkacího zařízení, kde prostřednictvím koncentrovaného zdroje tepla dochází k jeho zahřání do zcela roztaveného nebo jen změkklého stavu, jenž je dále unášen směrem k substrátu (viz Obr. 3.16).



Obr. 3.16: Princip žárového stříkání [40]

Dopadající částice se na podložce rozstříknou a rychle přechází do tuhého stavu, přičemž se vytváří typická lamelární mikrostruktura žárových nástřiků (viz Obr. 3.17). Jako analogie „rozstříknutí“ částice může dobře sloužit proces dopadu dešťové kapky [41].



Obr. 3.17: Schematicky znázorněná mikrostruktura plazmového nástřiku [42]; originál této kresby je uložen v Tate Gallery v Londýně

Po dopadu hmota částic rychle tuhne a vytváří základní strukturální element žárového nástřiku, tzv. „splat“. Rychlost tuhnutí dosahuje díky velké teplotní kapacitě substrátu rychlosti $10^6 - 10^8 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ v závislosti na parametrech procesu [43] [41]. Rychlé ztuhnutí může vést i vytvoření amorfních, částečně nebo plně krystalických nebo metastabilních fází [44] [45]. Kromě „splatů“ je mikrostruktura žárových nástřiků charakteristická významným podílem strukturálních nehomogenit, zejména pórů, trhlin a oblastí nedostatečného spojení [46]. Vlastní „splaty“ nejsou analogií krystalitů v polykrystalickém materiálu, ale samy představují polykrystal složený z jemných sloupcových či rovnoosých krystalitů [47], z čehož vyplývá anizotropie nástřiků včetně přítomnosti přednostní orientace neboli textury. Důsledkem anizotropie je nutnost popisu nástřiku, jeho struktury a vlastností v několika směrech. Součástí komplexní reálné struktury a mikrostruktury jednoho „splatu“ mohou být vysoké koncentrace vakancí, dislokací a trhlin. V případě stříkání kovových materiálů je často pozorován vznik oxidických fází na povrchu stříkaných částic a jsou-li tyto fáze nežádoucí, je třeba zvolit stříkací proces ve vakuu, v inertním plynu, případně při tzv. „shroudingu“ neboli ofukováním podložky inertním plynem. Dále mohou být v mikrostruktuře žárových nástřiků obsaženy neroztavené částice výchozího prášku, případně nečistoty. Typické rysy mikrostruktury nástřiků jsou schematicky ilustrovány na Obr. 3.17.

Tepelná energie pro proces stříkání může být generována chemicky, typicky spalováním paliv s kyslíkem nebo vzduchem, nebo použitím elektrické energie [43]. Materiál je rozptýlen a unášen směrem k substrátu procesním plynem nebo stříkacím proudem vytvářeným tryskami. Přehled procesů žárového stříkání je na Obr. 3.18, rozdělení může být provedeno na základě zvážení

charakteru částic při jejich pohybu k podložce nebo konfiguraci stříkacího zařízení. Např. u plazmového stříkání je jejich označení definováno způsobem řízení procesu stříkání a nastavením plazmatronu; proto hovoříme o atmosférickém plazmovém stříkání (APS - Atmospheric Plasma Spraying) nebo nízkotlakém plazmovém stříkání (LPPS - Low Pressure Plasma Spraying) a obě techniky jsou dále děleny na plynem stabilizované (GPS – Gas-stabilized Plasma Spraying) a vodou stabilizované (WSP - Water Stabilized Plasma spraying) plazmové stříkání podle média, ze kterého plazma vzniká. Výsledkem je však skutečnost, že vlastnosti nástřiků deponovaných různými procesy žárového stříkání mohou být významně odlišné [48] [49] [50].

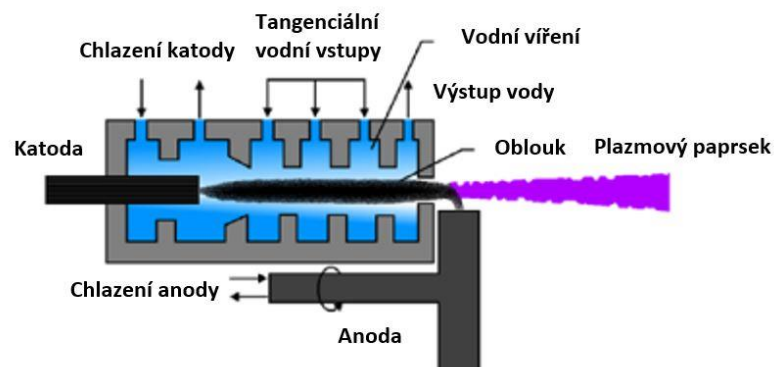


Obr. 3.18: Přehled procesů a technik žárového stříkání [51]

Žárové nástřiky jsou považovány za povlaky definované tím, že stříkaný materiál je přidán k podkladnímu materiálu (typicky ocelový dílec), přičemž typicky dochází k malému nebo nevýznamnému směšování mezi nástřikem a podkladním materiálem při depozici, zejména díky rychlému ochlazení částic nástřiku [43]. Ve srovnání s povlakováním tenkých vrstev z předchozí kapitoly 3.2.3, je pro žárové nástřiky typická mnohem větší rychlost depozice s výslednou tloušťkou nástřiku od jednotek mikrometru do několika milimetrů. U PVD a CVD povlaků je typická tloušťka několik mikrometrů. Žárové stříkání je charakterizováno celou řadou technologických parametrů ovlivňujících výslednou strukturu, mikrostrukturu a fyzikálně-chemicko-mechanické vlastnosti nanášených vrstev.

WSP nástřiky

V plazmovém žárovém stříkání je výchozí materiál injektován do proudu plazmy vznikajícím v plazmovém hořáku. Plazma je generována ionizací plazmo-tvorného média v elektrickém oblouku. Plazma-tvorné médium současně stabilizuje tok plazmatu, čímž vzniká proud plazmatu. Ke stabilizaci plazmatu mohou být použity dva hlavní principy, jedná se zejména o stabilizování axiálním tokem plynu, kdy hovoříme o GSP neboli plynem stabilizovaném hořáku nebo lze využít tzv. vodní stabilizaci založenou na představě uzavření proudu plazmy ve vodním (párovém) víru na základě principů Gerdiena a Lotze [52]. Druhý způsob stabilizace plazmy byl implementován na Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i., kde jsou vodou stabilizované plazmatrony WSP vyvíjeny od 70. let minulého století [53].



Obr. 3.19: Řez vodou stabilizovaným plazmatronem [54]

V systému WSP je plasma tvořena z částečně vypařeného víru vodu rotujícího v obloukové komoře kolem elektrického oblouku mezi dvěma elektrodami. Katoda je tvořena grafitovou tyčí a anodu představuje vnitřně chlazený měděný disk. Umístění anody je mimo obloukovou komoru ve směru odchozího ventilu. Tento anodový disk rotuje z důvodů snížení tepelného zatížení a významné koroze elektrody v atmosféře obsahující kyslík [54]. Schematická ilustrace WSP plazmatronu je na Obr. 3.19.

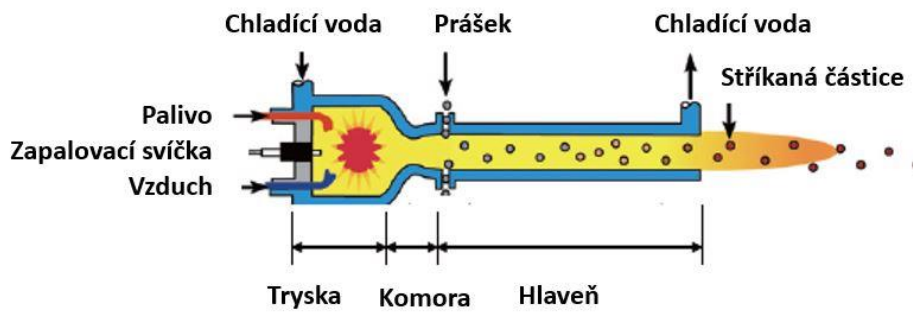
Elektrická energie oblouku se disociuje a ionizuje vypařující se vodou, čímž vzniká proud plazmy opouštějící WSP hořák odchozím ventilem. Tok plazmy je charakterizován extrémně vysokou entalpií, která je o řád vyšší, než je dosaženo u plynem stabilizovaných plazmových hořáků. Entalpie je jedním ze čtyř základních termodynamických potenciálů a charakterizuje tepelnou energii uloženou v jednotkovém množství látky. Je dána součtem vnitřní energie U a součinem $p \cdot V$, kde p je tlak a V objem termodynamického systému. Entalpie je dána principem generování

plazmy v oblouku stabilizovaném kapalinou a je doprovázena vysokými rychlostmi toku a malou hustotou plazmy. Teplota plazmového toku může přesáhnout 25 000 K. Z parametrů WSP systému vyplývají speciální charakteristiky plazmového stříkání s tímto plazmatronem, zejména velké rychlosti podávání vstupního materiálu, vytváření nástřiků z materiálů, které mají vysoký bod tání.

HVOF nástřiky

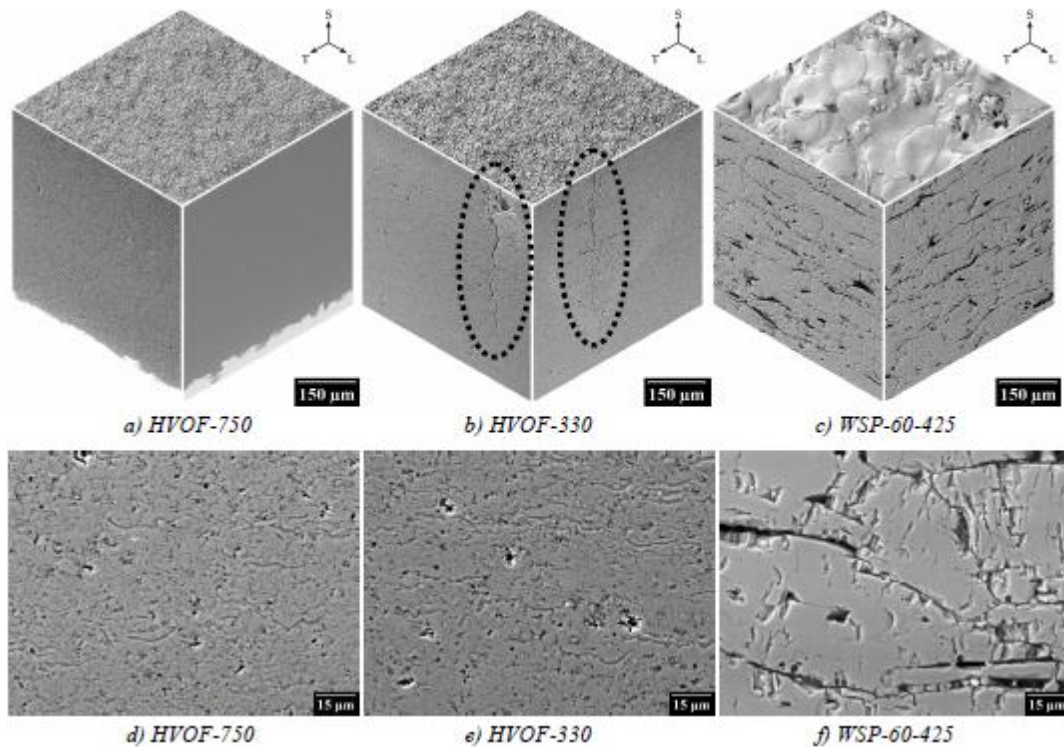
Metoda High-Velocity Oxygen Fuel (HVOF) využívá speciální hořák (viz Obr. 3.20), kde dochází k hoření směsi kyslík – palivo, které může být kapalného či plynového skupenství. Jako kapaliny se nejčastěji využívá zejména kerosin, z plynů zejména propylen, propan, acetylen, metan, zemní plyn a vodík. Vznikající spaliny ve formě teplého plynu s tlakem blízkým 1 MPa jsou dále urychleny v trysce na nadzvukové hodnoty (dvoj až trojnásobek rychlosti zvuku), až do 1200 km/h. Materiál ve formě prášku je za pomoci nosného plynu přiváděn do plamene, kde dojde k jeho natavení a výraznému urychlení (až 1000 m/s) směrem k povrchu povlakované součásti. Vysoká rychlost částic prášku při dopadu způsobí dokonalé rozprostření a zakotvení částic k substrátu, z čehož se odvíjí vysoká hustota, homogenní mikrostruktura a dobrá adheze i koheze nanášených povlaků [43]. Ve většině případů relativně nízká teplota plamene omezuje metodu pro nanášení kovových povlaků, neboť u keramických materiálů nedojde k dostatečnému natavení částic prášku během letu a tím pádem ani k rozprostření po dopadu na základní materiál. Nízká teplota na druhou stranu zabraňuje oxidaci, fázovým přeměnám a vyhořívání některých prvků nanášeného materiálu v průběhu povlakování. Proces HVOF je úspěšně využíván pro nanášení cermetových materiálů a některých korozi odolných vysoce legovaných ocelí. Pro srovnání budou ještě uvedeny typické hodnoty vybraných parametrů procesů a nástřiků WSP a HVOF:

- Rychlost částic v letu je u WSP od 50 do 150 m/s, u HVOF od 200 do 1000 m/s
- Rychlost podávání vstupního prášku je u WSP až 2 kg/min, u HVOF 15 až 20 g/min, z čehož vyplývá také výrazně větší cena HVOF nástřiků, která činí obvykle dvou a více-násobek ceny u plazmového stříkání APS nebo WSP
- Hustota u WSP nástřiků se pohybuje od 85 do 95 % v závislosti na parametrech a jen výjimečně přesahuje hodnotu 95 %, HVOF naopak mají typicky více než 95% hustotu
- Tloušťka u WSP nástřiků se pohybuje od 0,2 do 10 mm, HVOF typicky 0,1 až 0,2 mm



Obr. 3.20: Řež HVOF hořákem [55]

Srovnání mikrostruktury WSP a HVOF nástřiků je na následujícím Obr. 3.21 a navazuje na Obr. 3.12, které srovnávaly tvrdost a otěrvzdornost nástřiků na bázi HVOF.



Obr. 3.21: Mikrostruktury WSP a HVOF nástřiků; snímky z elektronového rastrovacího mikroskopu [29]

Z pohledu disertační práce budou experimentálně testovány všechny výše zmíněné metody pro úpravu povrchu experimentálních vzorků.

3.3 Úvodní zkoušky materiálů na základě výsledků standardních metod testování

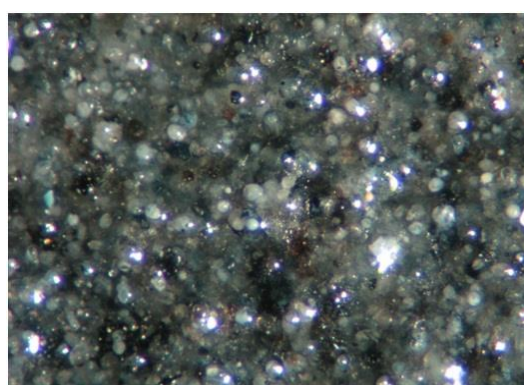
V návaznosti na úvodní rešerši dostupných metod pro testování abrazivní odolnosti konstrukčních materiálů popsané v předešlé kapitole, byla provedena také základní rešerše metod pro zvyšování abrazivní odolnosti materiálů. Výstupem této rešerše bylo určení, jako vhodné metody pro zvýšení abrazivní odolnosti povrchu materiálů lisovacích nástrojů, metody termických nástřiků. Dále byla provedena rešerše vhodných nástřikových technologií a materiálů pro zvýšení životnosti materiálů lisovacích nástrojů. Na základě této rešerše byly prostřednictvím Ústavu fyziky plazmatu AV ČR (Akademie věd České Republiky) tyto technologie zkoušeny v úvodní sérii testů, kde byl povrch lisovacích nástrojů opatřen nástřikem metodou WSP (Water-Stabilized Plasma). Cílem těchto zkoušek bylo ověřit, zda je možné danou technologií zvýšit abrazivní odolnost konstrukčních částí lisovacích nástrojů pro jejich následné použití pro lisování žárovzdorných materiálů. Metodou WSP bylo v první fázi vyrobeno celkem 12 vzorků pro aplikaci WSP nástřiků. Zkušební vzorky svojí konstrukcí vycházely z reálných lisovacích nástrojů. Konstrukce lisovacího nástroje zůstala nezměněna. Vnitřní dílce lisovacího nástroje, které jsou přímo v kontaktu s lisovaným materiálem, se nazývají odbornou terminologií záložky lisovacího nástroje. Těchto dílců záložek jsou v jednom lisovacím nástroji 4 kusy. To znamená, že vzorky pro aplikaci WSP nástřiku byly rozděleny do skupin vždy po 4 kusech a následně byly označeny jako TYP1, TYP2, TYP3. Cílem toho testu aplikace vysoce abrazivně odolného keramického nástřiku bylo ověření možnosti zvyšování životnosti lisovacích nástrojů a zároveň kvantifikace nákladů na jeden poloprovozní test.

3.3.1 Realizace úvodních zkoušek

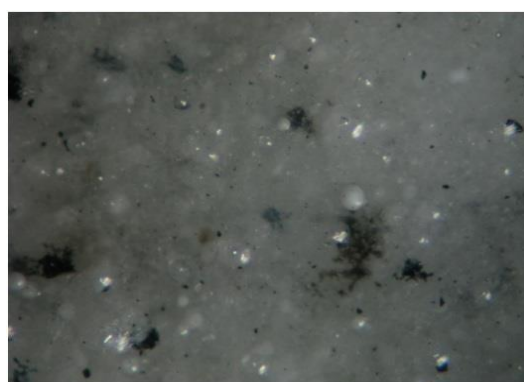
Prvním krokem realizace zkoušek aplikace WSP nástřiku byla výroba a příprava vzorků. Vlastní příprava vzorků před nástřikem, která byla realizována na Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, spočívala v odmaštění a tryskání povrchu vzorků. Na takto upravené vzorky byly následně aplikovány různé keramické nástřiky, označené jako AH, ZR a EC (Tab. 3.2 a Obr. 3.22 a Obr. 3.23) o stanovené tloušťce vrstvy 0,6 mm. Pro porovnání profilu povrchu jednotlivých vzorků opatřených nástřiky byly analyzovány i referenční vzorky PMV a PMH (Obr. 3.24) vyráběné konvenčními technologiemi. Tyto referenční vzorky představovaly současný stav povrchu lisovacích nástrojů. [56]

Tab. 3.2: Materiálové složení nástřiků jednotlivých hnízd pro úvodní experiment [56]

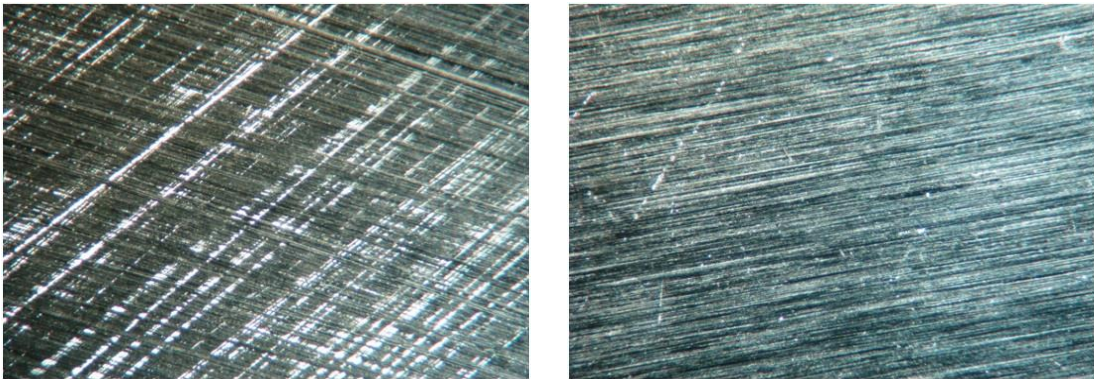
Označení vzorku	Základní materiál	Povrchová úprava (materiál)
AH	55NiCrMoV7	96%Al ₂ O ₃ +3%TiO ₂ +1%Fe ₂ O ₃
ZR	55NiCrMoV7	ZrSiO ₄
EC	55NiCrMoV7	ZrO ₂ +SiO ₂ +Al ₂ O ₃
PMV	55NiCrMoV7	Referenční povrch používaný v současné době
PMH	55NiCrMoV7	Referenční povrch používaný v současné době



Obr. 3.22: Vzorek AH a povrch vzorku AH pod mikroskopem (zvětšení 120x) [56]



Obr. 3.23: Povrch vzorku EC a povrch vzorku EC pod mikroskopem (zvětšení 120x) [56]

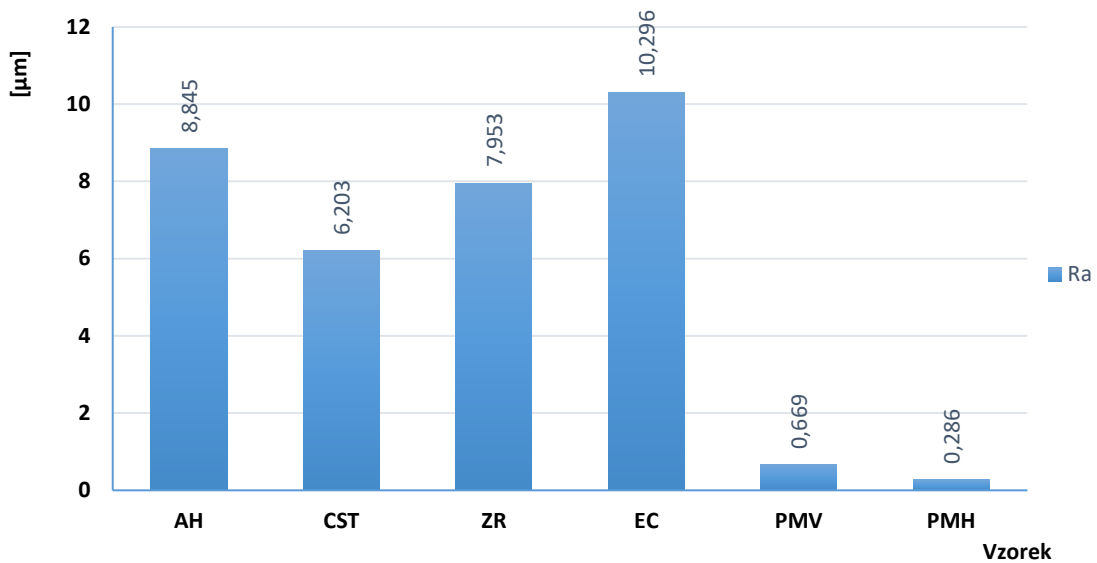


Obr. 3.24: Povrch vzorku PMV a Povrch vzorku PMH pod mikroskopem (zvětšení 40x) [56]

Rozdíl ve struktuře povrchu vzorků vyrobených metodou WSP a referenčních broušených povrchů je patrný z výše uvedených obrázků. Vzorek PMV byl broušen na svislé rovinné brusce BPV 60 a vzorek PMH byl broušen na rovinné brusce BRH 40.

3.3.2 Výsledky a závěry měření

Na experimentálních vzorcích vyrobených v rámci úvodních zkoušek, byla provedena analýza drsnosti povrchu. Výsledky analýzy drsnosti povrchu jednotlivých vzorků jsou uvedeny v Obr. 3.25. Z výsledků je zřejmý rozdíl drsnosti povrchu experimentálních a referenčních vzorků. Z pohledu parametrů drsnosti byl zvolen parametr R_a (střední aritmetická úchylka profilu), jehož hodnota u experimentálních vzorků s nástřikem je zhruba 6-10 krát větší, oproti referenčním vzorkům vyrobeným standardní výrobní technologií a bez povrchové vrstvy.



Obr. 3.25: Výsledky analýzy drsnosti povrchu

Povrch s těmito parametry povrchu je z hlediska funkčnosti lisovacího nástroje nevhodný. Pro použití v lisovacím nástroji je nutná hodnota parametru R_a maximálně $0,8 \mu\text{m}$. Z tohoto důvodu byly následně experimentální vzorky broušeny na požadovanou drsnost $R_a = 0,8 \mu\text{m}$. Poté byla provedena montáž lisovacích nástrojů opatřených experimentálním povrchem. A následně byla provedena poloprovozní zkouška těchto lisovacích nástrojů. Výsledky tohoto úvodního experimentu jsou shrnuty v Tab. 3.3.

Tab. 3.3: Vyhodnocení výsledků

Označení vzorku	Základní materiál	Tvrdot základního materiálu	Povrchová úprava (materiál)	Životnost
AH	55NiCrMoV7	$63 \pm 2\text{HRc}$	96%Al ₂ O ₃ +3%TiO ₂ +1%Fe ₂ O ₃	20 zalisování při 35 bar
ZR	55NiCrMoV7	$63 \pm 2\text{HRc}$	ZrSiO ₄	20 zalisování při 35 bar
EC	55NiCrMoV7	$63 \pm 2\text{HRc}$	ZrO ₂ +SiO ₂ +Al ₂ O ₃	20 zalisování při 35 bar

Z výsledků experimentu je možné konstatovat, že již po úvodním spuštění lisovacího procesu byla ochranná experimentální vrstva na exponovaných místech lisovacího nástroje kompletně porušena. Dále je možné konstatovat, že ani jedna vrstva nástřiku neodpovídá možnosti použití

při lisování žárovzdorných materiálů na bázi šamotu, jelikož po odlisování 20 tvarovek vykazovaly všechny funkční díly lisovacího nástroje vysoký stupeň opotřebení. Dalším výstupem experimentu je také skutečnost, že pro provedení zkoušek bylo nutné vyrobit experimentální lisovací nástroje v hodnotě v řádu stovek tisíc Kč, blokovat výrobní kapacitu lisovacího zařízení a spotřebovat lisovaný materiál, což přináší značné náklady spojené s poloprovozním ověřením funkčních povrchů. Z experimentu vyplývá, že ani jeden nástřik neodpovídá kvalitativním požadavkům a trvanlivosti nástroje pro lisování žárovzdorných tvarovek.

3.4 Závěry kapitoly a motivace pro další řešení

Na základě provedené rešerše experimentálních zkoušek abrazivní odolnosti materiálů (viz kapitola 3.1), rešerše metod úprav povrchu pro zvýšení životnosti strojních součástí (viz kapitola 3.2), a úvodních poloprovozních zkoušek provedených na standardním výrobním zařízení (viz kapitola 3.3), byl vyhodnocen dosavadní stav poznání v oblasti lisování žárovzdorných materiálů a dále byly zváženy všechny výhody a nevýhody stávajících experimentálních metod pro ověřování abrazivní odolnosti materiálů a tím rozhodnuto o dalším směru vlastního vývoje. Z dostupných výsledků poloprovozních zkoušek je patrné, že stávající metody experimentálního ověřování životnosti strojních zařízení, nejsou schopny simulovat extrémní podmínky, kterým musí odolávat reálný lisovací nástroj určený pro lisování žárovzdorných materiálů. Dalším faktorem jsou nutné náklady spojené s prováděním poloprovozních testů na skutečném výrobním zařízení. Tyto dva faktory, náklady a nevhodná vypovídací schopnost standardních testů odolnosti, pak vedou k vlastnímu vývoji nové experimentální metody pro určování abrazivní odolnosti materiálů při extrémních podmínkách, tak jako při lisování žárovzdorných materiálů. Cílem dalšího vývoje je tedy vyvinout experimentální zařízení, které umožní testovat materiály za provozních podmínek ovšem za diametrálně odlišných nákladů na provedení provozních testů.

4. Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je na základě teoretického základu a experimentálního měření navržení metody pro experimentální ověření životnosti lisovacích nástrojů odpovídající reálnému lisovacímu cyklu při lisování žárovzdorných výrobků pomocí hydraulického lisu.

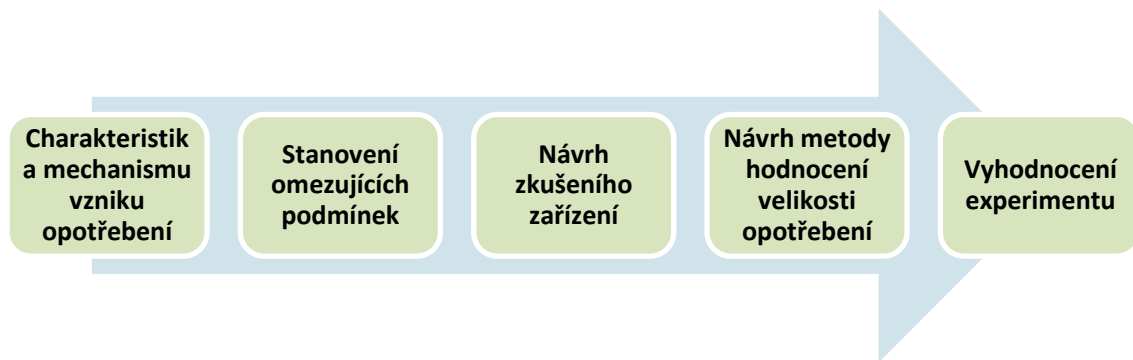
K dosažení tohoto cíle jsem samotné řešení disertační práce rozdělil do následujících dílčích cílů:

1. Charakteristika a popis mechanismu vzniku opotřebení při lisování žárovzdorných materiálů
2. Vlastní návrh metody pro experimentální ověření životnosti lisovacích nástrojů určených pro lisování žárovzdorných materiálů
3. Realizace experimentálního výběru materiálů a jejich reálná aplikace pro lisovací nástroje určené pro lisování žárovzdorných materiálů
4. Dosažení řádově vyšší životnosti lisovacích nástrojů

5. Návrh metody experimentálního ověřování životnosti odpovídající reálnému lisovacímu cyklu

Hlavní motivací vývoje nové metodiky pro testování životnosti lisovacích nástrojů byly zejména vysoké náklady na provozní zkoušky na reálných zakázkách, nevhodnost použití standardních testů z důvodu nemožnosti simulace extrémních podmínek v reálném provozu, zkrácení délky testů na hranici 5 sekund pro jeden cyklus (na běžném hydraulickém lise je délka cyklu cca 40 sekund) a také vypovídající a porovnatelné vyhodnocení opotřebení.

Základním krokem pro návrh nové metodiky pro ověřování odolnosti lisovacích nástrojů proti opotřebení je stanovení jasného postupu činností, viz Obr. 5.1.



Obr. 5.1: Postup činností

V prvním kroku je nutné se zabývat vlastní charakteristikou mechanismu vzniku opotřebení lisovacích nástrojů. Dále je nutné stanovit omezující podmínky nové experimentální metody. Na základě analýzy a omezujících podmínek bude proveden návrh zkušebního zařízení včetně návrhu metody hodnocení velikosti opotřebení a v závěru bude provedeno vyhodnocení experimentu formou porovnání s velikostí opotřebení produkčních lisovacích nástrojů s referenčním vzorkem, který jim odpovídá.

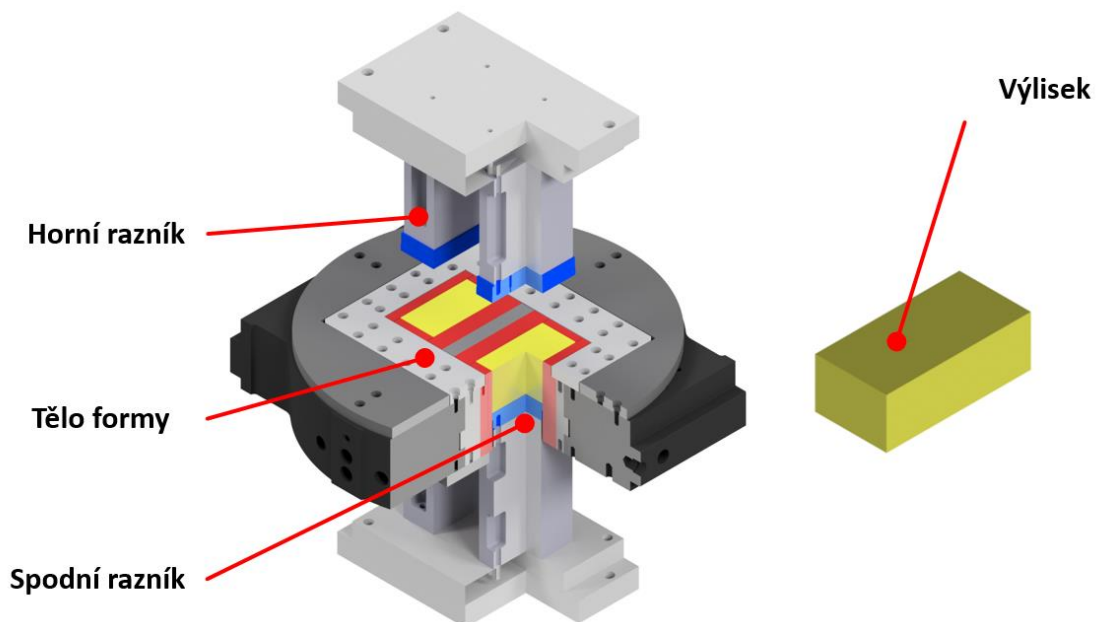
V následujícím textu jsou popsány jednotlivé činnosti spojené s vývojem nové metodiky pro hodnocení abrazivní odolnosti materiálů.

5.1 Charakteristika mechanismu vzniku opotřebení

Tato část disertační práce je zaměřena na popis mechanismu vzniku opotřebení na nástrojích určených pro lisování vysoce abrazivních materiálů. Z důvodu terminologie a úvodu do problematiky bude nejdříve popsán lisovací nástroj a jeho části, dále pak jeho standardní materiálové složení a bude následovat vlastní charakteristika mechanismu vzniku opotřebení při lisování a na závěr této podkapitoly pak bude popsána standardní životnost lisovacího nástroje.

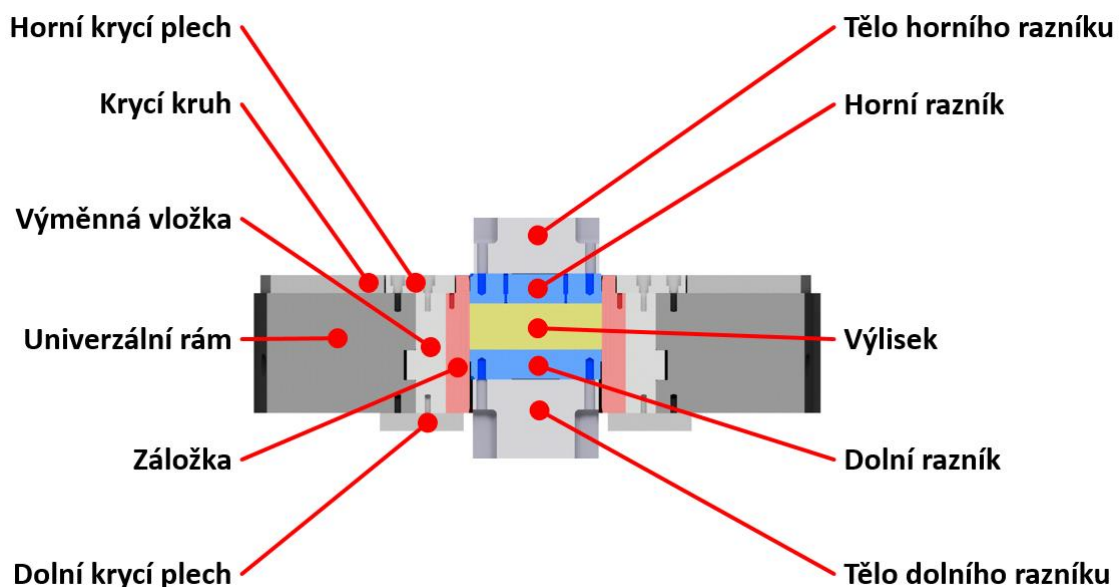
5.1.1 Lisovací nástroj

Pro lisování žárovzdorných materiálů, pomocí hydraulických či jiných lisů, se běžně v celosvětovém měřítku používají ocelové lisovací nástroje, tak zvané formy. Současně používané ocelové materiály pro výrobu ocelových forem budou stručně popsány níže v této kapitole. Alternativou ke kovovým lisovacím nástrojům jsou pak dřevěné formy, případně formy z jiných, speciálních materiálů. Nástroje z jiných materiálů, než je ocel, se ovšem využívají pouze pro malé série výrobků, pro výrobky speciálně tvarované případně ze speciálních materiálů. Výroba tvarovek ve dřevěných formách probíhá ručně, případně s využitím jednoduchého strojního vybavení. Ocelový lisovací nástroj pro lisování vysoce abrazivních žárovzdorných materiálů se skládá ze tří základních částí, viz Obr. 5.2 . [57]



Obr. 5.2: Příklad ocelového lisovacího nástroje a výlisku [57]

Ocelový lisovací nástroj se skládá ze tří základních částí, které jsou znázorněny na předchozím obrázku. První částí je horní razník, který vykonává hlavní lisovací pohyb. Dále se lisovací nástroj skládá z dolního razníku, který slouží jako opora hornímu razníku při předlisování a lisování, a dále pak při dolisování, kdy se pohybuje proti pohybu horního razníku. Dolní razník také slouží k vyrážení vylisované tvarovky z dutiny lisovacího nástroje. Poslední částí, ze které se skládá lisovací nástroj, je tělo formy, které slouží jako opora radiálním tlakům při lisování a také, spolu s razníky, vytváří povrch, finální tvar a rozměry tvarovky. Tělo nástroje je z hlediska kvalitativních parametrů výlisku tím nejdůležitějším prvkem lisovacího nástroje. V následujícím textu je proveden rozbor jednotlivých částí těla lisovacího nástroje. Pro ilustraci je na Obr. 5.3 uveden schématický řez lisovacím nástrojem.

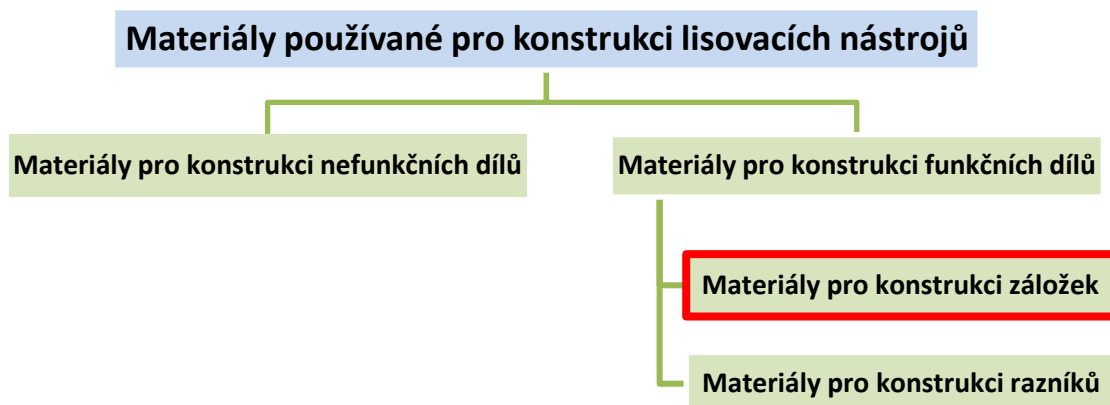


Obr. 5.3: Schématický řez lisovacím nástrojem [57]

Hlavním stavebním dílcem lisovacího nástroje je univerzální rám, na obrázku je znázorněn šedou barvou. V tomto případě se jedná o rám univerzální o rozměrech 500 mm x 400 mm x 200mm. Na rám je pomocí šroubů připevněn z horní strany krycí kruh, který je určen k zamezení propadu lisovaného materiálu okolo nástroje. Dalším prvkem jsou horní krycí plechy, které slouží, stejně jako krycí kruh, k zamezení propadu lisovaného materiálu okolo nástroje ale hlavně k fixaci vnitřních dílů v rámu při samotném lisování a vyrážení výlisku. Posledními vnějšími díly jsou dolní krycí plechy, které nemají za funkci zamezení propadu lisovaného materiálu do nástroje, ale pouze fixují vnitřní díly v rámu formy ve fázi lisování.

Další díly ocelového lisovacího nástroje se nacházejí pod krycím kruhem a krycími plechy. Ve směru od rámu do středu nástroje na rám přímo navazují výměnné vložky, jejichž hlavní funkcí je zmenšení vnitřních rozměrů rámu a dále pak slouží k přenosu axiálních i radiálních lisovacích sil do rámu. Pro další popis je nyní vhodné pokračovat od osy nástroje směrem k rámu. V ose nástroje dochází k lisování žárovzdorného materiálu, který je přímo v kontaktu se záložkami. Posledním dílem jsou distanční plechy, které jsou do formy vkládány bez nutnosti fixace a vymezují tak prostor mezi výměnnými vložkami a záložkami. Tyto dílce jsou vyráběny a vkládány do lisovacího nástroje až při finální montáži, a proto nejsou součástí výkresové dokumentace. Z pohledu disertační práce a také z pohledu životnosti lisovacích nástrojů jsou nejdůležitější právě funkční dílce lisovacích nástrojů, jako jsou záložky a razníky.

Z obecného pohledu lze říci, že pro konstrukci lisovacích nástrojů se používají dvě základní skupiny konstrukčních materiálů. Rozdělení materiálů je uvedeno na Obr. 5.4. Jedná se o skupinu materiálů určených ke konstrukci nefunkčních dílů lisovacího nástroje, kde je kladen důraz na nízkou pořizovací cenu a dobrou obrobiteľnost. Jako nefunkční díly lisovacího nástroje lze chápat díly jako je rám, výměnné vložky, těla razníků, krycí kruh nebo krycí plechy. Tyto díly jsou konstruovány z uhlíkových ocelí. Druhou kategorií jsou materiály určené ke konstrukci funkčních dílů lisovacího nástroje, kde hlavní roli při jejich výběru hraje odolnost vůči opotřebení.



Obr. 5.4: Materiály používané pro konstrukci lisovacích nástrojů

Jako funkční díl lisovacího nástroje lze chápat díl, který přichází do kontaktu s lisovaným abrazivním materiálem. Dle Obr. 5.3 je patrné, že těmito díly jsou horní a dolní razník a záložky. Pro konstrukci funkčních dílců lisovacího nástroje se používají nástrojové oceli. Jako konstrukční materiál pro výrobu záložek se standardně používají legované nástrojové X210Cr12 (ČSN 19436, EN 1.2080 [3]) a X210CrW12 (ČSN 19437, EN 1.2436 [3]). Jako konstrukční materiál pro výrobu

razníku se standardně používá materiál 55NiCrMoV7 (ČSN 19663, EN 1.2714 [3]). Chemické složení a materiálové vlastnosti těchto konstrukčních materiálů určených pro výrobu funkčních dílců lisovacích nástrojů jsou uvedeny v Tab. 5.1.

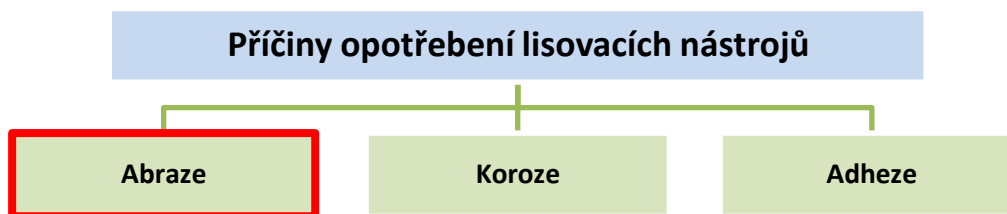
Tab. 5.1: Oceli používané pro konstrukci funkčních dílů [3]

Materiál	Obsah prvků								Tvrdost [HRC]
	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	W [%]	Ni [%]	Mo [%]	V [%]	
X210Cr12	1,91	0,29	0,16	11,20	-	-	-	0,49	58-64
X210CrW12	1,85	0,23	0,22	11,93	1,47	-	-	0,31	57-64
55NiCrMoV7	0,56	0,60	0,37	1,12	-	1,67	0,36	0,19	37-47

Z pohledu disertační práce jsou nejdůležitější materiály určené pro výrobu záložek. Materiály budou dále použity jako srovnávací základna a referenční vzorek pro verifikaci a validaci nové metody pro experimentální ověřování životnosti materiálů.

5.1.2 Analýza mechanismu vzniku opotřebení lisovacích nástrojů

V souvislosti s opotřebením lisovacích nástrojů lze chápat mechanismus vzniku tohoto opotřebení jako degradaci funkčního povrchu lisovacího nástroje prostřednictvím lisovaného žárovzdorného materiálu. V rámci analýzy mechanismu vzniku opotřebení lisovacích nástrojů, byl analyzován vlastní proces lisování a s tím spojený proces opotřebení lisovacích nástrojů, Výstupem analýzy je v první řadě určení trvanlivosti stávajících lisovacích nástrojů, kdy jejich trvanlivost odpovídá 5 000 výlisků, při opotřebení nástroje 0,5 mm na vnitřním rozměru jeho dutiny. Jako hlavní příčiny vzniku opotřebení lisovacích nástrojů jsou především abrazivní opotřebení, koroze a adheze, viz Obr. 5.5.



Obr. 5.5: Příčiny opotřebení lisovacích nástrojů

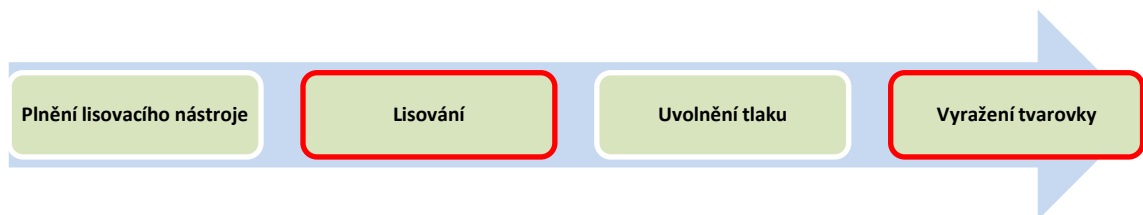
Z těchto tří zásadních jevů, je nejvýznamnější právě abrazivní opotřebení. Tento mechanismus opotřebení je detailněji popsán v kapitole 2.1. Z pohledu lisovacích nástrojů lze abrazivní opotřebení chápat jako jev, kdy se, v průběhu lisování, zapichují tvrdé částice lisovaného materiálu do funkčních ploch lisovacího nástroje a následně dochází k rýhování těchto ploch při vytlačování výlisku z lisovacího nástroje. Tvrdé abrazivní částice na bázi Al_2O_3 nebo SiO_2 na funkčním povrchu lisovacího nástroje způsobují mikrořezání. Částice se chovají řezné nástroje, které při vzájemném pohybu lisovaného materiálu a lisovacího nástroje obrábí jeho funkční plochy. Tento typ opotřebení se na lisovacím nástroji pozorovatelně objeví po 1000 lisovacích cyklech. Je patrné, že pro vyšší lisovací série jsou stávající konstrukční materiály z pohledu otěruvzdornosti nedostatečné a tedy nevhodné.

Druhou pozorovanou příčinou opotřebení lisovacích nástrojů je jejich koroze. K mechanismu opotřebení korozí, v případě lisovacích nástrojů, dochází pouze v případě, kdy jsou do lisovaných materiálů přidávány chemické přísady jako například maziva, stabilizátory nebo plastifikátory. Standardní lisovaný materiál je ovšem bez těchto přísad. Z tohoto důvodu nebude zvyšování životnosti lisovacích nástrojů proti korozi předmětem disertační práce.

Poslední pozorovanou příčinou opotřebení lisovacích nástrojů je adheze lisovaného materiálu na funkční plochy lisovacího nástroje. Adheze jsou opotřebovávány zejména funkční plochy horního a dolního razníku, kdy po vylisování tvarovky ulpívá lisovaný materiál na raznicích a tím poškozují finální výrobky. Z pohledu disertační práce je způsob adhezivního opotřebení lisovacích nástrojů nevýznamný, jelikož k přilnavosti dochází po odlisování více než 20 000 výtisků.

Z hlediska opotřebení lisovacích nástrojů a tím i z hlediska předmětu disertační práce jsou nejslabším místem lisovacího nástroje záložky. Tyto funkční díly jsou opotřebovávány mechanismem abrazivního opotřebení.

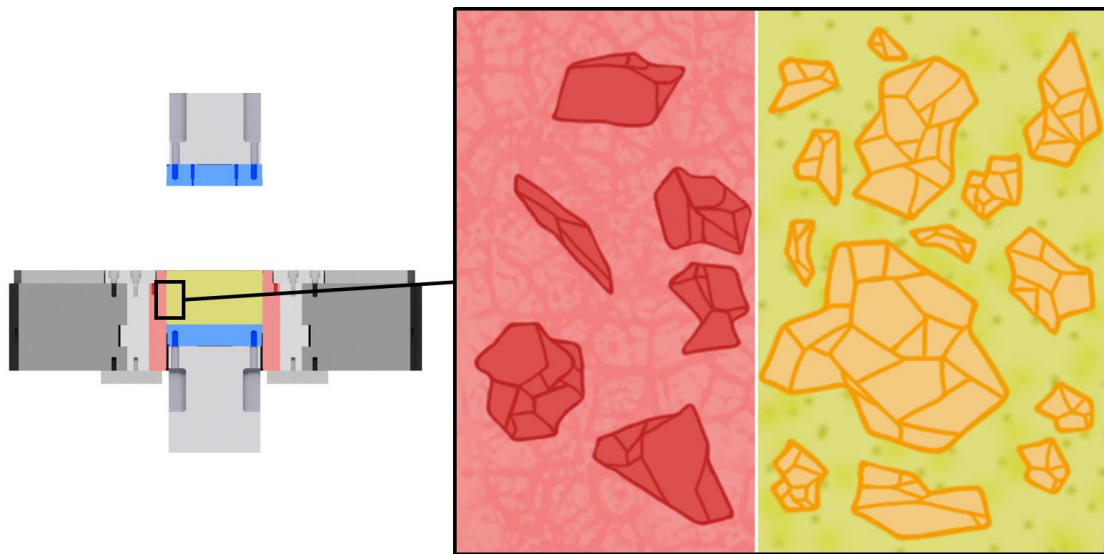
Z pohledu analýzy vzniku opotřebení funkčních dílů lisovacího nástroje bude popsán právě mechanismus vzniku opotřebení lisovacích nástrojů v souvislosti s lisovacím cyklem. Fáze lisování žárovzdorných materiálů jsou znázorněny na Obr. 5.6. Jedná se o fázi plnění lisovacího nástroje, vlastní lisování, uvolnění lisovacího tlaku v nástroji a o fázi vyražení tvarovky z dutiny lisovacího nástroje.



Obr. 5.6: Fáze lisování žárovzdorných materiálů

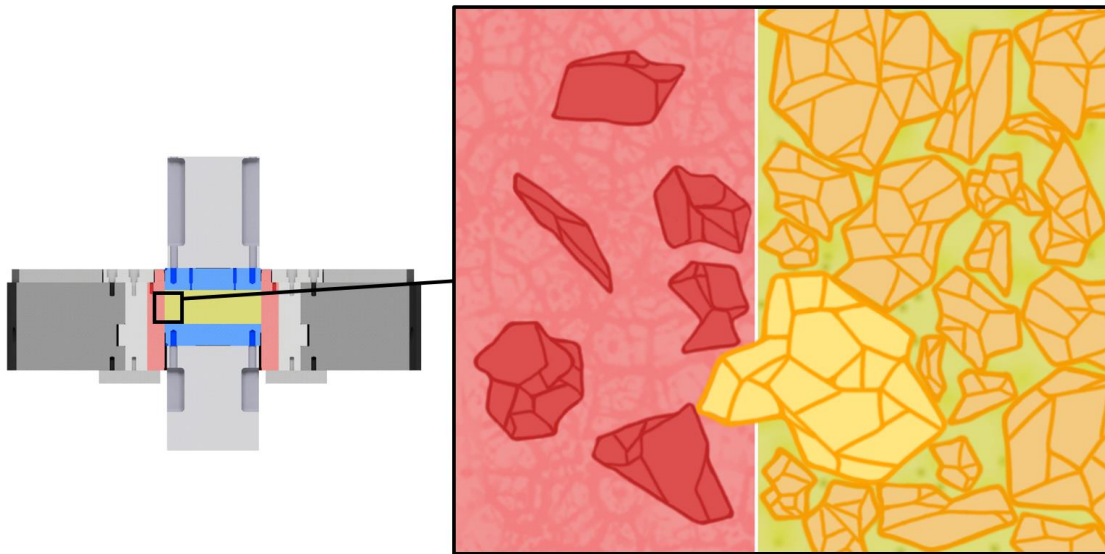
Dále budou detailněji popsány jednotlivé fáze lisování z pohledu opotřebení jeho funkčních ploch. Pro vhodnou ilustraci problematiky mechanismu opotřebení lisovacích nástrojů je použit konkrétní lisovací nástroj určený pro lisování pravoúhlých tvarovek uvedený na Obr. 5.2 a jeho řez uvedený na Obr. 5.3.

První fází lisování žárovzdorných materiálů je plnění lisovacího nástroje lisovaným materiálem. Fáze je detailně zobrazena na Obr. 5.7. Zde dochází k naplnění dutiny lisovacího nástroje lisovaným materiálem pomocí buď hmotnostního navážení, nebo pomocí objemového navážení. V této fázi probíhá interakce mezi funkční plochou lisovacího nástroje a lisovaného materiálu pouze za asistence gravitační síly. Detail rozhraní funkční plochy nástroje a materiálu je uveden na Obr. 5.7. Z pohledu opotřebení je fáze lisování nepodstatná.



Obr. 5.7: Schématické znázornění fáze plnění lisovacího nástroje lisovaným materiálem

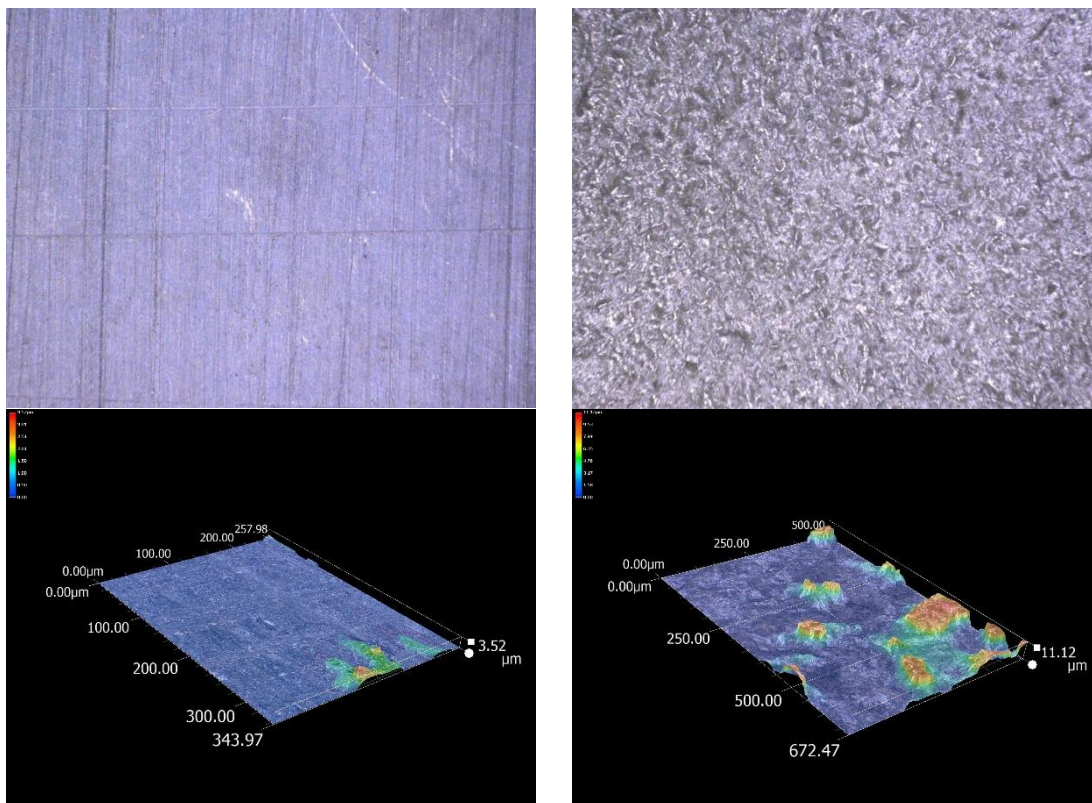
Druhou fází lisování žárovzdorných materiálů je fáze vlastního lisování. Fáze je detailně zobrazena na Obr. 5.8. V této fázi dochází k zasetí horního razníku do dutiny lisovacího nástroje. Následuje vlastní lisování, které je většinou rozděleno do několika kroků předlisování, vlastního lisování, a tak zvaného dolisování. Předlisování probíhá 1x až 7x, kdy se mezi jednotlivými předlisy uvolňuje lisovací tlak, a zároveň se mezi nimi postupně zvyšuje lisovací tlak. Množství předlisování je dáno rozměry a geometrií vylisku. Následuje vlastní lisování, to bývá z pravidla využíváno pouze jedno. Lisování je charakterizováno lisovacím tlakem v rozmezí 30 – 100 MPa a výdrží na tlaku v řádu jednotek sekund. Následuje uvolnění lisovacího tlaku a poté poslední krok tak zvané dolisování. Při tomto kroku dochází ke krátkému impulsu lisovacího tlaku pomocí horního razníku. V této fázi lisování dochází k zapichování tvrdých abrazivních částic lisovaného materiálu (částice na bázi Al_2O_3 nebo SiO_2) do funkčního povrchu lisovacího nástroje. Detail rozhraní funkční plochy nástroje a materiálu je uveden na Obr. 5.8.



Obr. 5.8: Schématické znázornění fáze lisování žárovzdorných materiálů

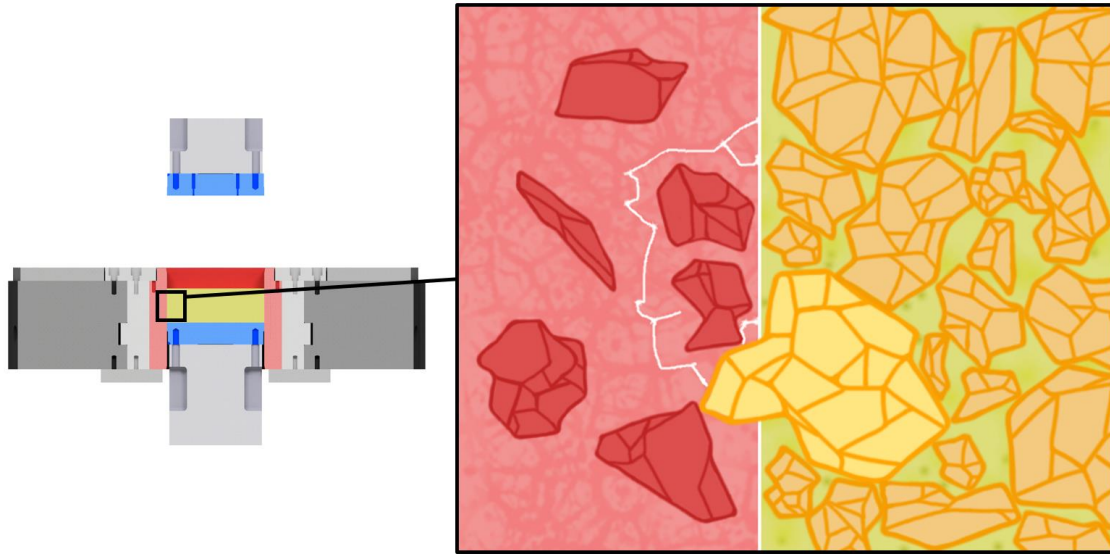
Z pohledu opotřebení lisovacích nástrojů je tato fáze lisování zásadní, jelikož tvrdé částice lisovaného materiálu je postupně vpichují do pojiva nástrojového materiálu. Kritickým faktorem, extrémního opotřebení lisovacích nástrojů určených k lisování žárovzdorných materiálů, je velikost tvrdých částic lisovaného materiálu, která se pohybuje v rozmezí 0,001 mm až 1 mm. Právě velikost tvrdých částic lisovaného materiálu, vysoké lisovací tlaky a relativně málo odolné ocelové konstrukční materiály umožní vpichování tvrdých zrn do povrchu lisovacího nástroje v celé lisovací výšce.

Jako doložení této skutečnosti a podložení mechanismu vzniku opotřebení, který je založen na vpichování lisovaného materiálu do funkčního povrchu lisovacího nástroje je provedené experimentální pozorování razníků, které potvrdilo hypotézu vzniku opotřebení. Na Obr. 5.9 je znázorněno pozorování razníků před lisování a po lisování. Na obrázku je vlevo znázorněn povrch nového razníku a vpravo je znázorněn povrch razníku použitého po lisování 5 000 tvarovek. Z obrázku (vlevo) je patrné, že funkční broušený povrch před lisování nevykazuje žádné zásadní vady. Z obrázku (vpravo) je zřejmé, že povrch razníku po lisování vykazuje vady vzniklé vpichováním tvrdých částic lisovaného materiálu. Experimentálním pozorováním jsem si stanovený mechanismus vzniku opotřebení potvrdil.



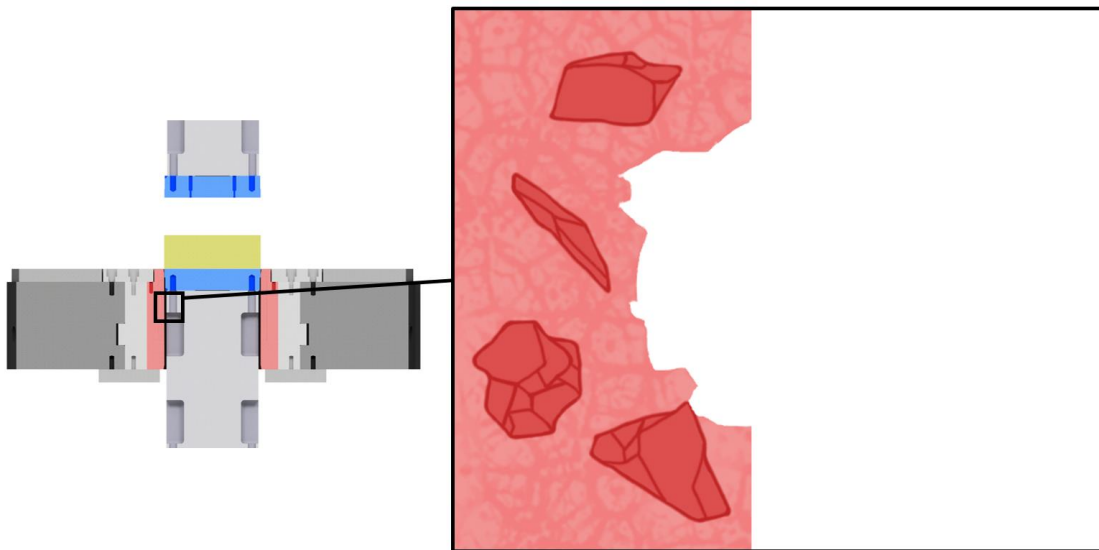
Obr. 5.9: Detail porovnání poškození nového razníku (vlevo) a použitého razníku (vpravo)

Třetí fází lisování žárovzdorných materiálů je uvolnění tlaku v lisovacím nástroji. Fáze je detailně zobrazena na Obr. 5.10. Dochází zde k úplnému uvolnění tlaku v lisovacím nástroji a pohybu horního razníku do výchozí polohy mimo tělo lisovacího nástroje. V této fázi zůstávají tvrdé částice lisovaného materiálu zapíchnuty do funkčních ploch lisovacího nástroje. Detail rozhraní funkční plochy nástroje a materiálu v této fázi je uveden na Obr. 5.10. Z pohledu vlastního opotřebení je tato fáze lisování nepodstatná.



Obr. 5.10: Schématické znázornění fáze uvolnění lisovacího tlaku v lisovacím nástroji

Poslední fází lisování žárovzodorných materiálů je vyrážení tvarovky z dutiny lisovacího nástroje. Tato fáze je detailně zobrazena na Obr. 5.11. V této fázi dochází k tak zvanému vyražení tvarovky prostřednictvím spodního razníku z dutiny lisovacího nástroje. Z pohledu opotřebení lisovacích nástrojů dochází právě v této fázi k rýhování funkčních ploch lisovacího nástroje při vytlačování vylisku. Jak již bylo zmíněno, tak tvrdé abrazivní částice na bázi Al_2O_3 nebo SiO_2 na funkčním povrchu lisovacího nástroje způsobují mikrořezání. Částice se chovají jako řezné nástroje, které při vzájemném pohybu lisovaného materiálu a lisovacího nástroje obrábí funkční plochy lisovacího nástroje. Detail rozhraní funkční plochy nástroje a materiálu v této fázi je uveden na Obr. 5.11.



Obr. 5.11: Schématické znázornění fáze vyrážení tvarovky z lisovacího nástroje

Z výše uvedeného textu je patrné, že mechanismus vzniku opotřebení lisovacích nástrojů je velice komplexní problém, který závisí na mnoha faktorech. Kritickými faktory jsou především velikost tvrdých částic lisovaného materiálu, vysoké lisovací tlaky až na úrovni 100 MPa a nízko odolné ocelové konstrukční materiály. Právě tyto faktory jsou základními vstupy pro vývoj nové metodiky testování abrazivní odolnosti materiálů. Mechanismus vzniku opotřebení bude základním principem, který je implementován do koncepce experimentálního zařízení pro testování otěruvzdornosti. [K1]

V současné době je ve výrobních závodech stanovení velikosti opotřebení lisovacích nástrojů pro lisování vysoce abrazivních materiálů založeno na dvou krocích. Prvním krokem je provedení vizuální kontroly, z důvodu zjištění kritického opotřebení jako je například křehký lom. Druhým krokem je pak kontrola rozměrů odlisovaných tvarovek. Vlastní lisovací nástroj je pak z pohledu opotřebení hodnocen jako nevyhovující v okamžiku, kdy rozměr hotového výlisku tvarovky vykazuje výskyt úchytky rozměru finálního výlisku větší než 0,5 mm. Analýza provedená u konkrétního výrobce žárovzdušných materiálů v České republice ukázala, že životnost lisovacích nástrojů se pohybuje na úrovni 5 000 lisovacích cyklů.

5.2 Základní kritéria pro návrh nové metodiky testování

Jako základní kritéria pro návrh nové metodiky zkoušení otěruvzdornosti konstrukčních materiálů v extrémních podmínkách a návrh s tím souvisejícího experimentálního zařízení, určeného pro provádění zkoušek abrazivní odolnosti různých materiálů, lze chápat kritéria viz Obr. 5.12.



Obr. 5.12: Základní vstupní parametry pro návrh metodiky testování

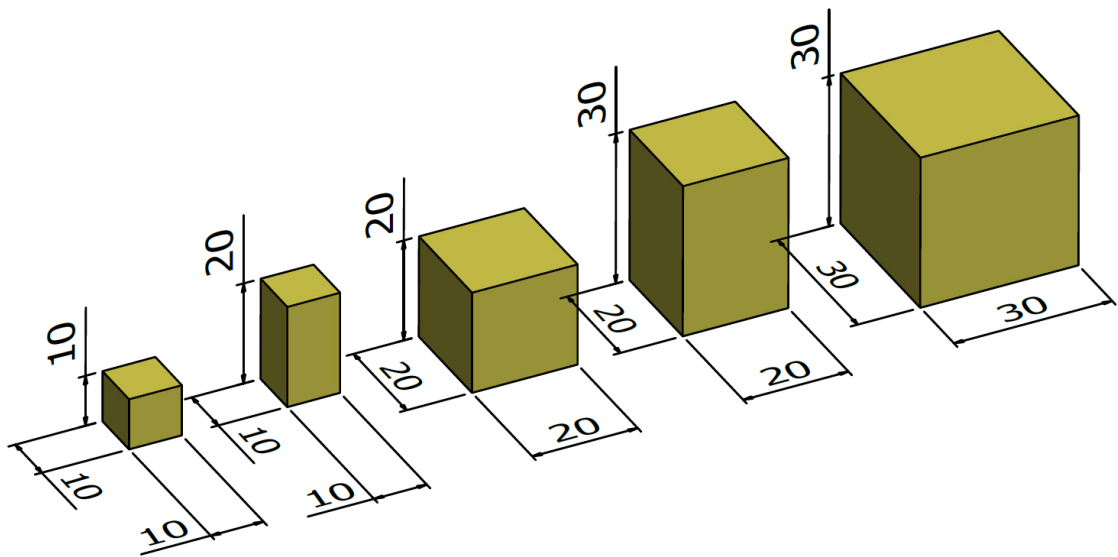
Počet lisovacích cyklů je základním kritériem pro stanovení srovnávací základy a také pro stanovení rozsahu experimentální zkoušky jednoho materiálu. V souvislosti se životností standardního lisovacího nástroje na úrovni 5000 cyklů, je jako kritérium pro návrh nové metodiky stanoven právě tento počet cyklů, který bude sloužit jako referenční cyklus. Nicméně metodika jako taková musí umožnit a zároveň zohlednit požadavek dosáhnout řádově vyššího počtu lisovacích cyklů za nízkých nákladů (v porovnání s provozními zkouškami). Tím bude možné zajisti ověření řádově vyšší životnosti lisovacích nástrojů.

Dalším kritériem zkoušek je vhodná volba zpracovaného materiálu. Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.4, tak standardně jsou používána v abrazivních materiálech ostřiva na bázi Al_2O_3 a SiO_2 . Z hlediska velikosti opotřebení je kritickým použitím materiálu s vysokým obsahem SiO_2 , dosahuje standardně opotřebení 0,5 mm vnitřního rozměru vyložení po cca 5000 kusech výlisků. Z pohledu zpracovávaného materiálu je velice důležitým požadavkem možnost jeho recyklace, což znamená použití minimální vlhkosti materiálu. Tento požadavek je také spjatý s minimalizací potřeb skladování zkušebních výlisků a mechanismem plnění lisovacího nástroje lisovací směsí.

Jak již bylo řečeno, tak referenčním vzorkem, a tedy i srovnávací základnou pro hodnocení materiálů bude experimentální lisovací nástroj vyrobený standardní technologií výroby. Jako standardní technologii výroby lze chápat použití nástrojové oceli o vysoké tvrdosti a pevnosti po tepelném zpracování. Jako referenční vzorek, je vybrán konstrukční materiál nástrojová ocel ISO EN 1.2436 zakalený na 63 + 2 HRC, kdy funkční povrch nástroje bude obroben technologií

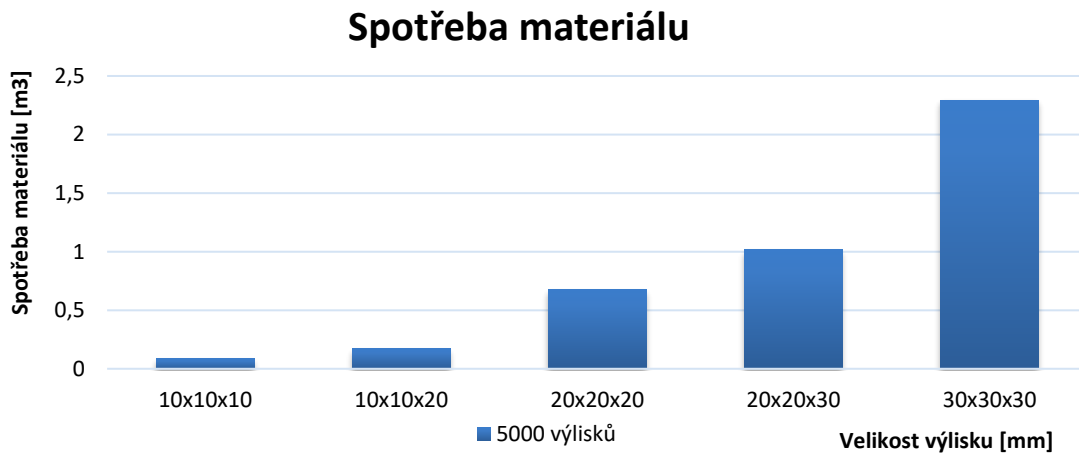
broušení na $R_a=0,8 \mu\text{m}$. Referenční vzorek pak bude následně sloužit pro nastavení, verifikaci a validaci nového experimentálního zařízení, kdy opotřebení po 5000 cyklech bude odpovídat 0,5 mm na rozměr hnízda, tedy 0,25 mm na stěně záložky. Referenční lisovací nástroj a zároveň rozměry experimentálních lisovacích nástrojů budou definovány lisovaným objemem.

Kritérium velikosti zkušební vylisku velice úzce souvisí s provozními náklady spojenými s realizací zkoušky abrazivní odolnosti, zejména pak při vysokých sériích provedených lisovacích cyklů. Druhým faktorem, který ovlivňuje vhodné stanovení kritéria velikosti vylisku je velikost plochy opotřebení experimentálního nástroje. Zde je stanovena minimální šíře plochy na 10 mm. Z pohledu výrobních nákladů na experimentální vzorky a také z pohledu aplikovatelnosti otěruvzdorných vrstev na funkční povrch lisovacího nástroje je stanoven zkušební vylisek ve tvaru krychle. Prostřednictvím tohoto tvaru je možné zabezpečit konstrukci jednoduchých záložek s rovinnou funkční plochou, a i následnou montáž experimentálního lisovacího nástroje do zkušebního zařízení. Na následujícím Obr. 5.13 jsou porovnány varianty možných rozměrů a tvarů zkušební vylisku. Primárně se jedná o pravoúhlé tvary zkušební vylisku.



Obr. 5.13: Tvar a rozměry experimentálního vylisku

Při porovnání spotřeby materiálu na provedení jedné experimentální zkoušky, tedy 5000 lisovacích cyklů, je nutné do výpočtu zahrnout i faktor plnění lisovacího nástroje, který musí odpovídat skutečnému lisovacímu nástroji a je roven hodnotě 1,7 násobku objemu finální tvarovky. Na Obr. 5.14 je znázorněna závislost spotřeby materiálu na velikosti vylisku při 5 000 cyklech.



Obr. 5.14: Závislost spotřeby materiálu na velikosti výlisku a počtu cyklů

V souvislosti s náklady a v souvislosti s přípravou lisovacího materiálu v kolových mísičích, kde kapacita kolového mísiče je na úrovni $0,9 \text{ m}^3$ je jako vhodná velikost experimentálního výlisku zvolena velikost $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}$. V souvislosti se zmenšením velikosti dutiny experimentálního lisovacího nástroje vůči standardním nástrojům bude nutná i úprava struktury lisovaného materiálu.

Kritérium průběhu lisovacího cyklu je nutné nastavit v souladu se základním principem lisování tak, jak je popsáno v kapitole 5.1.2. Jedná se tedy o fázi plnění lisovacího nástroje, vlastní lisování, uvolnění lisovacího tlaku v nástroji a o fázi vyrážení tvarovky z dutiny lisovacího nástroje. Vlastní lisování probíhá za tlaku 25 MPa až 100 MPa . Lisovací tlak v experimentálním zařízení bude stanoven na základě referenčních zkoušek stávajících konstrukčních materiálů tak, aby velikost opotřebenění po 5000 cyklech odpovídala hodnotě opotřebenění $0,5 \text{ mm}$ na vnitřním rozměru vyložení. Požadavek na metodiku je možnost nastavení minimálně lisovacího tlaku.

Dále je nutné i nastavení rychlosti stlačení lisovaného materiálu, doba výdrže na tlaku a rychlosti vyražení výlisku. Lisování žárovzdušných materiálů je velice komplexní záležitost, která má svá specifika. Nicméně je nutné se co nejvíce přiblížit relacím ve skutečném lisovacím nástroji na produkčních lisech. Z tohoto důvodu není možné celý lisovací cyklus zrychlit na minimální dobu. Délka celého lisovacího cyklu je stanovena na 5 sekund s tím, že samotný proces lisování lisovací směsi má stanovenou délku na 1 sekundu. Výchozí nastavení vychází z analýzy současného stavu lisování v konkrétním výrobním podniku. V průběhu ověřování a nastavování provozních

parametrů experimentálního zařízení se procesní parametry mohou změnit. Cílem je realizace jednoho experimentální ověření do 8 hodin.

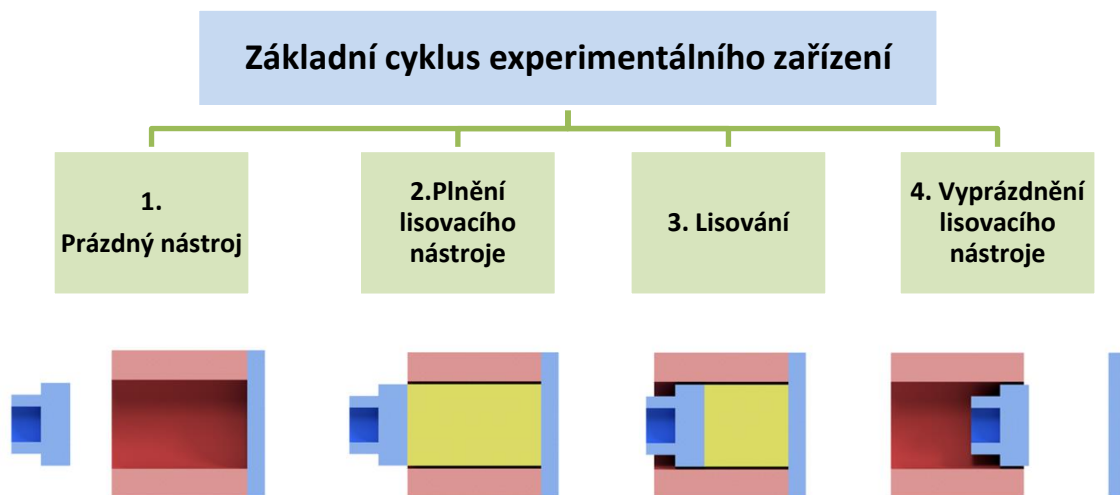
Z pohledu posledního kritéria hodnocení velikosti opotřebení na experimentální vzorcích je hlavním požadavkem především dosažení vysoké vypovídací schopnosti měření a jeho opakovatelnosti, reprodukovatelnosti a doložitelnosti. Princip měření velikosti opotřebení je dán především vlastní konstrukcí experimentálního lisovacího nástroje.

5.3 Vývoj experimentálního zařízení

Vývoj vlastního experimentálního zařízení pro zkoušení abrazivní odolnosti materiálů určených pro funkční díly lisovacích nástrojů určených k lisování žárovzdorných materiálů vychází přímo ze základních vstupních parametrů, které jsou uvedeny v předchozí kapitole. Při vývoji zařízení je nutné vycházet z předpokladu co nejjednoduššího zařízení, kdy právě pro zjednodušení zařízení je nutné uvažovat princip lisování směsi s minimální vlhkostí. Kdy při použití optimálně suchého lisovacího materiálu odpadnou problémy dopravou materiálu do lisovacích nástroje a problémy s manipulací odlisované tvarovky. Pro vlastní konstrukci zařízení z toho poté plynou další požadavky, a to požadavek na gravitační sypání materiálu do lisovacího nástroje a po odlisování pak samovolný rozpad tvarovky.

5.3.1 Stanovení cyklu experimentálního zařízení

Z pohledu vlastního cyklu experimentálního zařízení je nutné replikovat cyklus na produkčních lisech. Cílem je návrh experimentu, který odpovídá běžnému způsobu lisování. Z tohoto důvodu je vlastní cyklus experimentálního zařízení rozdělen do čtyřech základních částí. První částí je prázdný lisovací nástroj, následuje plnění lisovacího nástroje, vlastní lisování a vyprázdnění lisovacího nástroje. Tento cyklus je zobrazen na Obr. 5.15.



Obr. 5.15: Schéma funkce experimentálního zařízení

Při plnění experimentálního zařízení dochází k zaplnění komory lisovacího nástroje stanoveným objemem suchého materiálu. Plnění je řešeno gravitačně samospádem lisovaného materiálu ze zásobníku do komory. Horní razník, jehož funkcí je stlačení lisované hmoty, se pohybuje přímo

v materiálu a zajišťuje tak plnění dutiny lisovacího nástroje. Tento způsob plnění experimentálního zařízení byl zvolen z důvodu zkrácení cyklu zařízení.

Při vlastním lisování dochází ke stlačení lisovaného materiálu, jehož objem je roven hodnotě 1,7 násobku objemu finální tvarovky. Konstrukční řešení experimentálního zařízení musí umožnit testování abrazivní odolnosti materiálů při použití různých lisovacích materiálů. Je tedy nutné, aby bylo možné měnit lisovací tlak v rozmezí 25 – 100 MPa. Dalším požadavkem na provoz zařízení je pak možnost regulace rychlosti stlačení lisovaného materiálu, a to zejména z důvodu uvedení zařízení do provozu a nastavení vhodných procesních parametrů, tak aby výsledné opotřebení referenčního vzorku odpovídalo opotřebení na standardních lisovacích nástrojích.

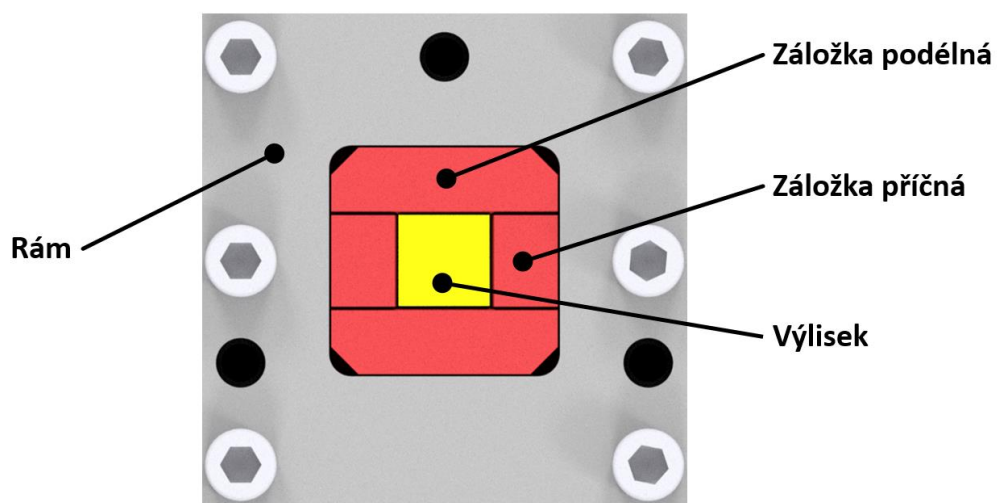
Proces vyprázdnění lisovacího nástroje experimentálního zařízení musí zabezpečit úplné vytlačení tvarovky z dutiny nástroje a také destrukci tvarovky, tak aby nebylo nutné s tvarovkou dále manipulovat. Dalším požadavkem na tuto část cyklu je jeho co nejkratší časový průběh. Konstrukční řešení experimentálního zařízení bude založeno na pevném spodním razníku, který bude tvořit silovou oporu hornímu razníku při lisování a vyrážení tvarovky z experimentálního zařízení. Spodním razníkem bude tedy regulován vlastní lisovací tlak. Zvyšující se síla je totiž jedním z prvotních jevů opotřebení lisovacího nástroje (funkčních dílů), přesněji poukazuje na nárůst drsnosti povrchu funkčních dílů.

Z pohledu vlastního opotřebení, je možné v takto navrženém experimentálním zařízení dosáhnout velice extrémních podmínek, které převyšují standardní způsob lisování. Při vlastním lisování v tomto experimentálním zařízení bude dosaženo tlakové špičky, kdy zároveň při stlačování materiálu dochází k vzájemnému pohybu lisovaného materiálu a funkčních dílů experimentálního lisovacího nástroje a k zapichování tvrdých abrazivních částic do funkčních dílů. Při vyprázdňování pak dochází k vzájemnému pohybu stlačeného výlisku na požadovaný tlak a funkčních dílů, dochází tedy k extrémnímu abrazivnímu tření na povrchu funkčních dílů experimentálního lisovacího nástroje. Velikost opotřebení této třecí plochy je měřitelným parametrem velikosti opotřebení experimentálního lisovacího nástroje.

5.3.2 Konstrukce funkčních dílců experimentálního zařízení

Na základě rešerše metod určování otěruvzdornosti a prvotních provozních testů na skutečných výrobních lisech byly zváženy všechny výhody a nevýhody stávajících experimentálních metod a bylo rozhodnuto o konstrukci experimentálního zařízení, na kterém bude možné simulovat extrémní podmínky lisování a umožní také ekonomicky efektivní provedení provozních zkoušek.

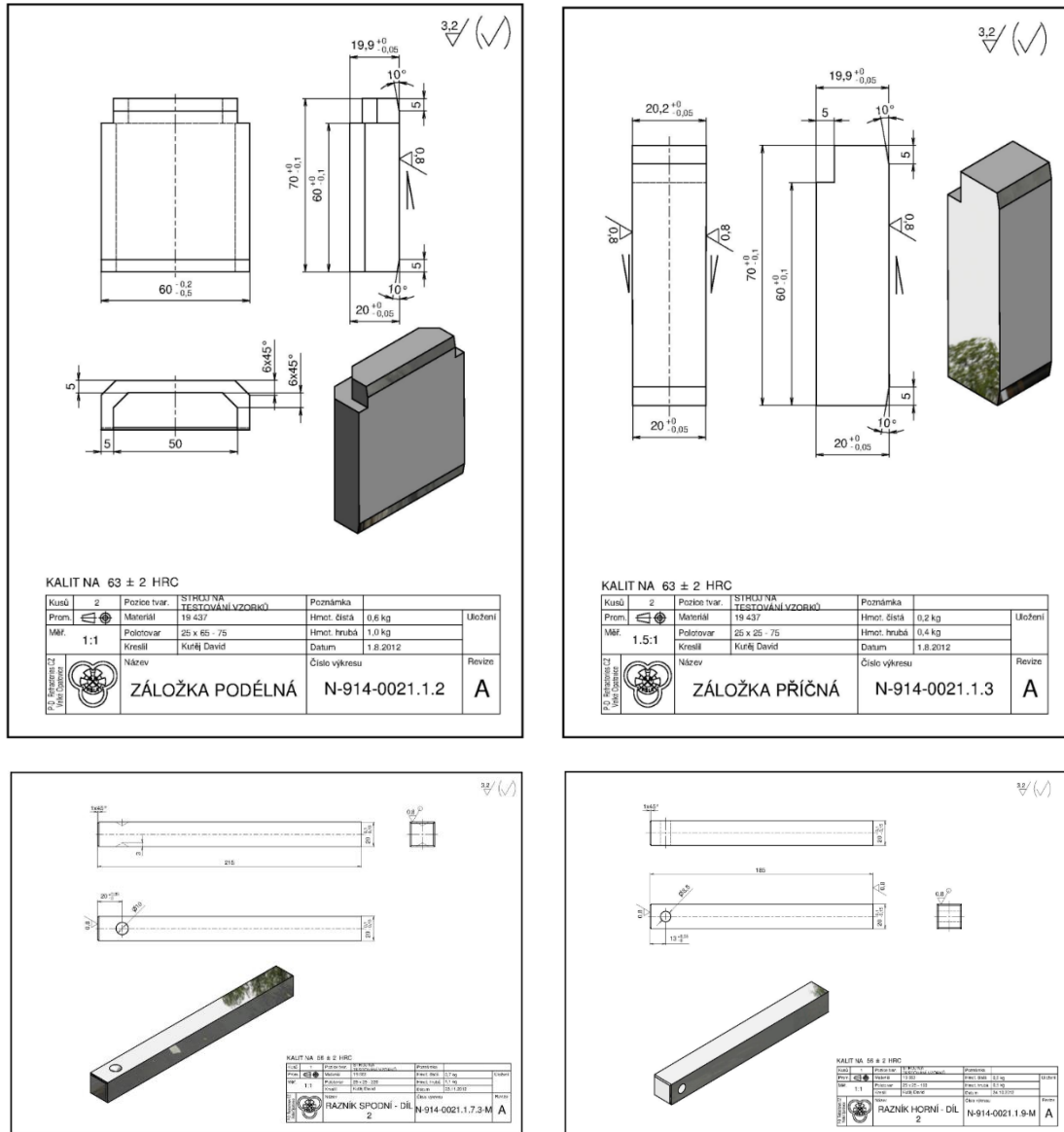
Podle základních požadavků uvedených v předchozím textu bylo navrženo experimentální zařízení určené k testování životnosti materiálů. Experimentální zařízení tedy vychází z lisu, který je používán pro výrobu reálných výrobků. Zásadním rozdílem mezi těmito zařízeními je horizontální umístění osy pohybu razníků. Dalším značným rozdílem je pak kratší pracovní cyklus experimentálního zařízení. Funkční díly experimentálního zařízení jsou sestaveny způsobem, který je typický pro běžný lisovací nástroj. Schéma umístění funkčních dílců v experimentálním zařízení je uvedeno na Obr. 5.16.



Obr. 5.16: Umístění záložek v experimentálním zařízení

Celý experimentální lisovací nástroj je konstruován s úkosem 0,1mm při výšce funkčních dílců 70mm, kdy menší otvor je na výstupu. Funkční dílce se do experimentálního lisovacího nástroje vkládá s vůlí, která je následně vymezena pomocí šroubů tak, aby uložení vyložení splňovalo požadavky na stabilitu při vlastním lisování. Toto konstrukční řešení bylo navrženo s ohledem na testování různých konstrukčních materiálů a povrchových úprav, tak aby nebylo nutné při montáži experimentálního lisovacího nástroje použití mechanické síly. Standardní lisovací

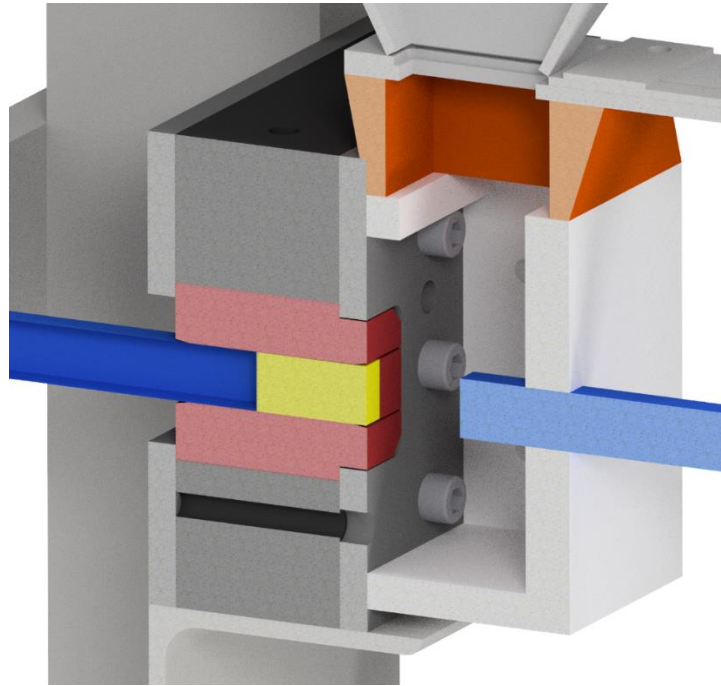
nástroje jsou montovány narážením funkčních dílců do rámu. Návrh konstrukčního řešení funkčních dílců a razníků experimentálního lisovacího nástroje je uveden na Obr. 5.17.



Obr. 5.17: Funkční díly experimentálního lisovacího nástroje

Na Obr. 5.18 je schematicky zobrazen model komory zkušebního zařízení. Je zde patrná horizontální konstrukce zařízení a uspořádání funkčních dílců lisovacího nástroje a razníků. Funkční dílce experimentálního lisovacího nástroje odpovídají svojí konstrukcí běžným

produkčním dílcům. Konstrukce razníků musela být přizpůsobena experimentálnímu zařízení a je v tomto směru unikátní oproti běžným razníkům.



Obr. 5.18: Model lisovací komory zkušebního zařízení v řezu

Umístění razníku v experimentálním zařízení je navrženo tak, že přísun lisovaného materiálu do lisovací komory se děje po odjetí horního razníku do krajní polohy a není dále ničím regulováno a odpovídá tedy objemovému plnění tak, jak tomu je na produkčních lisech. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu maximálního zkrácení lisovacího cyklu. Pokud by zde bylo využito jakékoliv plnicí, nebo dávkovací zařízení, došlo by minimálně ke zdvojnásobení délky lisovacího cyklu.

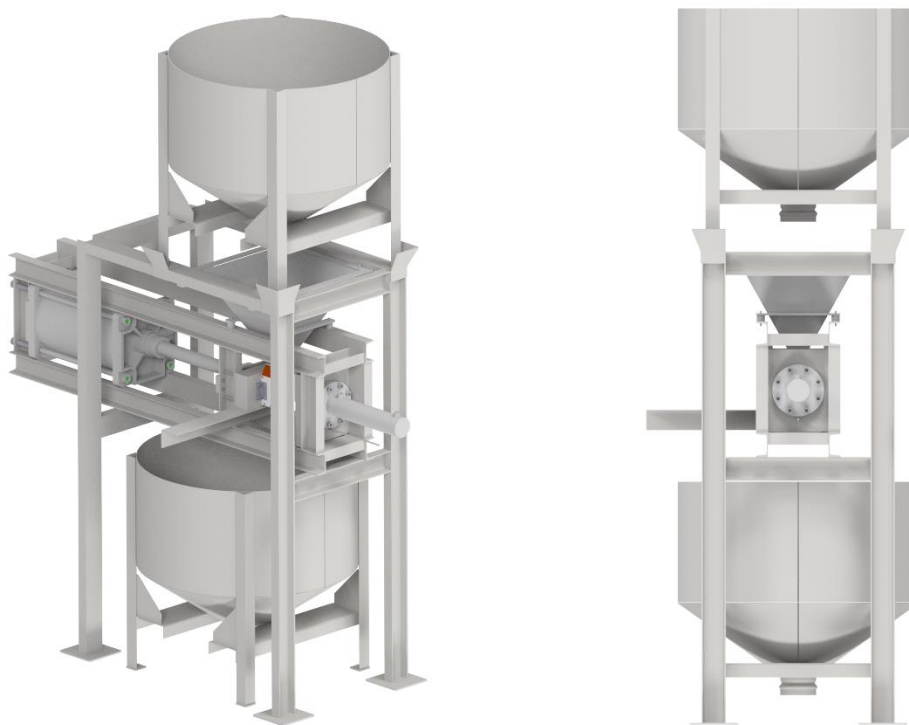
5.3.3 Konstrukce experimentálního zařízení

Konstrukční řešení experimentálního zařízení stroje bylo navrženo dle požadavků na vznik mechanismu opotřebení tak, jako se odehrává na produkčních hydraulických lisech. Běžně lisování probíhá na hydraulických lisech se jmenovitým výkonem 500 tun až 1000 tun a lisovacím tlakem 25 – 100 MPa ve vertikální poloze. Spodní razník prochází formou s tolerancí v nejmenším rozměru 0,05 mm. Spodní razník vymezuje výšku vylisku tak, aby při stlačení horním razníkem odpovídala zákaznickým požadavkům. Při slisování vylisku vyjede horní razník z hnízda a spodní razník vytlačí vylisek ven z lisovacího nástroje. Funkční díly lisovacího nástroje jsou vyrobeny s

úkošem tak, aby nedocházelo při vyrážení vylisku z dutiny lisovacího nástroje k poškození stěn vylisku.

Z pohledu experimentálního zařízení musí jeho konstrukční řešení umožnit testování abrazivní odolnosti materiálů při použití různých lisovacích materiálů. Je tedy nutnost lisovacího tlaku v rozmezí 25 – 100 MPa a regulace rychlosti stlačení lisovaného materiálu. Proces vyprázdnění lisovacího nástroje experimentálního zařízení musí zabezpečit úplné vytlačení tvarovky z dutiny nástroje a také destrukci tvarovky. Vlastní konstrukční řešení experimentálního zařízení je založeno na pevném spodním razníku, který reguluje vlastní lisovací tlak.

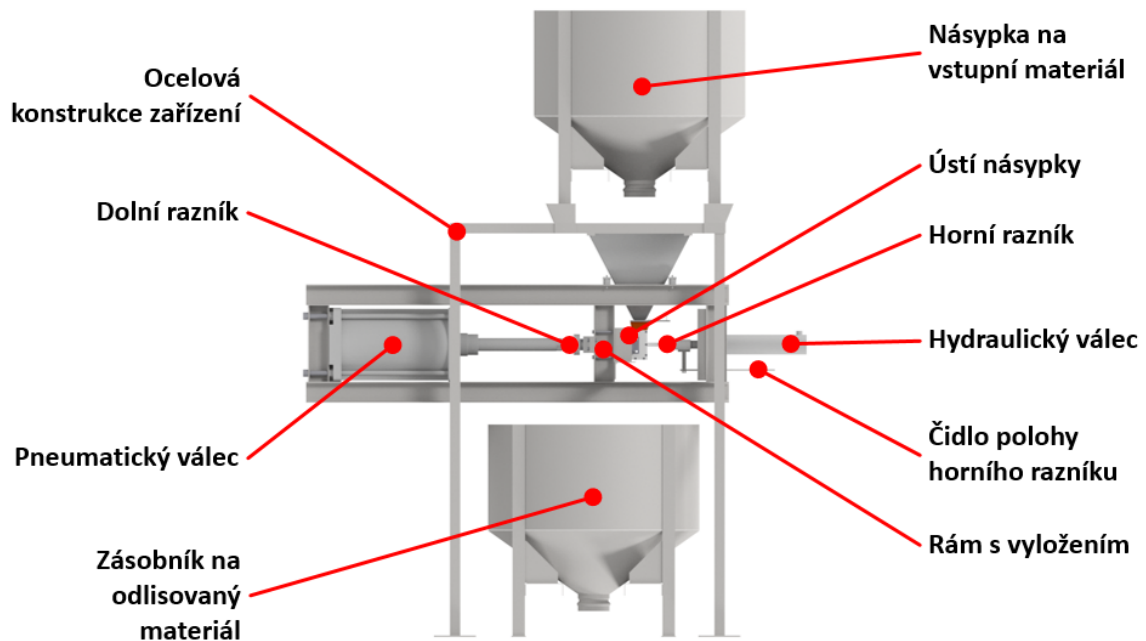
Vlastní konstrukční řešení experimentálního zařízení, které vychází ze stanovených požadavků a principů, je uvedeno na Obr. 5.19.



Obr. 5.19: Model experimentálního zařízení

Konstrukční řešení celého experimentálního zařízení se skládá z následujících prvků: ocelová konstrukce zařízení, pneumatického válce, ústí násypky, hydraulického válce a čidla polohy horního razníku (poloha razníku určuje faktor plnění lisovacího nástroje). Dále pak k zařízení patří násypka na vstupní materiál a zásobník na odlisovaný materiál. Jak vstupní, tak výstupní zásobník mají objem 1 m³, což představuje přibližně 1,3 tuny lisovacího materiálu. Samotný

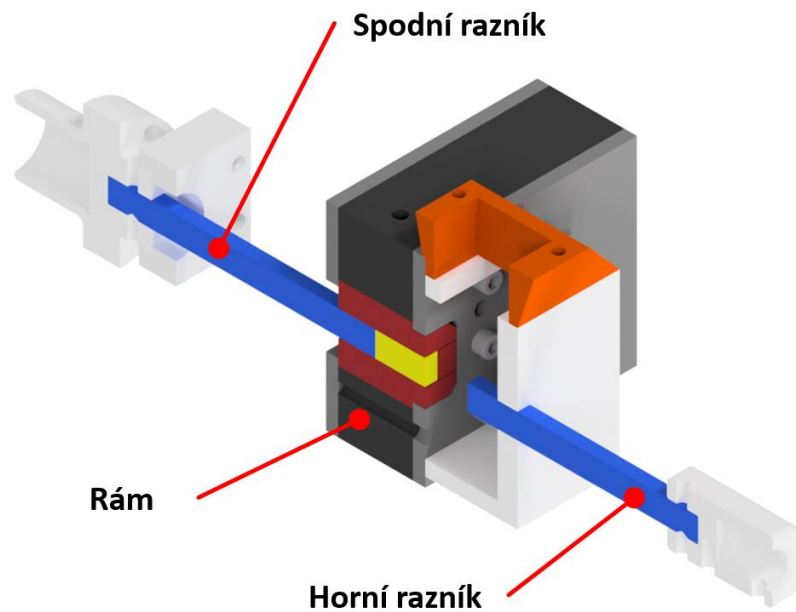
experimentální lisovací nástroj se pak skládá z horního razníku, dolního razníku a rámu s funkčním vyložení. Jednotlivé prvky celého experimentálního zařízení jsou uvedeny na Obr. 5.20.



Obr. 5.20: Schématický popis konstrukce experimentálního zařízení

Experimentální zařízení je konstruováno tak, aby bylo možné lisovat se jmenovitým tlakem až na úrovni 100MPa, při seřizování je nutno správně stanovit násyp hmoty do hnízda a tím vymezit správný lisovací tlak.

Konstrukční řešení experimentálního lisovací nástroje je uvedeno na Obr. 5.21. Je patrné, že experimentální lisovací nástroj odpovídá uspořádání standardního lisovacího nástroje, tedy horní razník, dolní razník a rámu s funkčním vyložení. Experimentální lisovací nástroj je konstruován s úkošem 0,1 mm při výšce vyložení 70 mm, kdy menší otvor je na výstupu.



Obr. 5.21: Experimentální lisovací nástroj

Samotný experiment probíhá tak, že horní razník s hydraulickým pohonem natlačí směs do experimentálního lisovacího nástroje proti spodnímu razníku, kde je zpětný chod s pneumatickým válcem. Ve chvíli stlačení lisovaného materiálu a požadovaný lisovací tlak dojde k přetlačení pneumatického válce hydraulickým pohonem, a tak se vytlačí suchá lisovací směs mimo experimentální lisovací nástroj. Lisovaný materiál je tak tlačěn největší možnou dráhou po funkčních dílech lisovacího nástroje z většího rozměru do menšího, požadovaným lisovacím tlakem. Při běžném lisování se používá lisovací směs s 6 % vlhkostí pro držení tvaru. V případě experimentálního zařízení je nutné použití suché lisovací směsi.

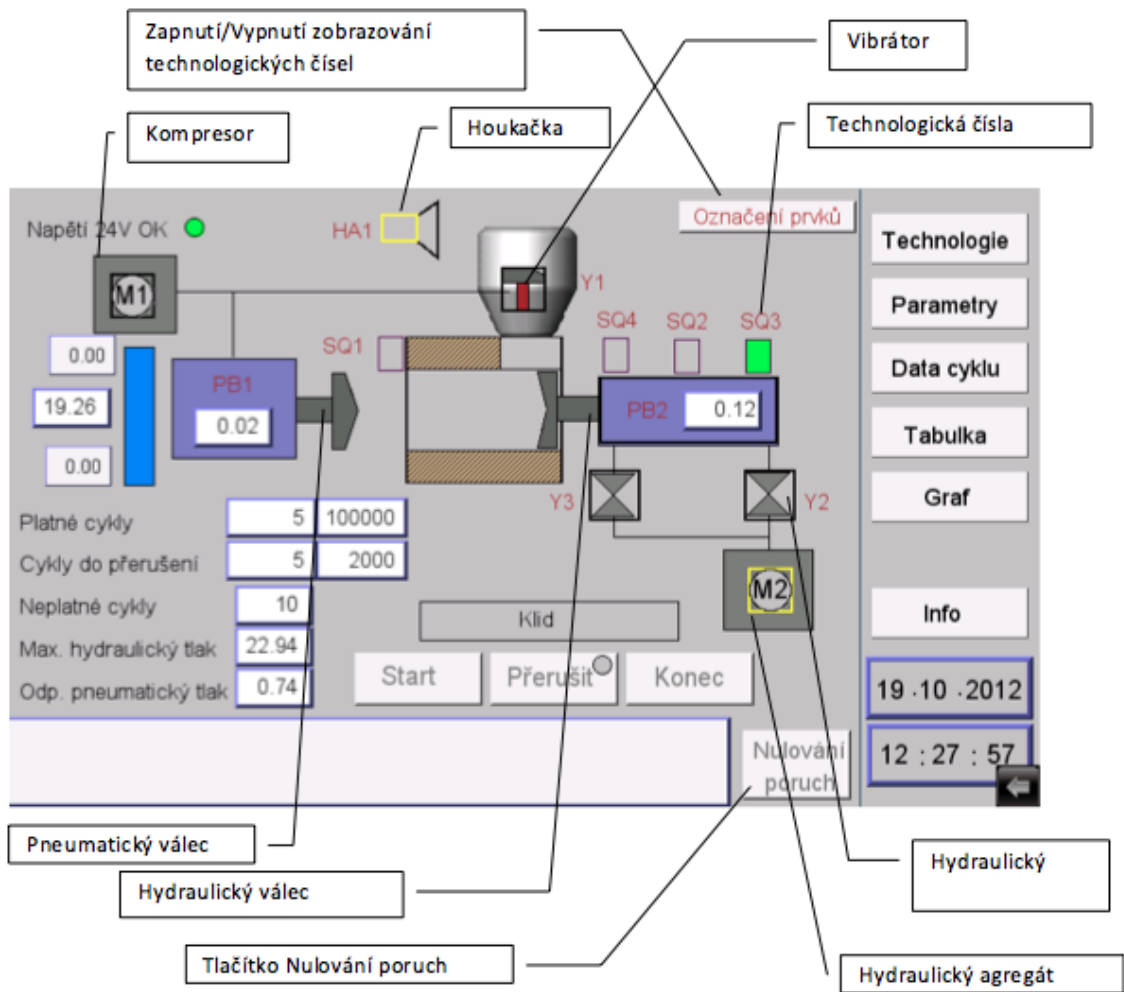
Na základě vstupních požadavků a zpracované konstrukční dokumentace byl vyroben prototyp experimentálního zařízení pro zkoušky abrazivní odolnosti materiálů. Na Obr. 5.22 je znázorněn prototyp experimentálního zařízení.



Obr. 5.22: Prototyp experimentální zařízení

Experimentální zařízení je vybaveno vlastním řídicím systémem, který dodala společnost SATEC s.r.o. Uživatelské prostředí řídicího systému je uvedeno na Obr. 5.23.

Vlastní technické řešení experimentální zařízení je předmětem patentu PV 2015-126 – „Experimentální stroj pro testování otěruvzdornosti, zejména při lisování žárovzdorných materiálů“, podaného dne 24.02.2015 a uděleného dne 06.04.2016. [K1]

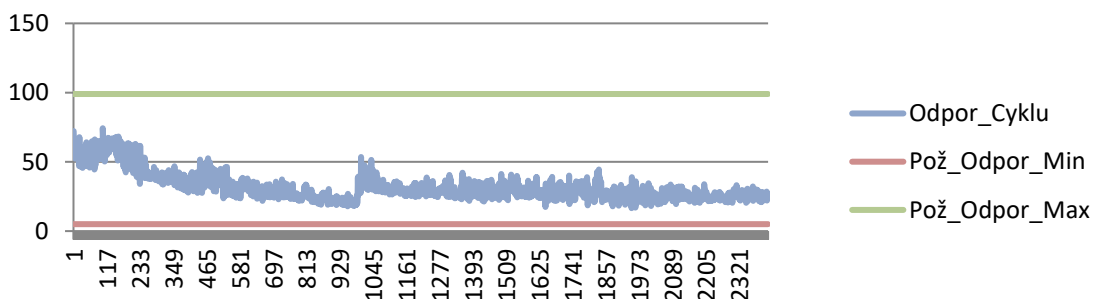


Obr. 5.23: Uživatelské prostředí řídicího systému experimentálního zařízení

Vlastní řídicí systém experimentálního zařízení je koncipován tak, aby umožnil záznam o provedeném experimentu, tedy záznam průběhu lisovacího tlaku a odporu, počtu lisovacích cyklů a export dat do tabulkového procesoru.

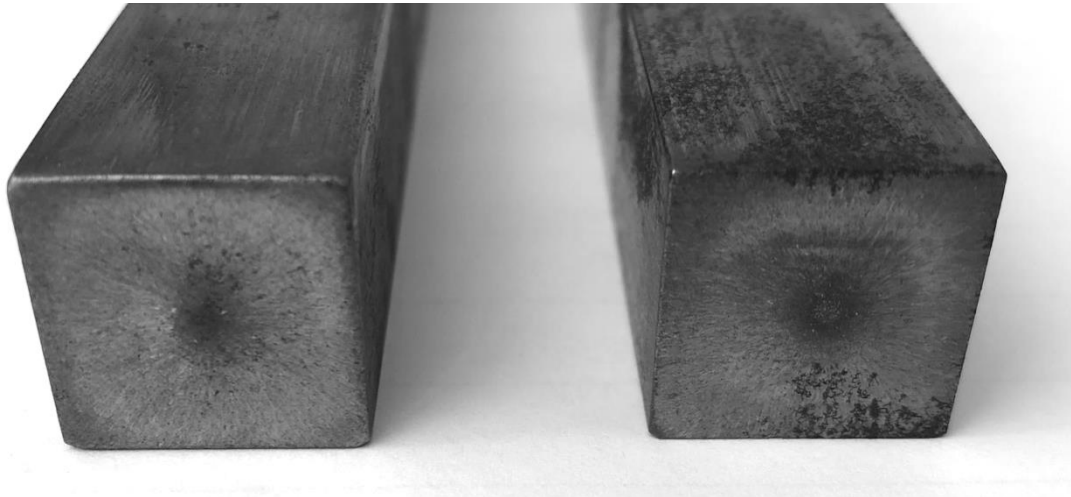
5.4 Uvedení experimentálního zařízení do provozu a stanovení parametrů experimentálního zařízení

Po vlastní výrobě experimentálního zařízení bylo zařízení uvedeno do provozu ve spolupráci se společností SATEC s.r.o. Během úvodního testování prototypu experimentálního zařízení bylo nutné stanovit vhodný lisovací tlak, který je přímo úměrný odporu pneumatického válce a objemu jednotlivé dávky lisovací směsi na výlisek. Množství lisovaného materiálu není dávkováno hmotnostně, ale objemově, což závisí na sypkosti lisovacího materiálu a je přímo úměrné množství vniklé směsi během časové prodlevy horního razníku a hloubkou zjetí horního razníku do experimentálního lisovacího nástroje. Byl stanoven nejnižší možný tlak pneumatického válce 0,41 bar. Dále bylo dle dílčích cyklů stanoveno vymezení zjetí horního razníku do ústí násypky, kdy konec horního razníku je 20 mm od ústí vstupu vyložení experimentálního lisovacího nástroje. Tím byl dosažen hydraulický lisovací tlak pohybující se v rozmezí mezi 30÷50MPa. Během provozu experimentálního zařízení dochází k opotřebení vyložení lisovacího nástroje, kdy je možno opotřebení pozorovat díky poklesu lisovacího tlaku, který je zaznamenán v grafu viz Obr. 5.24.



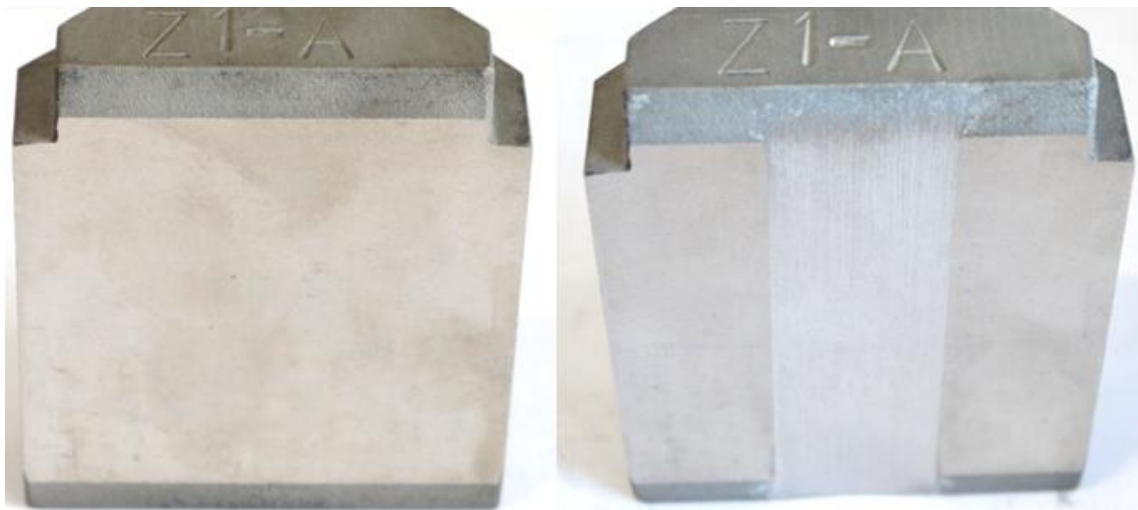
Obr. 5.24: Pokles lisovacího tlaku v závislosti na opotřebení vyložení experimentálního lisovacího nástroje během prvního testu

Při uvedení zařízení do provozu byl pozorován vysoký stupeň opotřebení razníků, viz následující Obr. 5.25. Pro experimentální zkoušky je nutné dodržet zásadu, že ke každému experimentálnímu vyložení musí být použita sada nových razníků. Z tohoto důvodu došlo ke konstrukční horního i dolního razníku tak, aby bylo možno vyměnit vždy jen část razníku, která přijde do kontaktu s lisovaným materiálem, a to zejména z důvodu redukce nákladů na provoz zařízení.



Obr. 5.25: Opotřebený spodní razník (vlevo) a horní razník (vpravo)

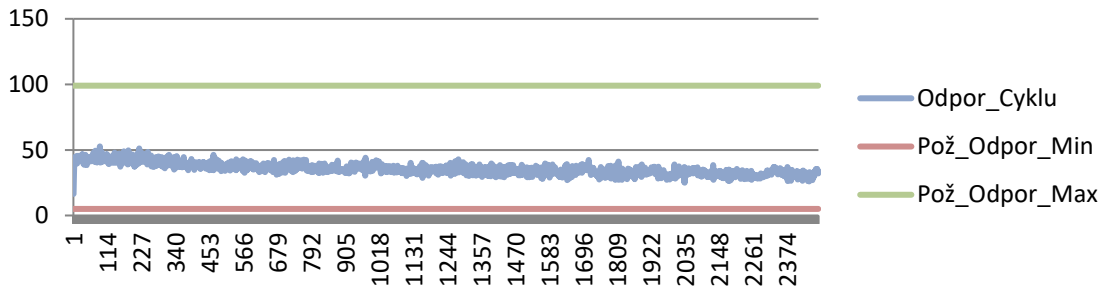
Při prvním testu (Obr. 5.24) bylo experimentální lisovací nástroj podroben rozměrové kontrole po 100, 200, 500, 1000 a 3000 cyklech. Bylo zjištěno, že po 3000 cyklech došlo k masivnímu opotřebení experimentálního lisovacího nástroje vyrobeného ze standardního materiálu pro ocelové lisovací nástroje, a to nástrojové oceli ČSN 19 436 zakalené na 63HRC. Opotřebení experimentálního lisovacího nástroje odpovídalo opotřebení běžného lisovacího nástroje po 5000 cyklech. Opotřebení dílce experimentálního lisovacího nástroje po prvním testu je zobrazeno na Obr. 5.26.



Obr. 5.26: Nový (vlevo) a opotřebený (vpravo) dílec experimentálního lisovacího nástroje po prvním testu

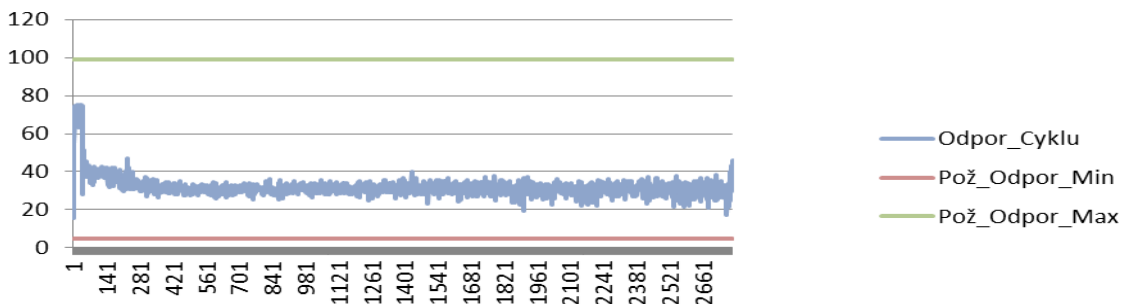
Během druhého testu, viz Obr. 5.27, se ukázalo, že k největšímu opotřebení dochází po cca 100 lisovacích cyklech. Dalším výstupem druhého testu byla skutečnost, že opotřebení na horní záložce bylo mnohem větší než na záložce spodní. Z toho byl vyvozen závěr, že je nutné dodržet

souosost horního a spodního razníku a dále nutnost dodržet vůli mezi razníkem a nejmenším rozměrem vyložení. Tato vůle musí být minimálně 0,05mm. V případě menší vůle než 0,05 mm vzniká větší opotřebení experimentálního lisovacího nástroje způsobené vnikajícím materiálem mezi razník a vyložení.



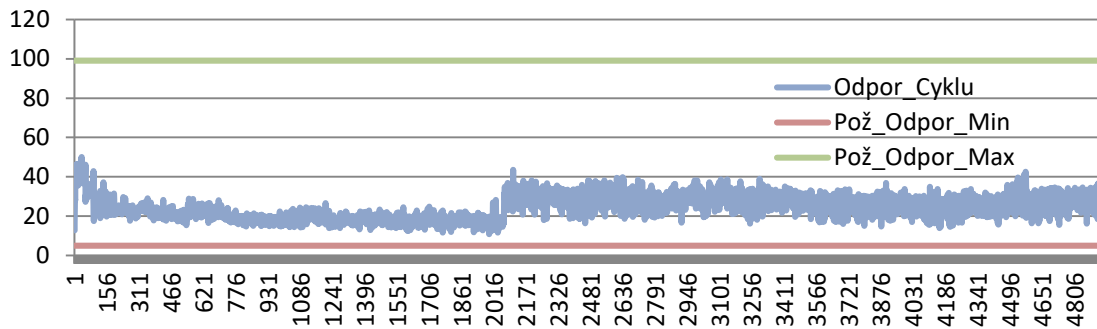
Obr. 5.27: Průběh lisovacího tlaku při druhém testu

Třetí test, viz Obr. 5.28, byl zaměřen na ověření přesnosti uložení razníků a přesnosti jejich souososti. Opotřebení záložek bylo při 3000 cyklech rozloženo rovnoměrně po obvodu vyložení..



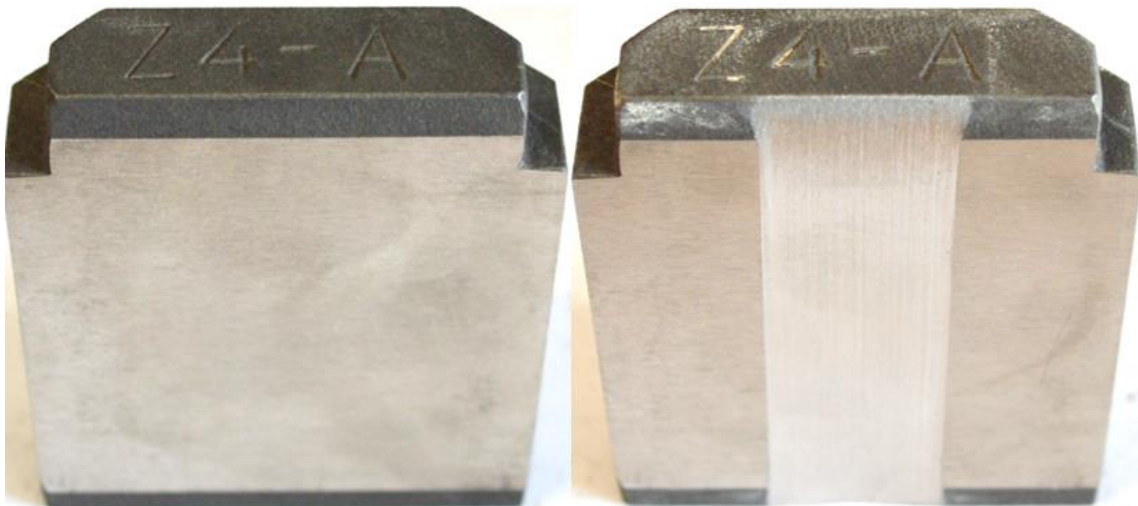
Obr. 5.28: Průběh lisovacího tlaku při třetím testu

Při čtvrtém testu, viz Obr. 5.29, byla dodržena přesná vůle mezi razníkem a vyložení lisovacího nástroje. Dle grafického výstupu došlo k opotřebení lisovacího nástroje cca po 2000 cyklech. Vzhledem k tomu se snížil lisovací tlak pod požadovanou mez a musel být navýšen na odpovídající. Po navýšení tlaku byl test dokončen v požadované sérii 5000 cyklů. Z grafu na Obr. 5.29 je patrné, že po přenastavení lisovacího tlaku docházelo k rovnoměrnému opotřebení lisovacího nástroje.



Obr. 5.29: Průběh lisovacího tlaku při čtvrtém testu

Opotřebení dílce experimentálního lisovacího nástroje po provedeném kompletním čtvrtém testu je zobrazeno na Obr. 5.30. Vlevo je znázorněn dílec podátné záložky před testováním a vpravo je zobrazen dílec rozpěrné záložky po provedeném experimentu 5000 cyklů.



Obr. 5.30: Nový (vlevo) a opotřebený (vpravo) dílec experimentálního lisovacího nástroje po čtvrtém testu

Během čtvrtého testu bylo provedeno 5000 cyklů, po kterých bylo opotřebení experimentálního lisovacího nástroje, vyrobeného ze standardního materiálu pro ocelové lisovací nástroje, a to nástrojové oceli ČSN 19 436 zakalené na 63HRC, na úrovni opotřebení standardního lisovacího nástroje.

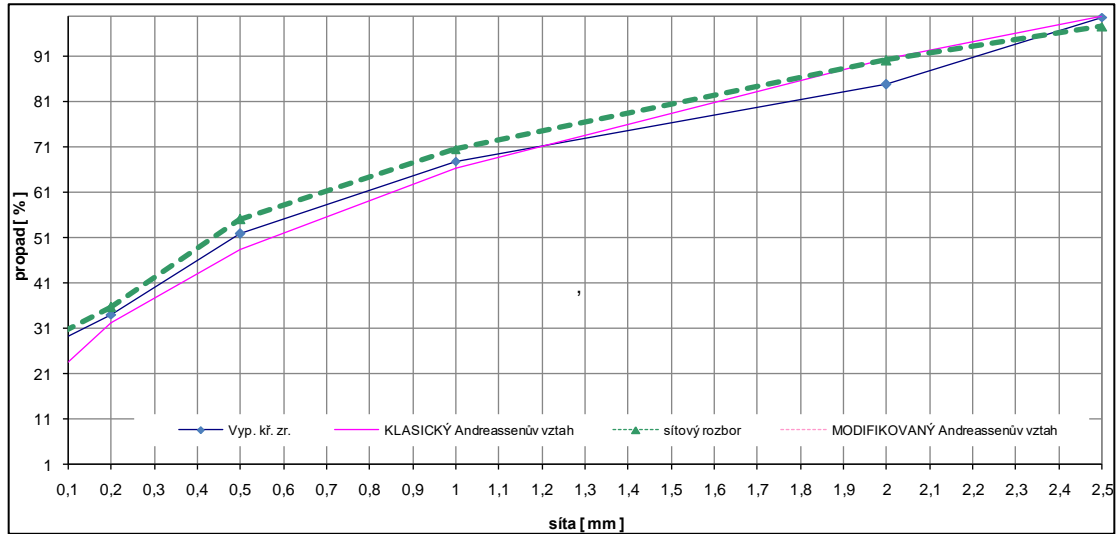
V průběhu uvedení zařízení do provozu bylo nutné optimalizovat složení lisovacího materiálu pro použití v experimentálním zařízení. Standardní lisovací materiál pro použití v hydraulických lisech je připravován s vlhkostí na úrovni 6%. Takto připravený lisovací materiál není možné v experimentálním zařízení použít, jelikož koncepce lisovací osy experimentálního zařízení je oproti standardním lisům v horizontální poloze a není možné využít principu gravitačního

objemové plnění lisovacího nástroje materiálem. Další nevýhodou standardní lisovací směsi je přítomnost vápenných složek, které pohlcují vzdušnou vlhkost, a ta při násypu v experimentálním zařízení způsobuje nedostatečné zaplnění násypky před tělesem lisovacího nástroje. Dále, vzhledem k velikosti experimentálního lisovacího nástroje, bylo nutné v poměru upravit i velikosti zrn zkušebního lisovacího materiálu. V souvislosti s úpravou materiálu byla provedena analýza materiálu metodou síťového rozboru před experimentem a po experimentu. Výsledky síťového rozboru jsou uvedeny v Tab. 5.2. Zde je patrné, že poměr objemu frakcí se před a po provedeném experimentu liší. Během experimentu dochází k drcení zrn lisovaného materiálu o vyložení experimentálního lisovacího nástroje.

Tab. 5.2: Výsledky síťového rozboru směsi před a po 1 lisovacím cyklu

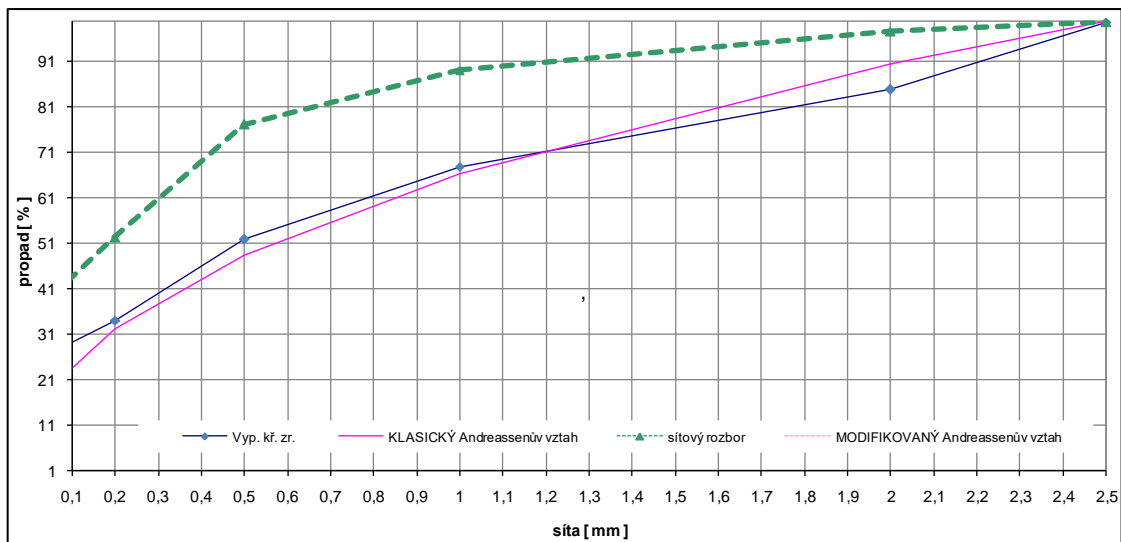
Velikost zrn [mm]	Složení před experimentem [%]	Složení po experimentu [%]
2,5	2,3	0,3
2	7,5	2
1	19,6	8,6
0,5	15,5	12
0,2	19,4	24,8
0,09	5,5	9,5
< 0,09	30,2	42,8

Na Obr. 5.31 je uvedeno grafické zpracování síťového rozboru experimentálního lisovacího materiálu před experimentem. Na tomto obrázku modrá křivka znázorňuje teoretickou křivku velikosti zrn experimentálního lisovacího materiálu, dále pak zelená křivka znázorňuje skutečné složení velikosti zrn experimentálního lisovacího materiálu, stanovené síťovým rozbohem a růžová křivka pak znázorňuje vypočtené ideální složení experimentálního lisovacího materiálu pro maximální velikost zrna 2,5mm.



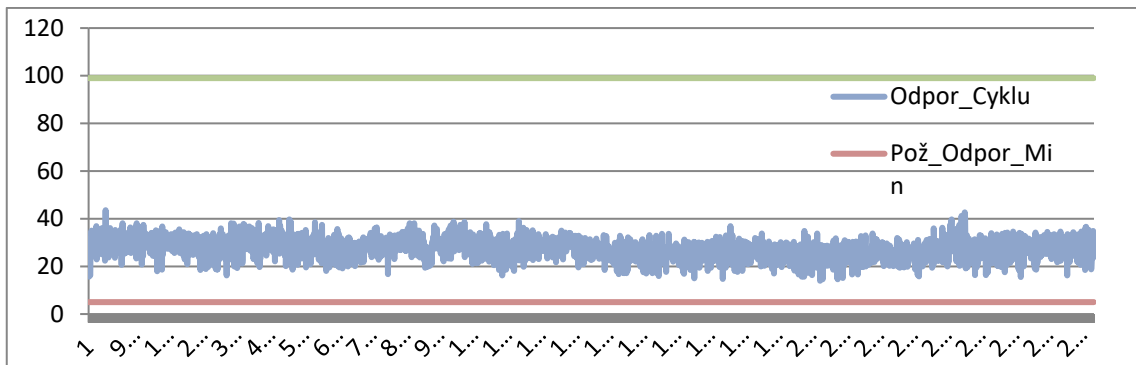
Obr. 5.31: Grafické znázornění sítového rozboru experimentálního lisovacího materiálu před experimentem

Na Obr. 5.32 je uvedeno grafické zpracování sítového rozboru experimentálního lisovacího materiálu po provedeném experimentu. Na tomto obrázku modrá křivka znázorňuje teoretickou křivku velikosti zrn experimentálního lisovacího materiálu, dále pak zelená křivka znázorňuje skutečné složení velikosti zrn experimentálního lisovacího materiálu, stanovené sítovým rozbohem a růžová křivka pak znázorňuje vypočtené ideální složení experimentálního lisovacího materiálu pro maximální velikost zrna 2,5mm.



Obr. 5.32: Grafické znázornění sítového rozboru experimentálního lisovacího materiálu po 1 cyklu experimentu

V průběhu zkušebního provozu experimentálního zařízení bylo testováno chování experimentálního zařízení s různým složením experimentálního lisovacího materiálu. Výsledný experimentální lisovací materiál je směs materiálu 10% M1-2, 50% MO-2, 20% PR32, 20% MT8. Tento materiál se vyznačuje maximální velikostí zrna 1 mm. Záznam průběhu lisovacího odporu při použití tohoto experimentálního lisovacího materiálu je znázorněn na Obr. 5.33.



Obr. 5.33: Test vybrané lisovací směsi 10% M1-2, 50% MO-2, 20% PR32, 20% MT8

Výstupem provedených testů je tedy provozuschopné experimentální zařízení a konkrétní experimentální materiál, který umožní dosáhnout stejných parametrů opotřebení experimentálního lisovacího nástroje, tak jako na běžných lisovacích nástrojích použitých v hydraulických lisech při lisování vysoce abrazivních žárovzdorných materiálů.

V souvislosti s výsledky provedených síťových rozborů experimentálního lisovacího materiálu před a po provedeném experimentu je nutné konstatovat, že pro realizaci zkoušek je nutné, aby byl lisovaný materiál použit vždy nový, tak aby procesní parametry testování odpovídali skutečnosti. Opětovné použití lisovaného materiálu není možné. Objem násypky lisovaného materiálu musí umožnit realizaci testu 5 000 cyklů bez doplnění.

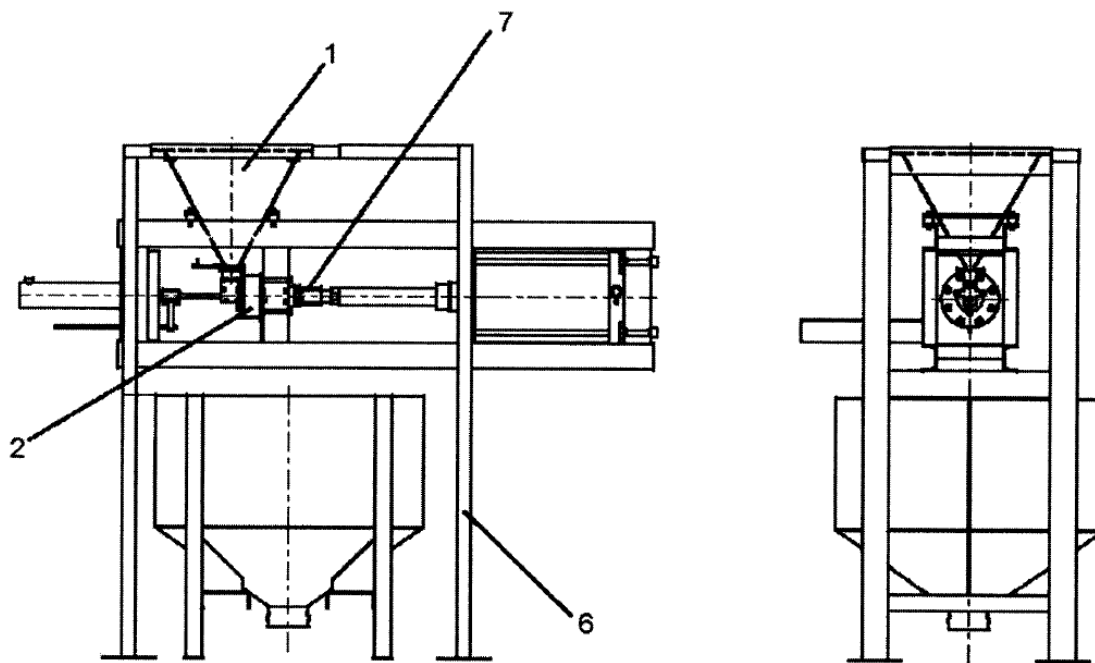
5.5 Zařízení pro experimentální ověřování životnosti lisovacích nástrojů určených pro lisování žárovzdorných materiálů

Experimentální zařízení určené pro ověřování životnosti lisovacích nástrojů určených pro lisování žárovzdorných materiálů je předmětem patentu PV 2015-126 – „Experimentální stroj pro testování otěruvzdornosti, zejména při lisování žárovzdorných materiálů“. [K1] Patentované zkušební zařízení rozšiřuje metody experimentálního zkoušení odolnosti materiálů proti otěru v extrémních podmínkách. Zařízení umožňuje dosáhnout stejných podmínek a mechanismů opotřebení, ke kterým dochází při lisování žárovzdorných materiálů. Spolu se zařízením pro testování opotřebení byla rovněž formulována metodika testování. Lisované žárovzdorné materiály jsou klíčovým stavebním materiálem, který se používá při výstavbě velkých investičních celků, jako jsou ocelárny, cementárny, koksárenské baterie a sklářské pece.

Konstrukční řešení experimentálního zařízení bylo navrženo dle požadavků na lisování vysoce abrazivních žárovzdorných materiálů tak, aby se mechanismus vzniku opotřebení co nejvíce podobal vzniku opotřebení při lisování na skutečných hydraulických lisech ve výrobních závodech. Běžně lisování těchto vysoce abrazivních materiálů probíhá např. na hydraulických lisech SGP se jmenovitým výkonem 630 tun a lisovacím tlakem 45MPa ve vertikální poloze. [K1]

Dle těchto požadavků bylo navrženo i experimentální zařízení. Toto zařízení má možnost lisovat až se jmenovitým tlakem 100MPa. Samotný lisovací cyklus na experimentálním zařízení probíhá tak, že horní razník s hydraulickým pohonem natlačí směs do hnízda experimentálního lisovacího nástroje proti spodnímu razníku, kde je zpětný chod s pneumatickým válcem. Tedy ve chvíli stlačení lisovacího materiálu dojde k přetlačení pneumatického válce hydraulickým pohonem, a tak se vytlačí suchá lisovací směs mimo hnízdo lisovacího nástroje. Lisovaný materiál se tak pohybuje po největší možné dráze vyložení z většího rozměru dutiny lisovacího nástroje do menšího rozměru, lisovacím tlakem až 100MPa. [K1]

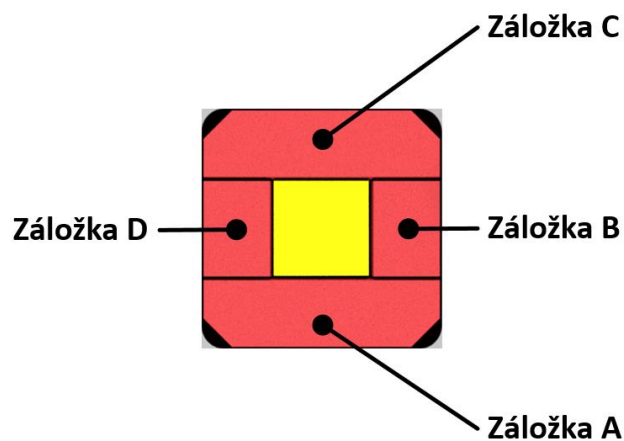
Experimentální stroj pro testování otěruvzdornosti, zejména při lisování žárovzdorných materiálů, viz Obr. 5.34, je tvořen rámem (pozice 6 na Obr. 5.34), ke kterému je z jedné boční strany připojen horní razník (pozice 2 na Obr. 5.34), opatřený hydraulickým válcem, z protilehlé strany spodní razník (pozice 7 na Obr. 5.34), opatřený pneumatickým válcem a v horní části je násypka (pozice 1 na Obr. 5.34), přičemž lisovací nástroj mezi horním razníkem (pozice 2 na Obr. 5.34) a spodním razníkem (pozice 7 na Obr. 5.34), je vyroben s úkosem $0,1 \pm 0,02$ mm při výšce vyložení 65 až 75 mm. [K1]



Obr. 5.34: „Experimentální stroj pro testování otěruvzdornosti, zejména při lisování žárovzdorných materiálů“. [K1]

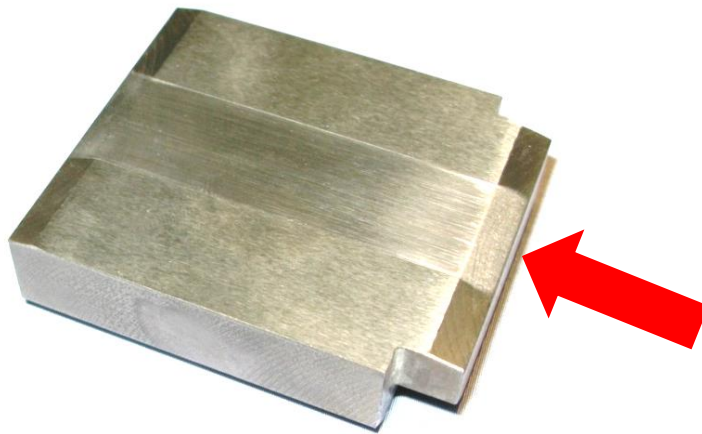
5.6 Metoda pro porovnání výsledků z experimentálního ověřování materiálů

Součástí návrhu metody experimentálního ověřování životnosti odpovídající reálnému lisovacímu cyklu a zároveň jedním z dílčích dílů této disertační práce je také návrh a stanovení metody pro porovnání výsledků z experimentálního ověřování materiálů. Koncepce konstrukčního řešení vyložení experimentálního lisovacího nástroje byla stanovena tak, aby bylo možné co nejjednodušším způsobem měřit velikost opotřebení dílců experimentálního lisovacího nástroje a zároveň bylo možno výsledky jednoduše porovnat. Experimentální lisovací nástroj určený k experimentálnímu ověření velikosti opotřebení je konstrukčně sestaven celkem ze čtyř dílců - záložek. Dva dílce jsou záložky podélné, kdy z pohledu horního razníku je spodní záložka označena jako Záložka A a horní záložka jako Záložka C. Další dva dílce jsou záložky příčné, kdy z pohledu horního razníku je pravá záložka označena jako Záložka B a levá záložka jako Záložka D, viz Obr. 5.35.



Obr. 5.35: Značení dílců záložek experimentálního lisovacího nástroje

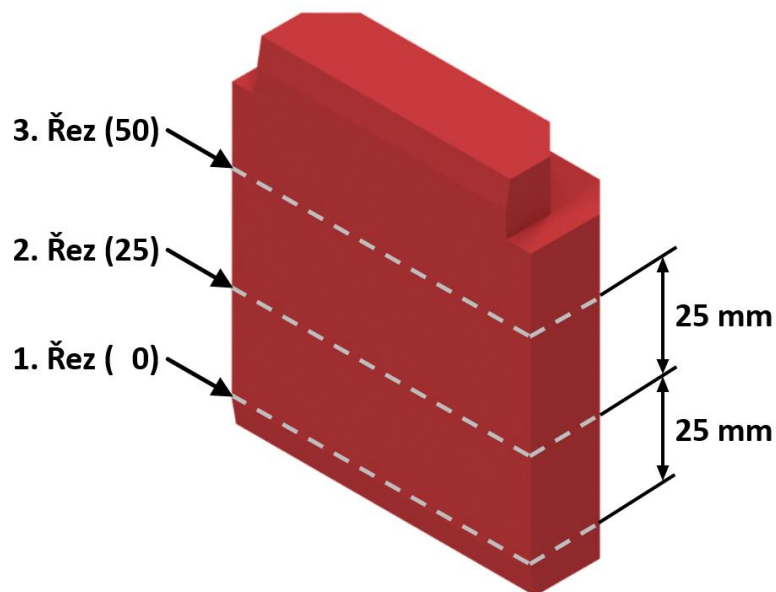
Dílce vhodné pro provedení kontroly velikosti opotřebení jsou záložky podélné. Dílce byly konstrukčně navrženy tak, aby na nich bylo možné provést měření velikosti opotřebení po provedeném experimentu. Na Obr. 5.36 je zobrazená experimentální podélná záložka po provedeném experimentu. Ve střední části dílce podélné záložky je na uvedeném obrázku možno vidět opotřebení po 5000 lisovacích cyklech.



Obr. 5.36: Měřený vzorek a znázorněný směr pohybu horního razníku v lisovacím nástroji

Pro vlastní měření velikosti opotřebení experimentálních vzorků bylo zvoleno kombinované měřicí pracoviště MarSurf XCR 20 umožňující provádění měření hloubky drsnosti a kontur na jednom měřicím pracovišti. Pracoviště je vybavené softwarem pro vyhodnocování profilu i softwarem pro měření kontur. Společné uživatelské prostředí softwaru MarWin má samostatné ovládací prvky pro měření profilu a kontur.

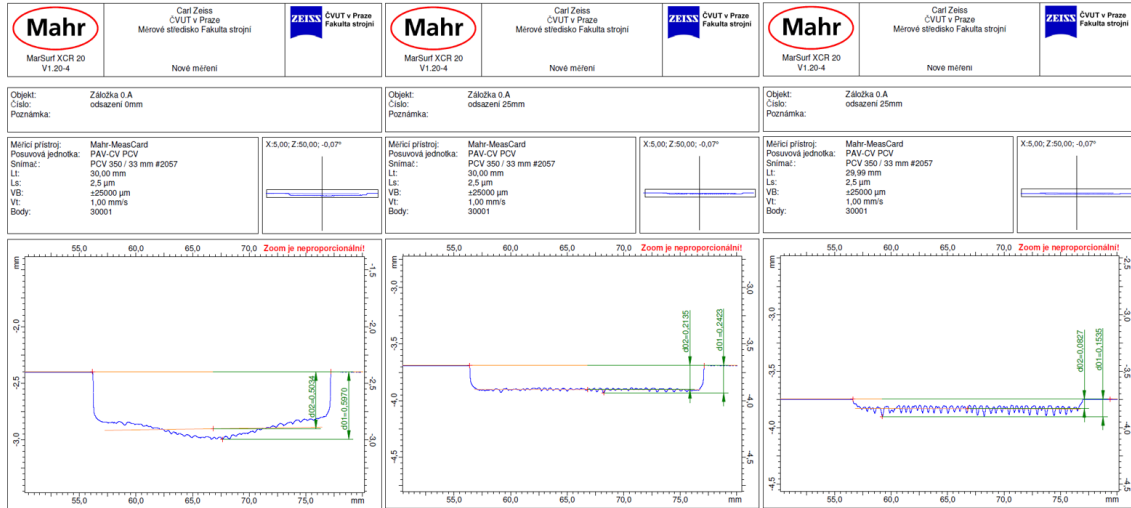
Posledním krokem v návrhu metody kontroly byla definice konkrétních míst pro provedení měření velikosti opotřebení. V této souvislosti byly nadefinovány celkem tři řezy určené pro měření velikosti opotřebení. Tyto řezy na podélné záložce jsou uvedeny na Obr. 5.37. Jednotlivá místa kontroly jsou označeny jako Řez 0, Řez 25 a Řez 50. Poloha Řezu 0 je stanovena ve vzdálenosti 2 mm od spodní hrany sražení záložky (hrana kde lisovaný materiál opouští lisovací nástroj). Poloha Řezu 25 je stanovena ve vzdálenosti 25 mm od Řezu 0 a poloha Řezu 50 je stanovena ve vzdálenosti 25 mm od Řezu 25, tak jak je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 5.37: Záložka s vyznačenými měřenými řezy

V souvislosti s testováním vlastní metody experimentálního ověření abrazivní odolnosti materiálů a zároveň s testováním metody pro hodnocení velikosti opotřebení byl vyroben referenční experimentální lisovací nástroj označen jako 0, který reprezentuje současnou technologii výroby ocelových lisovacích nástrojů. Zároveň takto vyrobený experimentální nástroj bude dále sloužit pro porovnání a lepší orientaci mezi potenciálně lepšími a horšími řešeními.

Na každém řezu je prostřednictvím softwaru vyhodnocena maximální a střední hodnota velikosti opotřebení, pro porovnání a větší vypovídací schopnost bude dále kalkulováno se střední velikostí opotřebení. Pro názornost je na následujícím obrázku uveden export protokolu z měření tří řezů záložky 0 A.



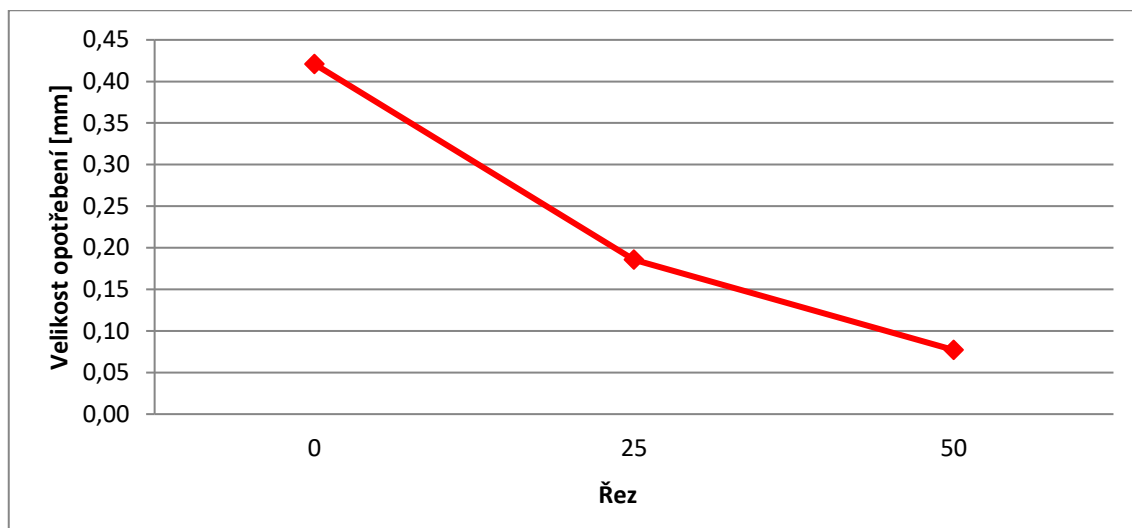
Obr. 5.38: Protokoly z měření velikosti opotřebení referenční záložky 0 A.

Z provedeného měření velikosti opotřebení každé záložky dostaneme celkem šest hodnot – v každém řezu střední a maximální hodnotu. Pro vyhodnocení průměrů (záložek A a C) budou dále brány v úvahu pouze střední hodnoty naměřené v daných řezech. Pro názornost je v následující tabulce uveden příklad naměřených a zpracovaných hodnot velikosti opotřebení referenčních záložek 0.

Tab. 5.3: Příklad naměřených a zpracovaných hodnot velikosti opotřebení záložek 0

Č.Vzorku	Hodnota	A			C			Průměr		
		0	25	50	0	25	50	0	25	50
0	Střed	0,5034	0,2135	0,0827	0,3384	0,1576	0,0715	0,4209	0,1855	0,0771
	Max	0,5970	0,2423	0,1535	0,4231	0,1793	0,0942			

Grafické znázornění střední hodnoty velikosti opotřebení je uveden na Obr. 5.39.



Obr. 5.39: Průběh opotřebení referenční záložky A 0

Na uvedeném obrázku jsou velice zřetelné rozdíly opotřebení v jednotlivých řezech. Je patrné, že největší opotřebení vykazuje záložka v místě Řezu 0, tedy v místě výstupu lisovaného materiálu z experimentálního lisovacího nástroje.

Tímto způsobem měření a následného vyhodnocení budou dále zpracovány všechny experimentální vzorky podrobené experimentálnímu ověření abrazivní odolnosti.

V oblasti vyhodnocení odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení bude brán v úvahu pouze průměr proti sobě ležících podélných záložek A a C.

5.7 Ověření experimentálního zařízení

Následujícím krokem, v řešení problematiky experimentálního ověřování abrazivní odolnosti materiálů, bylo ověření experimentálního zařízení. V rámci tohoto kroku bylo vyrobeno celkem 6 experimentálních referenčních lisovacích nástrojů, které byly podrobeny provoznímu testu experimentálního zařízení. Cílem testů bylo dosáhnout finálního opotřebení na referenčních experimentálních lisovacích nástrojích po 5000 cyklech opotřebení, které odpovídá opotřebení na reálném lisovacím nástroji po 5000 odlisovaných tvarovkách.

Naměřené hodnoty byly zpracovány v programu Microsoft Excel, kde z každé naměřené záložky získáme celkem šest hodnot, a to v každém řezu střední a maximální hodnotu opotřebení. Pro vyhodnocení průměrné hodnoty opotřebení (záložek A a C) jsou uvažovány pouze střední hodnoty opotřebení naměřené v daných řezech. Pro další vyhodnocení a porovnání odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení bude brán v úvahu pouze průměr proti sobě ležících záložek (záložek A a C) v řezu 25. V tomto řezu vykazují vzorky stabilní opotřebení s nejmenším rozpětí hodnot.

Tab. 5.4: Vyhodnocení experimentálních vzorků

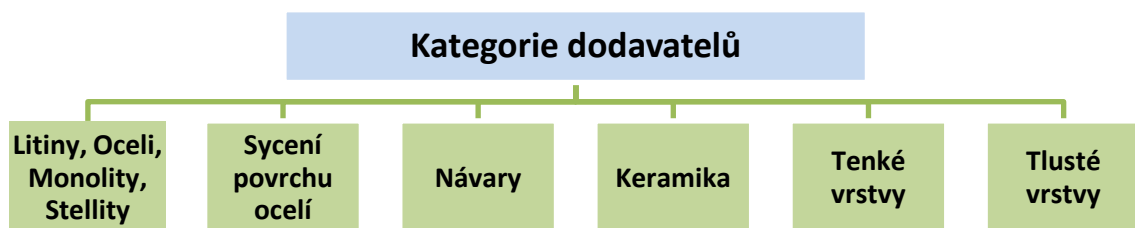
Č.Vzorku	Hodnota	A			C			Průměr		
		0	25	50	0	25	50	0	25	50
0	Střed	0,5034	0,2135	0,0827	0,3384	0,1576	0,0715	0,4209	0,1855	0,0771
	Max	0,5970	0,2423	0,1535	0,4231	0,1793	0,0942			
00	Střed	0,7766	0,5731	0,4533	0,7261	0,3407	0,1813	0,7513	0,4569	0,3173
	Max	0,9172	0,6725	0,5695	0,8556	0,3818	0,2207			
000	Střed	0,6233	0,3240	0,2078	0,2945	0,1700	0,1294	0,4589	0,247	0,1686
	Max	0,7345	0,3616	0,2693	0,3522	0,1920	0,1590			
Z0	Střed	0,6143	0,2885	0,1204	0,2717	0,1443	0,0461	0,443	0,2164	0,0833
	Max	0,7003	0,3078	0,1427	0,3611	0,1589	0,0799			
Z1	Střed	0,5278	0,2368	0,0998	0,3543	0,1948	0,1312	0,4411	0,2158	0,1155
	Max	0,6381	0,2655	0,1648	0,4316	0,2360	0,1815			
Z2	Střed	0,7084	0,3653	0,1398	0,2664	0,1510	0,0647	0,4874	0,2582	0,1023
	Max	0,7991	0,3992	0,1724	0,3247	0,1720	0,1099			

V Tab. 5.4 jsou uvedeny výsledky měření velikosti opotřebení celkem 6 referenčních experimentálních lisovacích nástrojů pro provedených 5000 cyklech na experimentálním zařízení. Během testů referenčního vzorku 0 a 00 byly optimalizovány technologické parametry experimentálního zařízení tak, aby u referenčního vzorku označeného 000 bylo dosaženo

takových parametrů testování, že velikost jeho opotřebení odpovídá opotřebení reálného lisovacího nástroje. Následně byly provozní parametry ověřeny na dalších referenčních vzorcích označených Z0, Z1 a Z2. Lze konstatovat, že tímto testem je ověřena funkčnost experimentálního zařízení a opakovatelnost výsledků. S referenčním vzorkem 000 budou porovnávány další experimentální vzorky opatřené vhodnou úpravou povrchu s předpokladem zvýšení životnosti. Lze tedy říci, že prostřednictvím těchto testů byla ověřena funkčnost experimentálního zařízení a byla ověřena opakovatelnost výsledků experimentů.

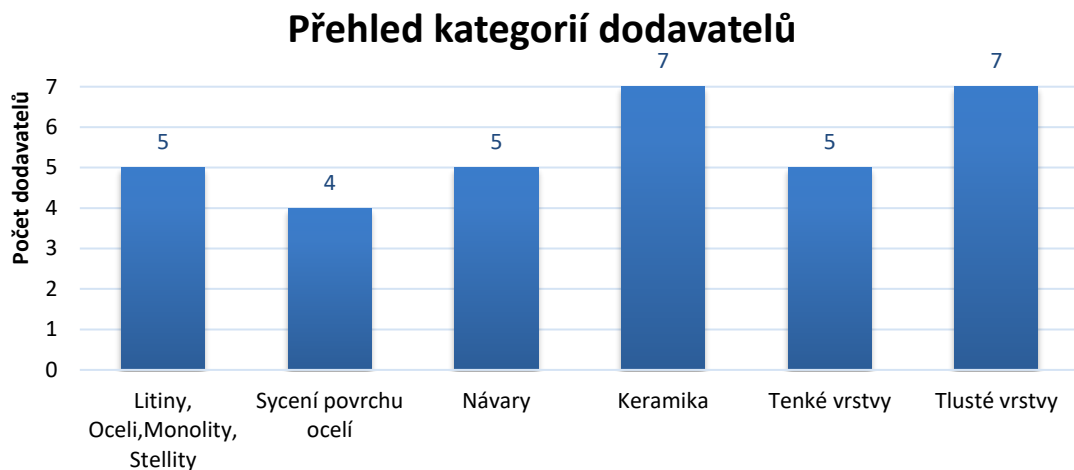
5.8 Výsledky experimentálních zkoušek

V rámci řešení disertační práce byla provedena rešerše metod úprav povrchu pro zvýšení životnosti strojních součástí, viz kapitola 3.2. Na základě rešerše byla provedena další rešerše potenciálních dodavatelů experimentálních vzorků. Rešerše je založena na výběru vhodných materiálů a technologických podmínek depozice materiálů, které mají vliv na výsledné charakteristiky, kterými jsou zejména tvrdost, adheze k základnímu materiálu lisovacího nástroje, drsnost povrchu nanášené vrstvy, otěruvzdornost a nepřilnavost lisovaného materiálu. V rámci rešerše metod úprav povrchu pro zvýšení životnosti strojních součástí byli dodavatelé rozděleni do kategorií „Sycení povrchu ocelí“, „Tenké vrstvy“ a „Tlusté vrstvy“. Tato rešerše byla v rámci výběru dodavatelů rozšířena ještě o kategorie „Litiny, Oceli, Monolity, Stellity“, „Návary“ a „Keramika“. Celkové rozdělení kategorií dodavatelů je uvedeno na Obr. 5.40.



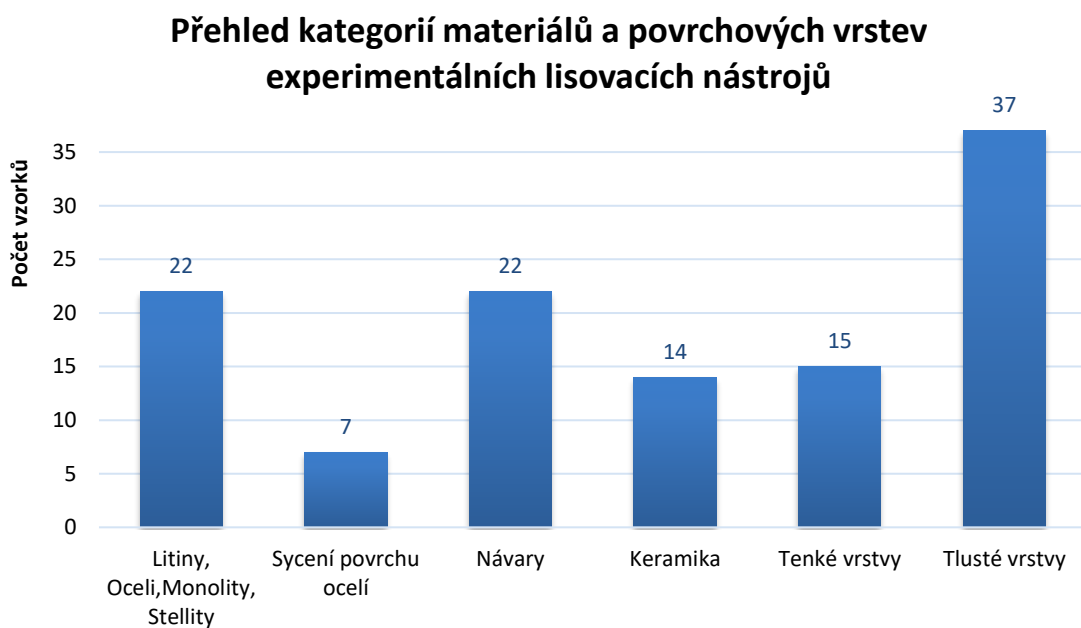
Obr. 5.40: Rozdělení kategorií dodavatelů

Do realizace experimentálních zkoušek abrazivní odolnosti materiálů bylo zapojeno celkem 33 dodavatelů primárně z České republiky, ale také z USA a států Evropské Unie. Dodavatelé zajišťovali výrobu celých experimentálních lisovacích nástrojů (vzorků), tzn. základního materiálů včetně povrchové úpravy, nebo pouze povrchovou úpravu samotnou. Přehled počtu dodavatelů experimentálních lisovacích nástrojů v rámci jednotlivých kategorií je uveden na Obr. 5.41.



Obr. 5.41: Přehled kategorií dodavatelů experimentálních lisovacích nástrojů

Jednotliví dodavatelé byli požádáni o dodávku experimentálních lisovacích nástrojů určených k experimentálnímu ověření odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Výsledný přehled kategorií materiálů a povrchových vrstev experimentálních lisovacích nástrojů je uveden na Obr. 5.42.

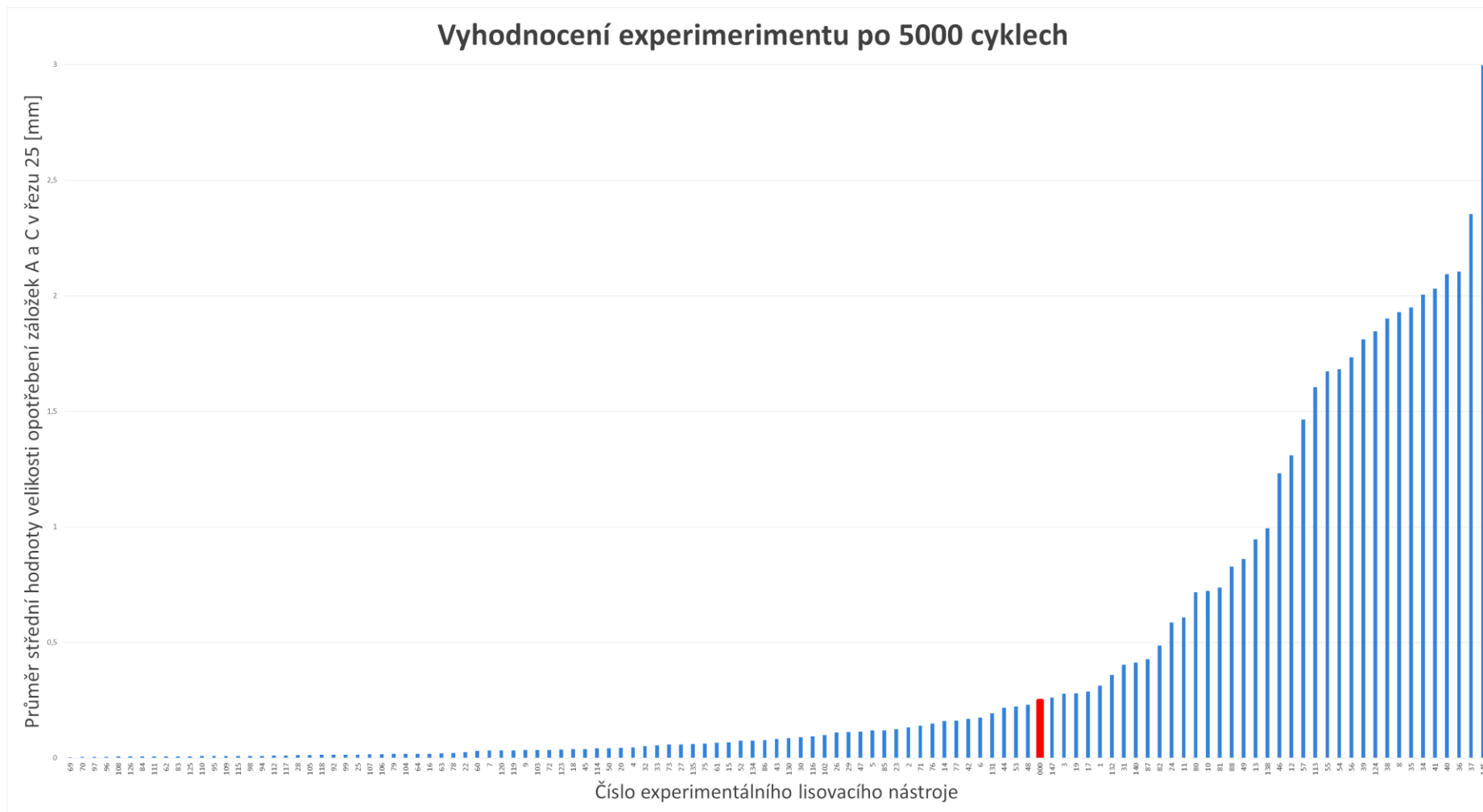


Obr. 5.42: Přehled kategorií materiálů a povrchových vrstev experimentálních lisovacích nástrojů

Celkem bylo dodáno 117 různých experimentálních lisovacích nástrojů. Všechny tyto experimentální nástroje byly podrobeny abrazivní zkoušce odolnosti čítající celkem 5000 lisovacích cyklů na vlastním experimentálním zařízení pro zkoušení abrazivní odolnosti materiálů

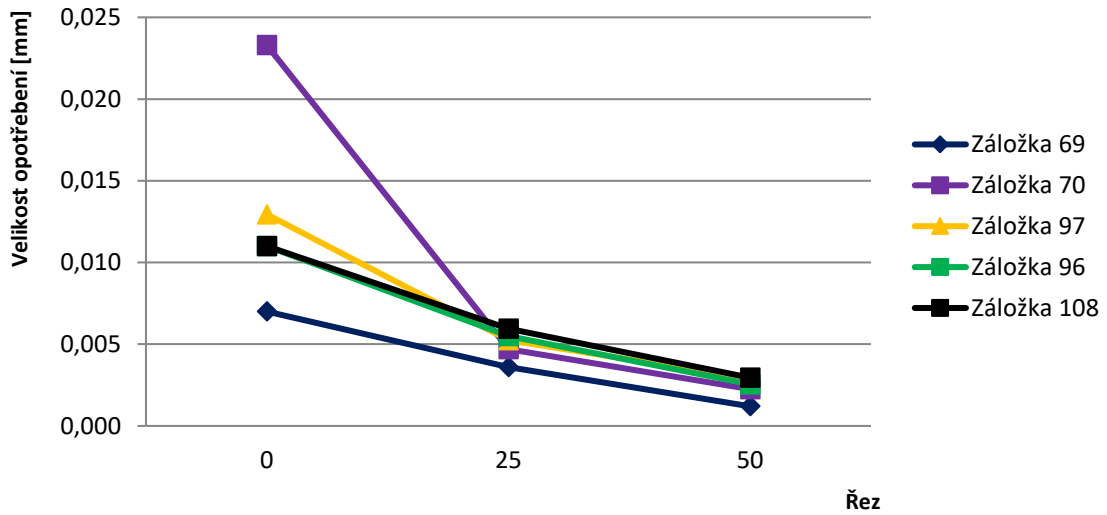
určených pro funkční díly lisovacích nástrojů určených k lisování žárovzdorných materiálů. Následně byla na všech experimentálních lisovacích nástrojích provedena analýza velikosti opotřebení, kdy pro každý experimentální lisovací nástroj byla analyzována záložka A a C ve třech řezech. Celkem tedy bylo v této fázi realizováno na 702 měření velikosti opotřebení.

Na následujícím Obr. 5.43 je znázorněno vyhodnocení průměrné střední velikosti opotřebení záložek A a C společně s referenční záložkou 000 (červená barva) po 5 000 cyklech na experimentálním zařízení. Na pravé straně jsou tedy experimentální lisovací nástroje, které velikostí středního opotřebení v řezu 25 překročily velikost opotřebení referenčního lisovacího nástroje 000. Z toho vyplývá, že jsou pro použití v reálných lisovacích nástrojích zcela nevyhovující.



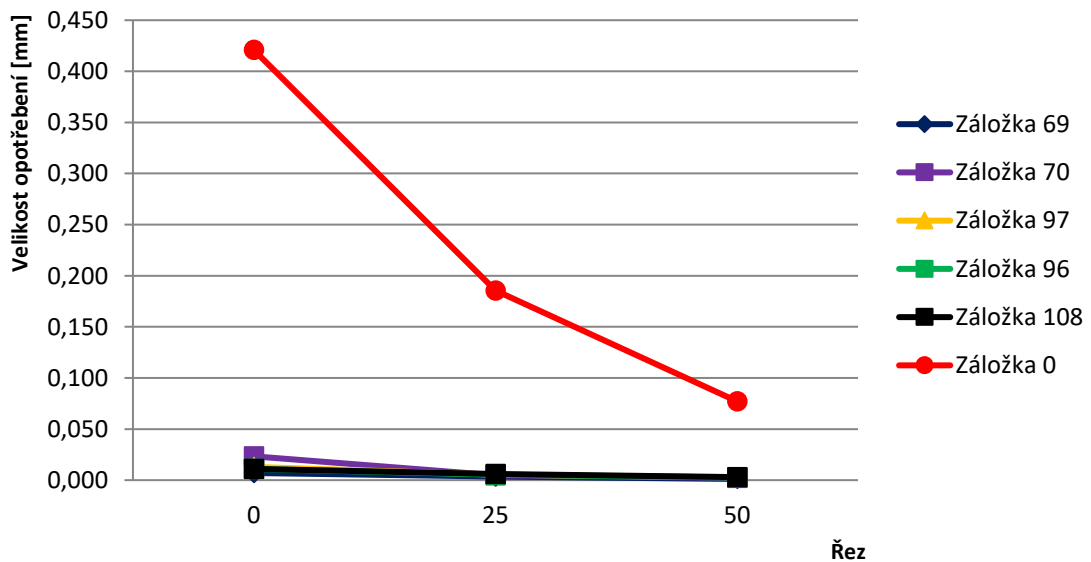
Obr. 5.43: Vyhodnocení velikosti opotřeбенí experimentálních lisovacích nástrojů v řezu 25 po 5000 cyklech

U vybraných záložek bylo provedeno vyhodnocení průběhu opotřebení. Na následujícím Obr. 5.44 je zobrazen průběh opotřebení pěti nejlépe vyhodnocených záložek po 5 000 cyklech.



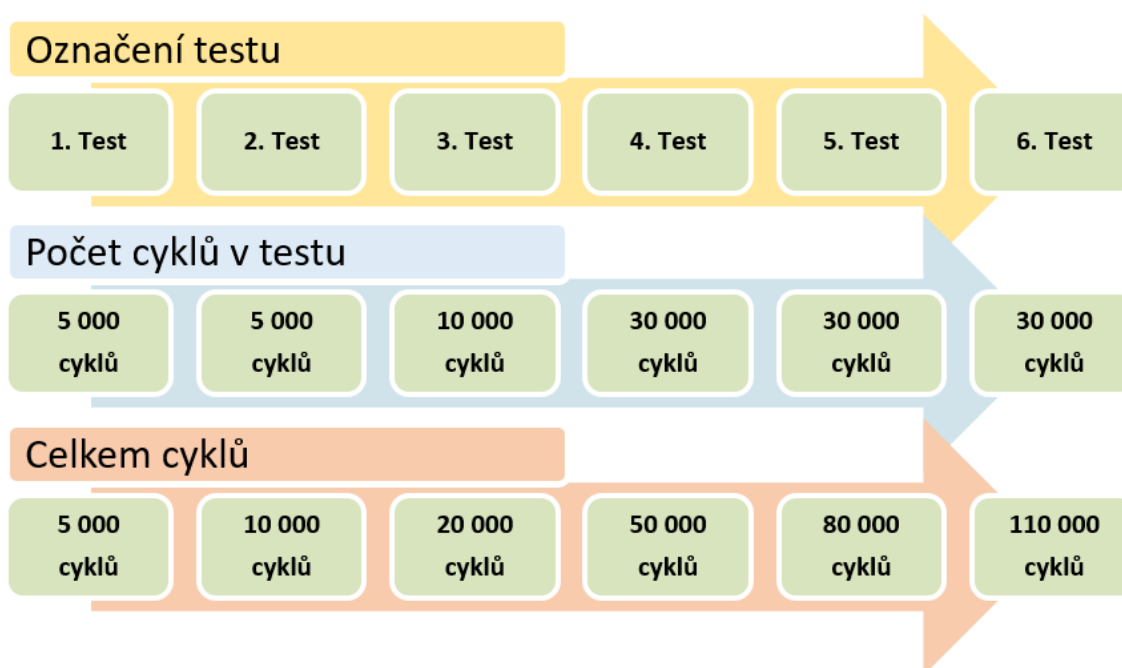
Obr. 5.44: Průběh opotřebení nejlépe vyhodnocených experimentálních lisovacích nástrojů po 5 000 cyklech

Pro viditelný kontrast velikosti opotřebení mezi pěti nejlépe vyhodnocenými záložkami po 5 000 cyklech se záložkou referenční slouží následující grafické znázornění, viz Obr. 5.45.



Obr. 5.45: Průběh opotřebení nejlépe vyhodnocených záložek po 5 000 cyklech společně s referenční záložkou 000

V návaznosti na úvodní experimentální testování abrazivní odolnosti materiálů, kde bylo celkem 117 různých experimentálních lisovacích nástrojů podrobena abrazivní zkoušce odolnosti čítající celkem 5000 lisovacích cyklů, bylo vyhodnoceno celkem 26 experimentálních nástrojů jako vhodných pro další testování. S tímto rozhodnutím byl stanoven plán dalšího testování založený na celkem 6 provedených testech. Cílem každého testu je redukce možných variant finálního řešení. V prvním testu proběhne 5 000 cyklů, ve druhém testu také 5 000 cyklů, ve třetím testu 10 000 cyklů, v testu číslo 4, 5 a 6 proběhne vždy 30 000 cyklů. Plán testování je uveden na Obr. 5.46.



Obr. 5.46: Schéma plánu testování experimentálních lisovacích nástrojů

Každý test je nutné po 5 000 lisovacích testech zastavit a vyměnit horní a dolní razník za nový, jelikož zde neuvažujeme zvýšenou životnost, tak jako na vyložení. V průběhu prvního a druhého testu není třeba provádět výměnu razníků. V průběhu třetího testu je nutné provést jednu výměnu razníku. Ve čtvrtém, pátém a šestém testu je nutné provést výměnu razníku celkem pětkrát.

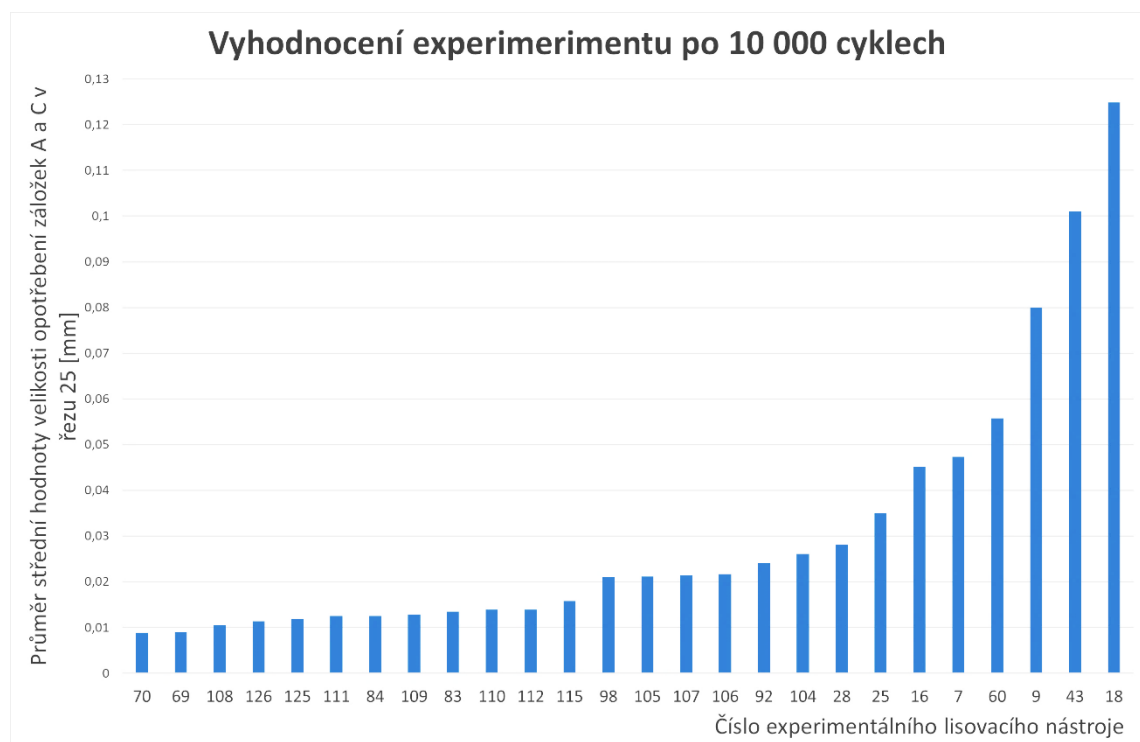
Jako perspektivní materiály, pro další testování, se po provedeném prvním testu ukázaly materiály z kategorie „Litiny, Oceli, Monolity, Stellity“, kategorie „Nitridování, Cementace“ a kategorie „Tlusté vrstvy“ uvedené v rozdělení viz Obr. 5.40. Z pohledu kategorie „Nitridování, Cementace“ byly prvnímu testu podrobeny také experimentální lisovací nástroje, jejichž povrchu byl sycen bórem. Zde bylo provedeno porovnání různých základních materiálů v kombinaci

s různou délkou sycení povrchu. Dílčí výsledky experimentů byly dále hodnoceny také z pohledu zbytkových napětí, mikrostruktury a tvrdosti povrchové vrstvy. [K5] [K10] [K13] [K14] Další dílčí výsledky experimentů byly publikovány v souvislosti s délkou sycení povrchu experimentálních lisovacích nástrojů bórem a s ohledem na jejich výsledné mechanické vlastnosti. [K9]

Z pohledu kategorie „Tlusté vrstvy“ byly prvnímu testu podrobeny také experimentální lisovací nástroje, jejichž povrch byl opatřen vrstvou HVOF nástřiku. Zde byla v souvislosti s velikostí opotřebení hodnocena zejména homogenita deponované vrstvy, její tvrdost a přilnavost k základnímu materiálu. [K11] [K12]

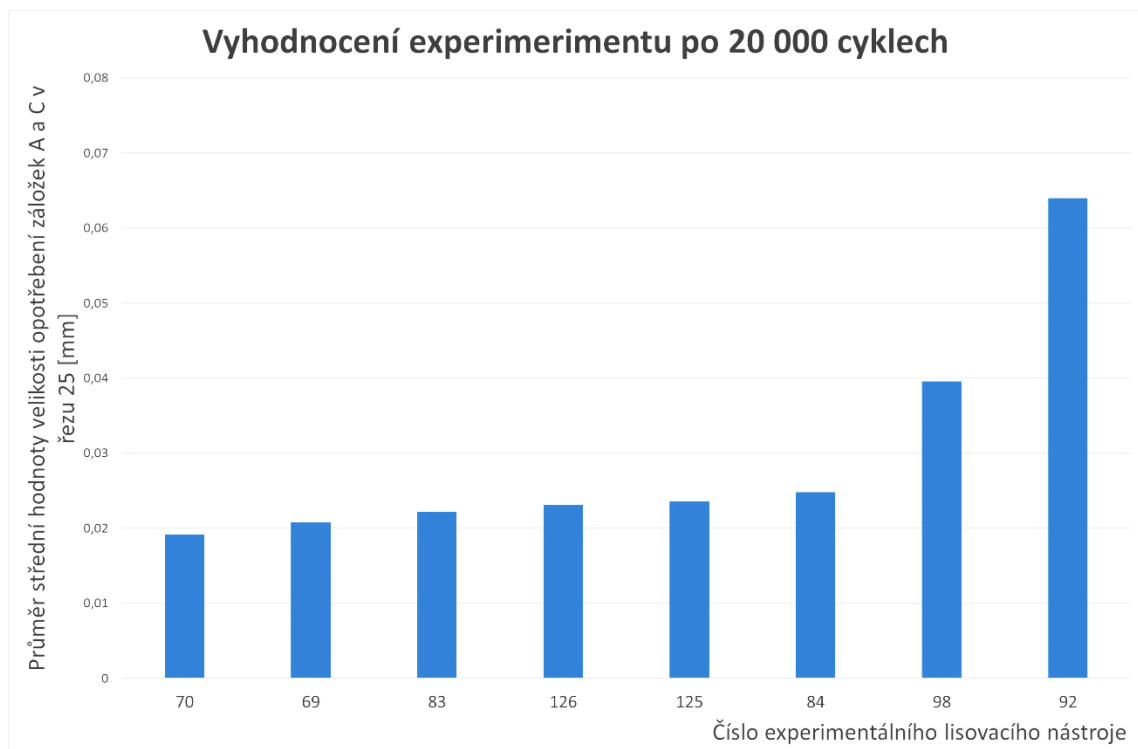
S cílem dosáhnout co nejvyšší životnosti byl také prvnímu testu podroben experimentální lisovací nástroj, jehož povrch byl opatřen vrstvou HVOF nástřiku a následně byla na tuto vrstvu aplikována tenká PVD vrstva. [K8] Tyto perspektivní materiály byly následně podrobeny dalším testům.

Na Obr. 5.46 je znázorněno vyhodnocení průměrné střední velikosti opotřebení záložek A a C po provedeném druhém testu, a to po celkem 10 000 cyklech na experimentálním zařízení.



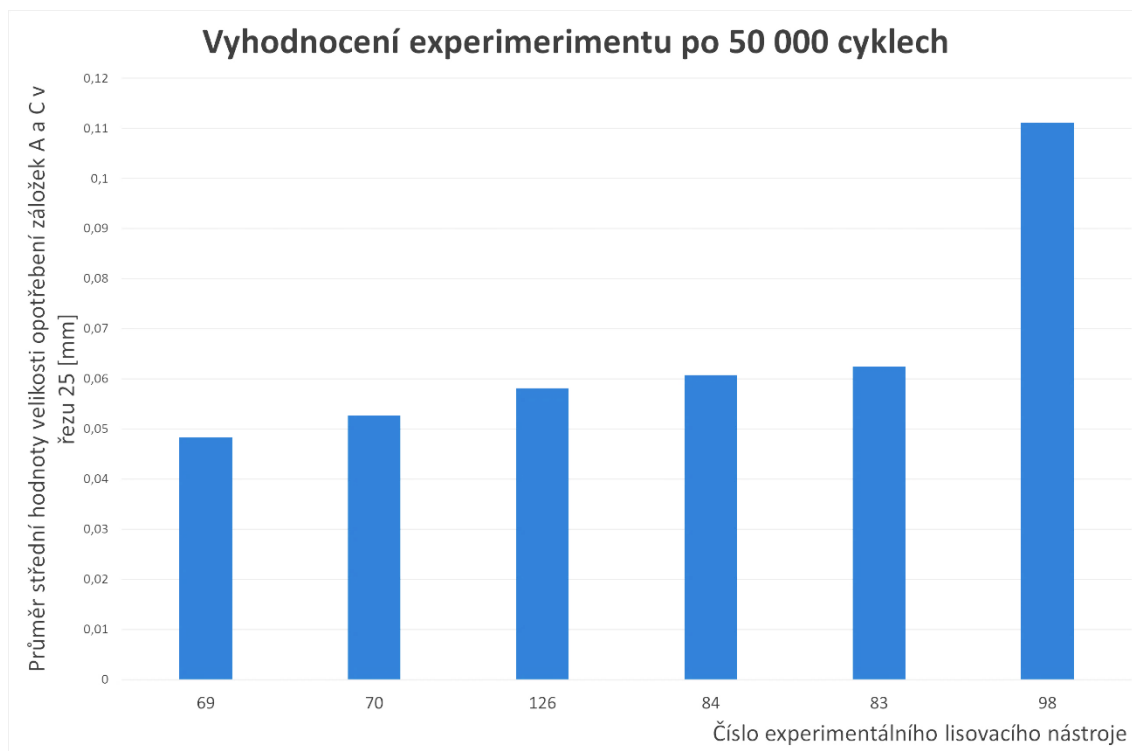
Obr. 5.47: Vyhodnocení velikosti opotřebení experimentálních lisovacích nástrojů v řezu 25 po 10 000 cyklech

Na základě výsledků druhého testu byly vyřazeny experimentální vzorky, které vykazovaly mechanické poškození na funkčním povrchu a vzorky, které z pohledu budoucích nákladů při nasazení v reálném nástroji jsou řádově vyšší. Z těchto důvodů bylo dále testováno pouze 8 experimentálních lisovacích nástrojů. Na Obr. 5.48 je znázorněno vyhodnocení průměrné střední velikosti opotřebení záložek A a C po provedeném třetím testu, a to po celkem 20 000 lisovacích cyklech na experimentálním zařízení.



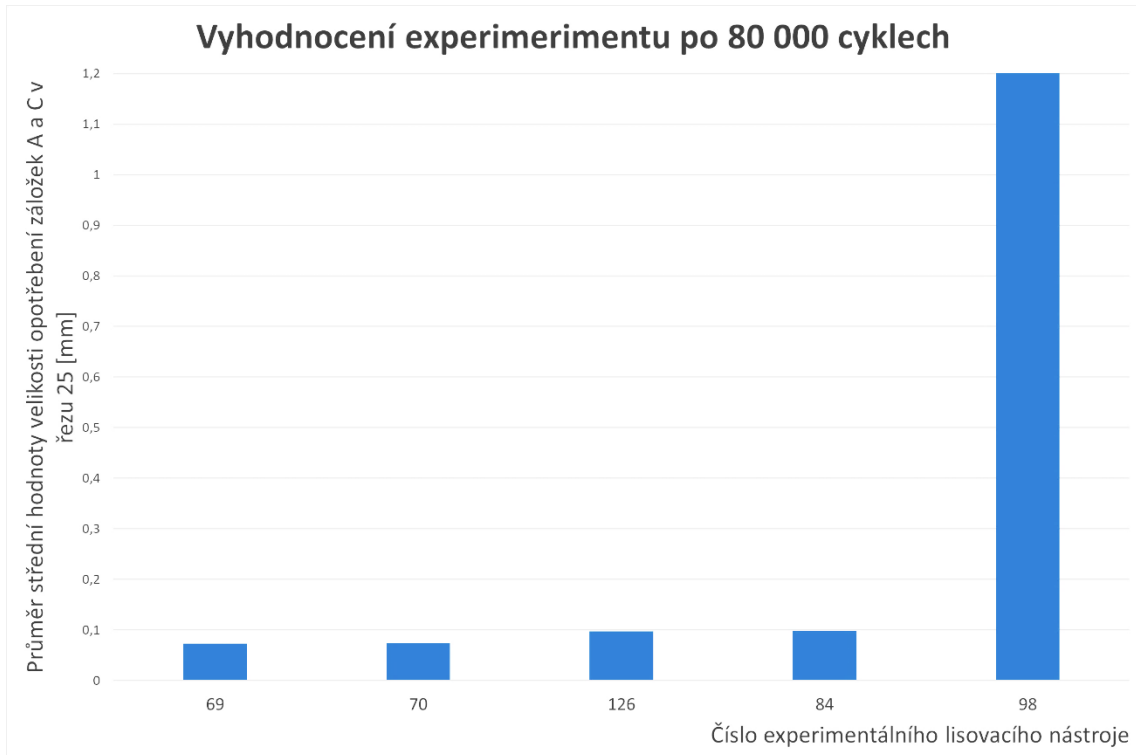
Obr. 5.48: Vyhodnocení velikosti opotřebení experimentálních lisovacích nástrojů v řezu 25 po 20 000 cyklech

Na základě výsledků třetího testu byly vyřazeny experimentální vzorky, které vykazovaly mechanické poškození na funkčním povrchu a vzorky, které vykazovaly řádově vyšší opotřebení v řezu 50. Z těchto důvodů bylo dále testováno pouze 6 experimentálních lisovacích nástrojů. Na Obr. 5.49 je znázorněno vyhodnocení průměrné střední velikosti opotřebení záložek A a C po provedeném čtvrtém testu, a to po celkem 50 000 lisovacích cyklech na experimentálním zařízení.



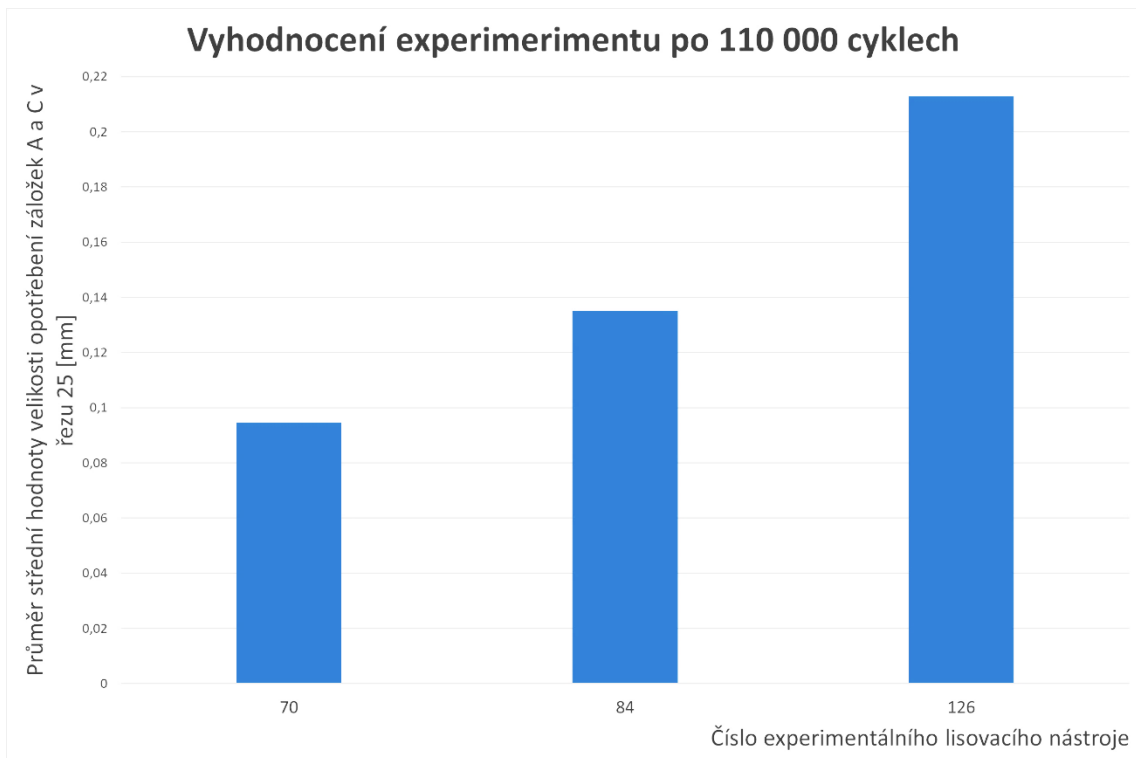
Obr. 5.49: Vyhodnocení velikosti opotřebení experimentálních lisovacích nástrojů v řezu 25 po 50 000 cyklech

Na základě výsledků čtvrtého testu byl vyřazen experimentální vzorek číslo 83, který vykazoval řádově vyšší opotřebení funkčního povrchu v řezu 50. Z tohoto důvodu bylo dále testováno pouze 5 experimentálních lisovacích nástrojů. Na Obr. 5.49 je znázorněno vyhodnocení průměrné střední velikosti opotřebení záložek A a C po provedeném pátém testu a to po celkem 80 000 lisovacích cyklech na experimentálním zařízení.



Obr. 5.50: Vyhodnocení velikosti opotřebení experimentálních lisovacích nástrojů v řezu 25 po 80 000 cyklech

Na základě výsledků pátého testu byl vyřazen experimentální vzorek číslo 98, který vykazoval řádově vyšší opotřebení funkčního povrchu. Dále byl vyřazen vzorek číslo 69, který po provedeném testu vykazoval mechanické poškození funkčního povrchu, a to křehký lom. Z tohoto důvodu byly dále testovány pouze 3 experimentální lisovací nástroje. Na Obr. 5.49 je znázorněno vyhodnocení průměrné střední velikosti opotřebení záložek A a C po provedeném závěrečném šestém testu, a to po celkem 110 000 lisovacích cyklech na experimentálním zařízení.

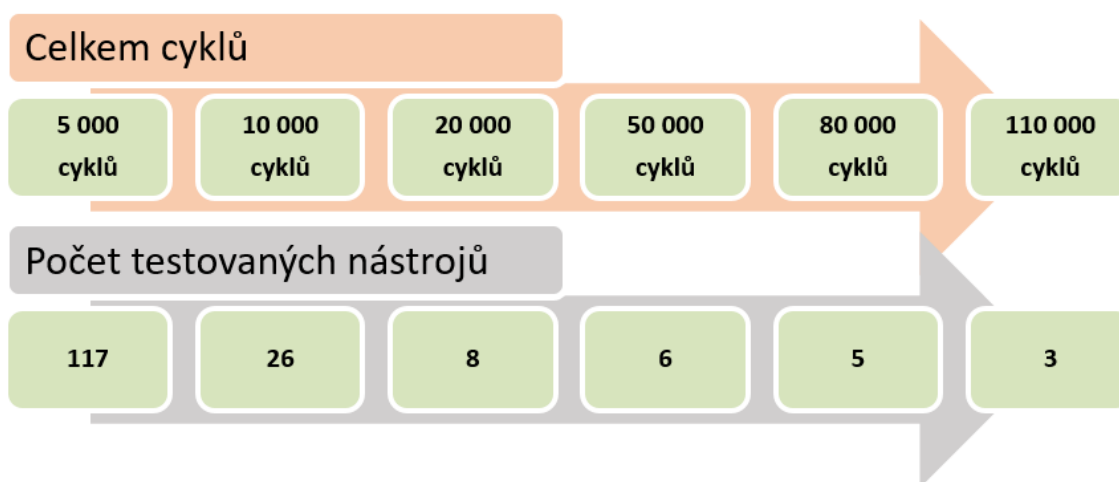


Obr. 5.51: Vyhodnocení velikosti opotřebení experimentálních lisovacích nástrojů v řezu 25 po 110 000 cyklech

Z výsledků posledního testu je patrné, že všechny tři experimentální lisovací nástroje splňují podmínku řádově vyšší odolnosti proti opotřebení při lisování žárovzdorných vysoce abrazivních materiálů. Střední hodnota opotřebení nejlepšího experimentálního nástroje pro realizaci 110 000 lisovacích cyklů na experimentálním zařízení vykazuje hodnotu 0,09465 mm na stěně lisovacího nástroje. Jedná se tedy o téměř poloviční opotřebení, než které vykazuje referenční experimentální lisovací nástroj po 5 000 lisovacích cyklů na experimentálním zařízení.

5.9 Shrnutí experimentálního testování a výběr varianty

V rámci experimentálních zkoušek bylo celkem vyrobeno celkem 117 experimentálních lisovacích nástrojů. Všechny tyto nástroje byly podrobeny prvnímu testu na celkem 5 000 lisovacích cyklů. Druhému testu bylo podrobena celkem 26 experimentálních lisovacích nástrojů, třetímu testu 8 experimentálních lisovacích nástrojů, čtvrtému testu 6 experimentálních lisovacích nástrojů, pátému testu 5 experimentálních lisovacích nástrojů a poslednímu testu byly podrobeny 3 experimentální lisovací nástroje, které dosáhly testované životnosti 110 000 cyklů, viz Obr. 5.52.



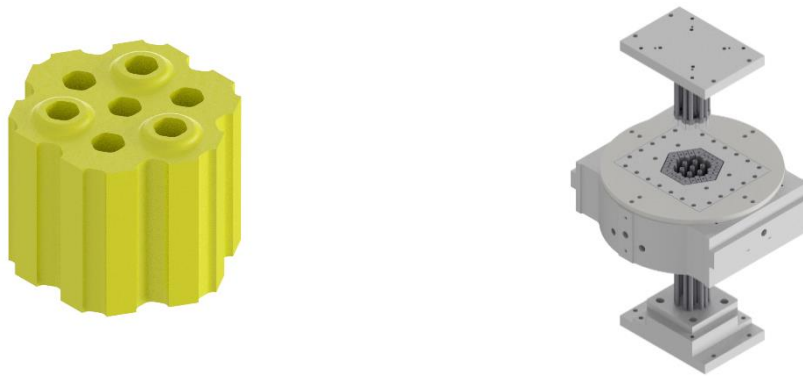
Obr. 5.52: Přehled experimentů

V průběhu testování bylo realizováno celkem 165 experimentálních testů, kde během těchto testů bylo spotřebováno celkem 486 kusů razníků a více než 182 tun žárovzdorného abrazivního materiálu. Bylo provedeno celkem 1,215 milionu cyklů během 1 215 hodin testování, viz Tab. 5.5.

Tab. 5.5: Přehled informací o experimentálních zkouškách abrazivní odolnosti materiálů

Název	Hodnota
Počet experimentálních lisovacích nástrojů	117 nástrojů
Celkový počet testů	165 testů
Celkový počet použitých razníků	486 ks
Spotřeba žárovzdorného materiálu	182,25 tun
Celková doba testování	1 215 hodin
Celkový počet cyklů experimentálního zařízení	1 215 000 cyklů
Celkový počet měření velikosti opotřebení	990 protokolů

Hlavním výsledkem provedených testů jsou tři alternativní materiálová řešení pro nový typ lisovacího nástroje určeného pro lisování žárovzdorných materiálů. Pro porovnání ekonomické stránky jednotlivých variant řešení byla požádána společnost P-D Refractories CZ a.s., jakožto největší tuzemský producent žárovzdorných materiálů a zároveň největší světový výrobce lisovacích nástrojů pro lisování žárovzdorných materiálů, o volbu vhodného komplexního lisovacího nástroje. Byl zvolen tvarově komplexní lisovací nástroj určený pro tvarově náročnou velkosériovou produkci tvarovek určených pro ohřívače větrů, viz Obr. 5.53.



Obr. 5.53: Tvarově náročný lisovací nástroj vpravo a tvarově náročný výlisek určený pro ohřívače větrů vlevo

Cenová kalkulace na výrobu nového takto tvarově náročného lisovacího nástroje vyrobeného standardní výrobní technologií, která je určená pro ocelové lisovací nástroje, se pohybuje na úrovni 500 000 Kč.

Prvním materiálem je materiál použitý na výrobu experimentálního lisovacího nástroje číslo 70. Zde se jedná o monolitický cermetový materiál. Cenová nabídka, od dodavatelské společnosti tohoto řešení, na výrobu nového tvarově náročného lisovacího nástroje byla 750 000 Euro (cca 19 000 000 Kč). V tomto případě by musela být životnost tohoto nástroje téměř 40ti násobná oproti standardnímu lisovacímu nástroji. Teoretická životnost lisovacího nástroje číslo 70 je pak vypočtená na 58ti násobek životnosti standardního lisovacího nástroje. Lze tedy soudit, že toto řešení má pouze drobné ekonomické přínosy. Z tohoto důvodu nebude pro aplikaci na reálný lisovací nástroj uvažováno využití tohoto.

V pořadí druhým, z pohledu experimentálního ověření abrazivní odolnosti, nejlepším experimentálním lisovacím nástrojem je nástroj s číslem 84. Zde se jedná o odolnou funkční vrstvu aplikovanou na podkladní materiál pomocí laboratorní metody žárového nástřiku. Tato metoda není v současné době průmyslově rozšiřitelná. Je možné deponovat vrstvy pouze na

laboratorních vzorcích. Z tohoto důvodu nebude pro aplikaci na reálný lisovací nástroj uvažováno využití tohoto materiálu.

Posledním experimentálním lisovacím nástrojem, který byl podroben testu na 110 000 lisovacích cyklů, je nástroj s číslem 126. Zde se jedná o odolnou funkční vrstvu aplikovanou na podkladní materiál pomocí metody žárového nástřiku. Na základě tohoto experimentálního lisovacího nástroje vznikl prototyp s názvem „*Optimální materiálové složení lisovací formy a ochranného povlaku*“. [K2] Konkrétní řešení podkladního materiálu a konkrétní materiálové řešení funkční vrstvy je předmětem vlastního know-how, na jehož základě je uzavřena licenční smlouva mezi společnostmi P-D Refractories CZ a.s. a ČVUT v Praze, Fakultou strojní. Cenová kalkulace na výrobu nového tvarově náročného lisovacího nástroje opatřeného funkční vrstvou odpovídající vrstvě na vzorku číslo 126, se pohybuje na úrovni 1 500 000 Kč. Jedná se tedy o trojnásobek ceny standardního lisovacího nástroje. Teoretická životnost experimentálního lisovacího nástroje číslo 126 je pak 25ti násobek životnosti standardního lisovacího nástroje. Lze tedy soudit, že toto řešení má významné ekonomické přínosy.

Celkové porovnání tří potencionálních materiálů vhodných pro konstrukci lisovacích nástrojů je uvedeno v Tab. 5.6.

Tab. 5.6: Porovnání potencionálních materiálů vhodných pro konstrukci lisovacích nástrojů

Název	Označení experimentálního nástroje			
	000	70	84	126
Cena nového lisovacího nástroje [Kč]	500 000	19 000 000	-	1 500 000
Násobek životnost [x]	1	58	40	25
Teoretický počet výlisek [Ks]	5 000	225 000	200 000	125 000
Náklady na 1 výlisek [Kč]	100	65	-	12

Z výše popsaných důvodů a primárně ekonomického účinku bude pro aplikaci na reálný lisovací nástroj uvažováno právě s materiálovým řešením, které odpovídá experimentálnímu lisovacímu nástroji číslo 126. Toto řešení umožní řádové snížení nákladů na lisovací nástroje, kdy na 1 vylisovaný výlisek bude možné kalkulovat náklady 12 Kč oproti nákladům při použití běžných nástrojů, které činí přibližně 100 Kč na 1 výlisek.

6. Aplikace výsledků na reálný lisovací nástroj

V souvislosti s aplikací výsledků experimentálního výzkumu byla požádána společnost P-D Refractories CZ a.s. o spolupráci v oblasti konstrukce a vývoje prototypu lisovacího nástroje, jehož funkční povrch bude odpovídat funkčnímu povrchu experimentálního lisovacího nástroje číslo 126. Stejně jako v předchozí kapitole 5.9, kde byl zvolen pro porovnání ekonomické stránky jednotlivých variant řešení komplexní lisovací nástroj určený pro tvarově náročnou velkosériovou produkci tvarovek určených pro tak zvané „ohřívače větrů“ bude i pro aplikaci výsledků abrazivních zkoušek použit tento typ lisovacího nástroje, určen pro lisování konkrétní tvarovky DGS1 3/55K, viz Obr. 6.1.



Obr. 6.1: Tvarově náročný výlisek označený jako DGS1 3/55K určený pro použití v „ohřívačích větrů“

Tato tvarovka splňuje základní požadavky na lisovací nástroje se zvýšenou životností, a to komplexní tvar a velkosériová produkce. Pro tuto konkrétní tvarovku je navrženo konstrukční řešení s ohledem na technologičnost konstrukce nového materiálového řešení funkčního povrchu lisovacího nástroje. Z pohledu technologie výroby nového funkčního povrchu není možné využít původní konstrukční řešení lisovacího nástroje a je nutné navrhnout zcela nové konstrukční řešení. Konkrétní konstrukční řešení lisovacího nástroje je předmětem vlastního know-how, na jehož základě je uzavřena licenční smlouva mezi společností P-D Refractories CZ a.s. a ČVUT v Praze, Fakultou strojní. Z tohoto důvodu nebudou dále uváděny žádné detailní prvky tohoto řešení, žádné materiálové vlastnosti základního materiálu, ani způsob aplikace funkčního povrchu.

6.1 Konstrukční řešení lisovacího nástroje

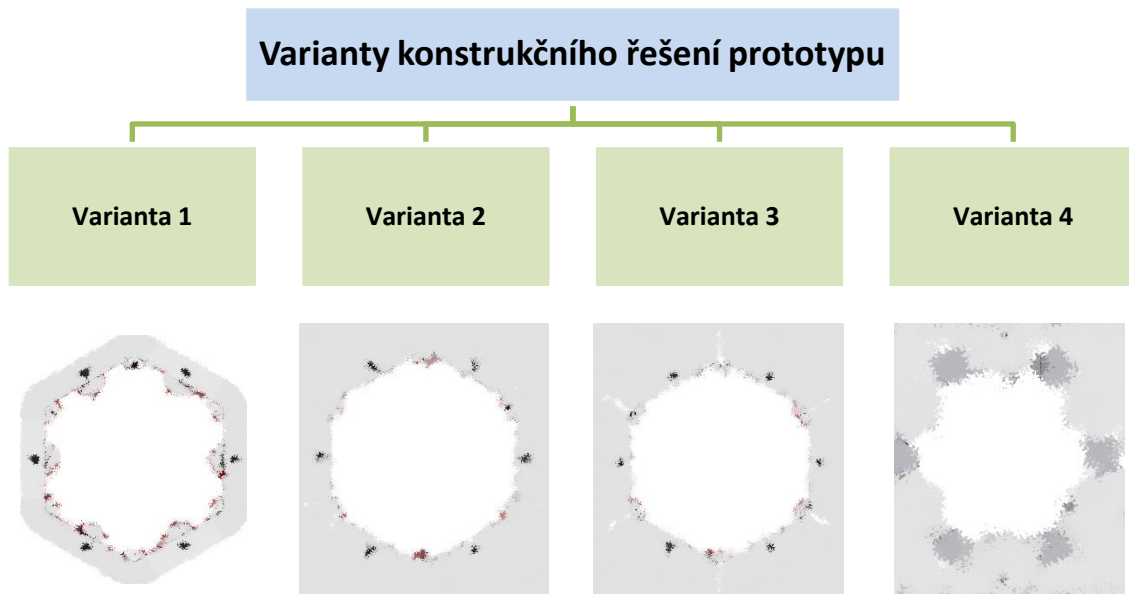
Na novém konstrukčním řešení lisovacího nástroje (dále jen prototypu) se zároveň podílel konstrukční tým společnosti P-D Refractories CZ a.s., kteří do konstrukčního řešení implementovali stávající postupy a zvyklosti při konstrukci lisovacích nástrojů určených pro výrobu žárovzdorných materiálů. Na základě společných diskuzí byly stanoveny základní požadavky na konstrukci prototypu. Tyto požadavky jsou uvedeny na Obr. 6.2.



Obr. 6.2: Základní požadavky na novou konstrukci lisovacího nástroje

Z pohledu pevnosti musí prototyp splnit základní požadavek na zatížení lisovacím tlakem až na úroveň 100 MPa. Druhým základním požadavkem je maximální využití stávající výrobní technologie ocelových lisovacích nástrojů, která je k dispozici ve společnosti P-D Refractories CZ a.s. Přehled této technologie je uveden v bakalářské práci autora [58]. Z pohledu montáže prototypu je nutné dodržet základní požadavky a zvyklosti při montáži lisovacích nástrojů a zároveň uvažovat veškeré montážní přípravy a pomůcky, které jsou běžně k dispozici ve společnosti P-D Refractories CZ a.s. Nový požadavkem na konstrukci z pohledu montáže je požadavek na montáž bez narážení uzavíracích dílců lisovacího nástroje. Z pohledu konstrukce je tento požadavek zcela zásadní a je nutné konstrukci prototypu tomuto požadavku zcela podřídit. Dalším požadavkem je pro konstrukci prototypu využití stávajícího systému standardizace ve společnosti P-D Refractories CZ a.s. Posledním požadavkem na konstrukci prototypu bylo dodržení technologičnosti konstrukce z pohledu aplikace funkčního povrchu na jednotlivé dílce prototypu.

Na základě výše zmíněných požadavků vznikly celkem 4 varianty konstrukčního řešení prototypu. Konstrukční řešení vnitřního vyložení jednotlivých variant je schematicky znázorněno na Obr. 6.3.



Obr. 6.3: Variety konstrukčního řešení vnitřního vyložení prototypu (detail konstrukčního řešení je z důvodu licencování rozmazán)

Varianta 1 je založena na konstrukčním řešení, které uvažuje dělení záložek na tři rovinné dílce a dva tvarové dílce jejich vzájemná poloha je vymezena pomocí pera. Tato varianta je vzhledem k náročnosti výroby tvarových záložek a komplikacím při depozici funkčního povrchu pro reálný lisovací nástroj a rozšíření do sériové výroby nevhodná.

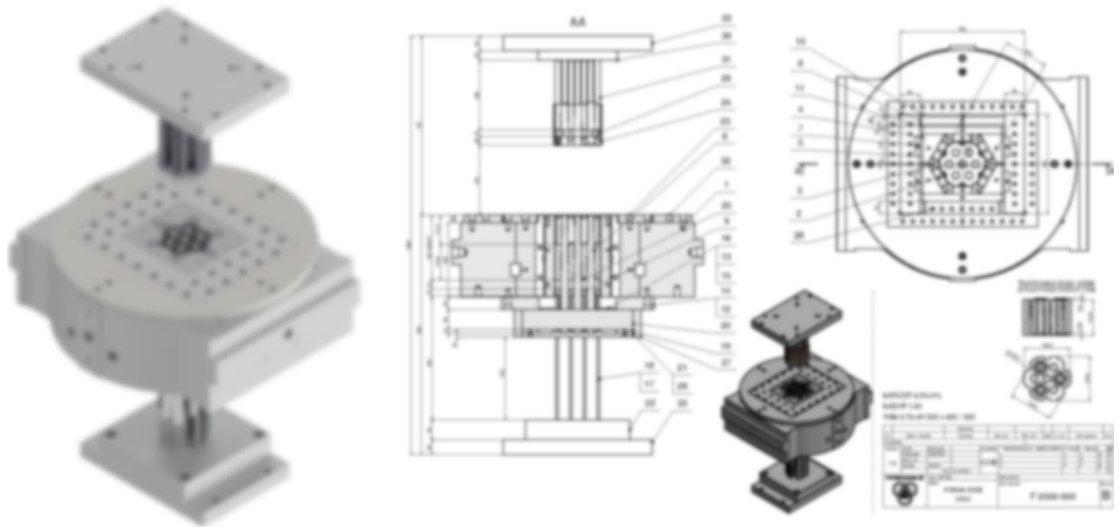
Varianta 2 je založena na konstrukčním řešení, které uvažuje vložení vnitřního vyložení lisovacího nástroje do přípravku, který by umožňoval změny rozměru vyložení s využitím depozitních dílců. Toto konstrukční řešení se ukázalo jako nevhodné z důvodu velice subtilní konstrukce klíčových dílců lisovacího nástroje, kde provedená simulace zatížení lisovacího nástroje vykazovala značné deformace stěžejních komponent.

Varianta 3 je založena na konstrukčním řešení, které uvažuje vložení vnitřního vyložení lisovacího nástroje do přípravku, ke kterému by se vnitřní vyložení fixovalo pomocí šroubů a vymezení polohy by bylo realizováno pomocí pera. Toto konstrukční řešení je z důvodu vysokých požadavků na přesnost výroby a zároveň z důvodu vysokých požadavků na pracnost montáže nevhodné.

Varianta 4 je založena na konstrukčním řešení, které uvažuje vložení vnitřního vyložení lisovacího nástroje do přípravku, který se skládá ze dvou dílů s možností polohové aretace. K přípravku se jednotlivé funkční dílce lisovacího nástroje fixují pomocí šroubů a vymezení jejich polohy je

realizováno prostřednictvím pera. Z pohledu požadavků na kvalitu výroby, požadavků na aplikaci funkční vrstvy a zároveň požadavků na pracnost montáže je toto konstrukční řešení vyhovující.

Na základě varianty 4 byly dále konstrukčně navrženy lisovací nástroje. Jeden lisovací nástroj určený pro lis SGP 800 konstruovaný jako jednohřízdrový, viz Obr. 6.4, a druhý lisovací nástroj pro lis SACMI PHR 1000 konstruovaný jako dvouhřízdrový.

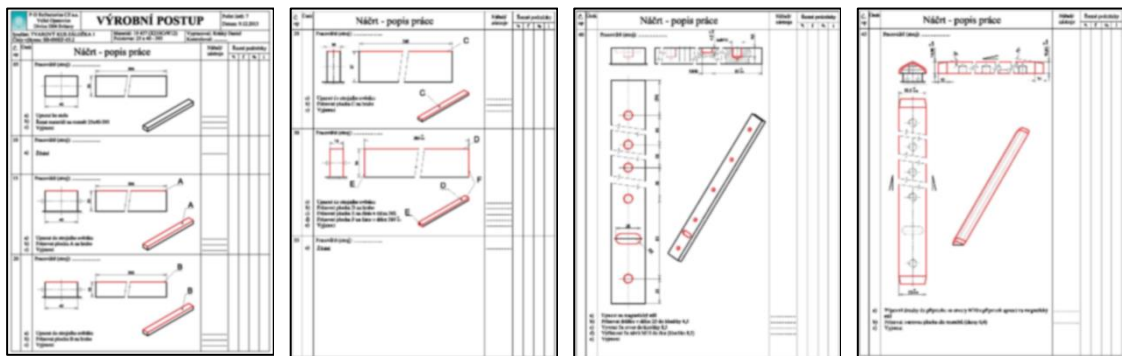


Obr. 6.4: Finální konstrukční řešení prototypu jednohřízdrového lisovacího nástroje

Z důvodu redukce nákladů na výrobu prototypu a následnou realizaci provozních zkoušek pro ověření navržených řešení byl zvolen lisovací nástroj s jednohřízdrovou konstrukcí. Na základě konstrukčního řešení lisovacího nástroje vznikl prototyp s názvem „Optimální konstrukční uspořádání nového typu lisovací formy“. [K3] Konkrétní konstrukční řešení lisovacího nástroje je předmětem vlastního know-how, na jehož základě je uzavřena licenční smlouva mezi společností P-D Refractories CZ a.s. a ČVUT v Praze, Fakultou strojní.

6.2 Výroba prototypu

Na základě konstrukční dokumentace prototypu lisovacího nástroje bylo dále nutné zpracovat technologii výroby jednotlivých komponent lisovacího nástroje. Pro ilustraci je na Obr. 6.5 zobrazena výrobní dokumentace dílce určeného pro aplikaci funkční vrstvy. S ohledem na dodavatele funkčního povrchu bylo nutné zpracovat výrobní dokumentaci ve třech provedeních. První provedení slouží pro výrobu jednotlivých komponent před aplikací funkčního povrchu, druhé provedení slouží pro dodavatele funkčního povrchu a poslední provedení pro dokončovací operace jednotlivých komponent.



Obr. 6.5: Výrobní dokumentace prototypu lisovacího nástroje

Po jednáních s dodavatelem funkčního povrchu bylo dále nutné zajistit konstrukci a výrobu speciálních přípravků pro upínání jednotlivých komponent lisovacího nástroje při aplikaci funkčního povrchu. Na základě těchto jednání byla dále zpracována směrnice „Technické požadavky na dodavatele funkčního povrchu“, která upřesňuje technické požadavky na dodávky funkčního povrchu z pohledu geometrické přesnosti povrchu a maximálních povolených deformací jednotlivých komponent lisovacího nástroje.

Na základě výše zmíněné dokumentace byl vyroben a následně smontován prototyp jednohřízdrového lisovacího nástroje, viz Obr. 6.4.

6.3 Provozní zkoušky prototypu lisovacího nástroje

Pro ověření životnosti prototypového lisovacího nástroje byla navržena provozní zkouška, u které byla z důvodu vysokých nákladů na lisovaný materiál, provoz lisů a omezení zakázkové výroby společnosti P-D Refractories CZ a.s., omezena délka série na 20 000 ks tvarovek pozice DGS1 3/55K. Během provozní zkoušky bylo stanoveno nutné měření velikosti opotřebení funkčního povrchu prototypu lisovacího nástroje po 5 000 tvarovkách, po 10 000 tvarovkách a po 20 000 tvarovkách. Následně je opotřebení prototypu lisovacího nástroje porovnáno s opotřebením experimentálního lisovacího nástroje číslo 126 a tímto způsobem také validováno metodika zkoušky opotřebení na experimentálním zařízení s opotřebením reálných lisovacích nástrojů v běžném provozu.

Pro provozní zkoušku prototypu lisovacího nástroje byl použit lisovací materiál označený jako Dinas DUCW, který je určen pro běžnou výrobu pozice DGS1 3/55K. Jedná se o hutný křemičitý materiál s vysokým obsahem SiO_2 , jehož složení je uvedeno v Tab. 6.1. Lisovací materiál Dinas DUCW se vyznačuje pevností v tlaku min. 35 MPa, zdánlivou pórovitostí 22% a objemovou hmotností $1800 \text{ Kg} / \text{m}^3$.

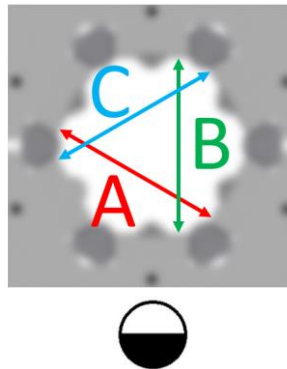
Tab. 6.1: Chemické složení materiálu Dinas DUCW

Chemické složení					
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$
Podíl [%]	95,6	0,5	0,8	2,8	0,3

Standardní lisovací nástroj určený pro lisování dinasových materiálů, tedy hutných křemičitých materiálů s vysokým obsahem SiO_2 , dosahuje standardně opotřebení 0,5 mm na stěně vyložení po cca 5000 kusech výlisků. Opotřebení lisovacího nástroje pro pozici DGS1 3/55K vyrobeného standardní technologií, která odpovídá experimentálnímu lisovacímu nástroji číslo 000, s použitím výše zmíněné lisovací směsi DUCW je 5 000 cihel s opotřebením 0,5 mm na vnitřním rozměru vyložení lisovacího nástroje, tedy 0,25 mm na stěně lisovacího nástroje. Opotřebení je limitní z důvodu dodržení rozměrových tolerancí finálních výrobků pozice DGS1 3/55K.

6.3.1 Metoda vyhodnocení zkoušek

Vhledem ke skutečnosti, že je prototyp lisovacího nástroje určený pro půdorysně šestihranný výlisek, tak vlastní vyhodnocení velikosti opotřebení prototypu je realizováno prostřednictvím kontroly vnitřních rozměrů lisovacího nástroje ve 3 řezech (místa měření), které jsou označeny z pohledu operátora lisu jako A, B a C, viz následující Obr. 6.6. Tyto hodnoty jsou následně využity pro výpočet průměrné hodnoty vnitřního rozměru hnízda lisovacího nástroje.



Obr. 6.6: Místa pro kontrolu rozměru lisovacího nástroje pro pozici DGSI 3/55K

6.3.2 Vyhodnocení standardního lisovacího nástroje

Z pohledu vyhodnocení a porovnání výsledků bylo prvním krokem ověření velikosti opotřebení standardního lisovacího nástroje, vyrobeného běžným způsobem ve společnosti P-D Refractories CZ a.s. Hodnoty naměřené v jednotlivých řezech po montáži standardního lisovacího nástroje a po provozní zkoušce lisování 5 000 tvarovek jsou zpracovány v Tab. 6.2.

Tab. 6.2: Naměřené hodnoty velikosti vnitřního rozměru standardního lisovacího nástroje

Opotřebení standardního lisovacího nástroje po 5 000 tvarovkách			
Místo měření	Počáteční rozměr hnízda [mm]	Konečný rozměr hnízda [mm]	Průměrné opotřebení hnízda [mm]
A	176,95	177,51	0,546
B	176,98	177,49	
C	176,91	177,48	

Z výsledků měření velikosti vnitřního rozměru lisovacího nástroje před lisování a po lisování 5 000 tvarovek je patrné, že opotřebení reálného standardního lisovacího nástroje po 5 000 tvarovkách odpovídá opotřebení experimentálního lisovacího nástroje číslo 000 po 5 000 cyklech

v místě 0, tedy cca 0,25 mm na stěnu formy, s ohledem na prvotní vymezení vŭlí v reálném lisovacím nástroji během lisování.

6.3.3 Vyhodnocení prototypového lisovacího nástroje

Prvním krokem pro vyhodnocení velikosti opotřebení prototypového lisovacího nástroje vyrobeného na základě kombinace základního materiálu a funkčního povrchu odpovídajícího experimentálnímu lisovacímu nástroji číslo 126, byla kontrola velikosti opotřebení po 5 000 odlisovaných tvarovkách. Hodnoty naměřené v jednotlivých řezech po montáži prototypového lisovacího nástroje a po provozní zkoušce lisování 5 000 tvarovek jsou zpracovány v následující Tab. 3.3.

Tab. 6.3: Naměřené hodnoty velikosti vnitřního rozměru prototypového lisovacího nástroje po lisování 5 000 tvarovek

Opotřebení standardního lisovacího nástroje po 5 000 tvarovkách			
Místo měření	Počáteční rozměr hnízda [mm]	Konečný rozměr hnízda [mm]	Průměrné opotřebení hnízda [mm]
A	176,91	176,96	0,046
B	176,94	176,99	
C	176,99	177,03	

Z výsledků měření je patrné, že opotřebení prototypového lisovacího nástroje po 5 000 tvarovkách neodpovídá opotřebení experimentálního lisovacího nástroje číslo 126 po 5 000 cyklech. Opotřebení experimentálního lisovacího nástroje číslo 126 bylo po 5 000 cyklech cca 0,01 mm. Rozdílné hodnoty naměřené při provozní zkoušce jsou dány zejména vymezením vŭlí v lisovacím nástroji, nikoli opotřebením funkčního povrchu. Naměřené „Průměrné opotřebení hnízda“ lisovacího nástroje bylo po 5 000 tvarovkách 0,046 mm. Za předpokladu přesného vymezení vŭlí lze odhadovat reálné opotřebení na cca 0,01 mm. Pro potvrzení této hypotézy nejlépe poslouží vyhodnocení opotřebení po 10 000 odlisovaných cihlách, kde lze očekávat, že jsou všechny vŭle již vymezeny.

Hodnoty naměřené v jednotlivých řezech po montáži prototypového lisovacího nástroje a po provozní zkoušce lisování 10 000 tvarovek jsou zpracovány Tab. 6.4.

Tab. 6.4: Naměřené hodnoty velikosti vnitřního rozměru prototypového lisovacího nástroje po lisování 10 000 tvarovek

Opotřebení standardního lisovacího nástroje po 10 000 tvarovkách			
Místo měření	Počáteční rozměr hnízda [mm]	Konečný rozměr hnízda [mm]	Průměrné opotřebení hnízda [mm]
A	176,91	176,97	0,057
B	176,94	177,00	
C	176,99	177,04	

Naměřené výsledky ukazují, že opotřebení prototypového lisovacího nástroje po 10 000 tvarovkách již odpovídá opotřebení experimentálního lisovacího nástroje číslo 126 po 10 000 cyklech.

Hodnoty naměřené v jednotlivých řezech po montáži prototypového lisovacího nástroje a po provozní zkoušce lisování 20 000 tvarovek jsou zpracovány v následující Tab. 6.5.

Tab. 6.5: Naměřené hodnoty velikosti vnitřního rozměru prototypového lisovacího nástroje po lisování 20 000 tvarovek

Opotřebení standardního lisovacího nástroje po 20 000 tvarovkách			
Místo měření	Počáteční rozměr hnízda [mm]	Konečný rozměr hnízda [mm]	Průměrné opotřebení hnízda [mm]
A	176,91	177,00	0,09
B	176,94	177,14	
C	176,99	177,09	

Při porovnání hodnot naměřených z prototypového nástroje je zřejmé, že opotřebení odpovídá opotřebení experimentálního nástroje číslo 126, tedy cca 0,045 mm, se započtením odchylky, která je dána vymezením vůlí v lisovacím nástroji během prvních lisovacích cyklů.

Výsledky provozních zkoušek prototypu byly následně přímo implementovány pro výrobu lisovacích nástrojů ve společnosti P-D Refractories CZ a.s. Kdy hlavním přínosem bylo pro společnost výrazné snížení výroby neshodných tvarovek až na hranici 1 % (dříve cca 10 %), možnost lisovat větší série tvarovek, snížení počtu vynucených odstávek lisu a možnost zachovat si vlastní know-how spojené s výrobou lisovacích nástrojů. [K4][K6][K7]

6.4 Závěry kapitoly a shrnutí výsledků provozních zkoušek

Z výsledků experimentálních zkoušek abrazivní odolnosti experimentálních lisovacích nástrojů testovaných na vyvinutém experimentálním zařízení, viz kapitola 5.9, je patrné, že aplikací vhodné kombinace podkladního materiálu a funkčního povrchu je možné několika násobně zvýšit životnost lisovacích nástrojů. Jako vhodná kombinace podkladního materiálu a funkčního povrchu byla na základě provedených zkoušek vybrána varianta experimentálního lisovacího nástroje číslo 126. Pro aplikaci této varianty číslo 126 bylo z důvodu technologických omezení při aplikaci funkčního povrchu nutné zcela změnit konstrukční řešení lisovacího nástroje určeného pro produkci tvarovky pozice DGS1 3/55K, viz kapitola 6.1.

Pro ověření prototypu lisovacího nástroje byla navržena provozní zkouška, u které byla z důvodu vysokých nákladů na lisovaný materiál, provoz lisů a omezení zakázkové výroby společnosti P-D Refractories CZ a.s. omezena délka série na 20 000 ks tvarovek pozice DGS1 3/55K. Během této zkoušky byla provedena kontrola velikosti opotřebení funkčního povrchu prototypu lisovacího nástroje po 5 000 tvarovkách, po 10 000 tvarovkách a po 20 000 tvarovkách. Následně bylo toto opotřebení porovnáno s opotřebením experimentálního lisovacího nástroje číslo 126.

Z provedených dílčích závěrů jednotlivých kapitol je možné zhodnotit novou metodiku zvyšování životnosti nástrojů určených k lisování žárovzdorných materiálů jako validovanou a verifikovanou. Výsledky velikosti hodnoty opotřebení experimentálních lisovacích nástrojů odpovídající opotřebení reálných lisovacích nástrojů při běžném provozu.

Díky výsledkům provozních zkoušek prototypu, uvedeným v kapitole 6.3, lze také odhadnout teoretickou životnost prototypového lisovacího nástroje. S ohledem na tloušťku funkční vrstvy, nutné technologické úpravy funkčního povrchu a omezující podmínky dané lisovacím tlakem pro lisování dinasových materiálů lze očekávat reálnou životnost prototypu lisovacího nástroje cca 130 000 cihel, což je oproti původnímu stavu více než 25 x vyšší životnost lisovacího nástroje.

V návaznosti na provozní zkoušku prototypu byly výsledky testování prototypu přímo zavedeny do výroby lisovacích nástrojů, kdy byl v následujícím roce vyroben další lisovací nástroj, konstrukčně koncipovaný jako dvouhřízdomý, pro výrobu šamotových tvarovek. [K4][K6][K7] Lisovací nástroj byl, dle informací společnosti P-D Refractories CZ a.s., schopen vyprodukovat 750 000 tvarovek, tedy 375 000 tvarovek na jedno hřízdo. Zde bylo dosaženo 75 x vyšší životnosti lisovacího nástroje než je tomu u běžných ocelových lisovacích nástrojů.

7. Závěry a diskuze výsledků

Doktorská práce s názvem „Zvyšování životnosti nástrojů určených k lisování žárovzdorných materiálů“ se zabývá problematikou abrazivní odolnosti materiálů v průmyslovém využití. Práce je strukturována do jednotlivých kapitol, kde v úvodní části práce je uveden přehled problematiky opotřebení lisovacích nástrojů určených pro lisování žárovzdorných materiálů. Jsou zde popsány žárovzdorné materiály s důrazem na jejich dělení dle [12] [14] a důrazem na jejich materiálové složení dle [12], standardně používané materiály pro výrobu lisovacích nástrojů, ale je zde popsána i problematika životnosti lisovacích nástrojů, která se pohybuje na hranici 5 000 výlisků. Právě životnost nástrojů je ovlivněna různorodostí abrazivních procesů a zároveň nedostatečnou znalostí těchto procesů. Z tohoto důvodu lze abrazivní opotřebení pouze velice obtížně pro konkrétní aplikaci dopředu stanovit, případně modelovat. Z toho důvodu, ale i z důvodu řádového zvýšení životnosti lisovacích nástrojů pro žárovzdorné materiály je kladen vysoký důraz na provádění zkoušek odolnosti materiálů proti opotřebení, které budou poskytovat objektivní informace o abrazivní odolnosti konstrukčních materiálů vůči abrazivním žárovzdorným materiálům.

Další kapitola práce je zaměřena na problematiku experimentálního ověřování životnosti materiálů lisovacích nástrojů a na proces vzniku opotřebení. Otěruvzdornost charakterizuje odolnost materiálu při jeho styku se zvoleným okolím z hlediska jeho úbytku. Z vymezení je zřejmé, že otěruvzdornost je konkrétní veličina daná nejen materiálem, který má otěru vzdorovat, ale také prostředím a typem interakce materiálu s tímto prostředím. Nejspolehlivější přístup k určení otěruvzdornosti daného materiálu by zřejmě spočíval ve vystavení konkrétního objektu ze zkoušeného materiálu podmínkám, ve kterých je jeho otěruvzdornost relevantní pro jeho životnost. To je ovšem z praktického hlediska nesmírně drahé a zdlouhavé, neboť by k tomu muselo dojít v rámci podmínek výrobního procesu a za provozu. Z těchto důvodů se používá pro stanovení otěruvzdornosti takřka výlučně laboratorních měření. K dispozici jsou čtyři standardní metodiky testování, které se označují se jako „Dry-sand, rubber - wheel wear test“, „Pin - on - drum abrasive wear test“, „Impeller – tumbler impact abrasion test“ a „Jaw crusher gouging abrasion test“. [17] [18] Kromě těchto metod existuje v celosvětovém měřítku velké množství alternativních řešení a rozšíření k základním metodám, ovšem všechny tyto metody mají společného jmenovatele, a to, že výstupní data z testování abrazivní odolnosti materiálů většinou nemají zcela přesnou vypovídající hodnotu, jako data získaná monitoringem reálného provozního opotřebení strojní součástí, a to zejména z důvodu, že konstrukční řešení

experimentálních zařízení je koncipováno tak, aby bylo možné simulovat co největší spektrum způsobů abrazivního opotřebením z pohledu nasazení strojních součástí v provozu. Negativní výstupy provedené rešerše dostupných testů abrazivních zkoušek jsou předpokladem k vývoji vlastní experimentální metody testování abrazivní odolnosti konstrukčních materiálů určených pro lisování žárovzdorných materiálů, tímto byl stanoven i hlavní cíl této práce.

Uvedené nedostatky všech laboratorních metod, jsou do značné míry odstraněny návrhem experimentálního zařízení pro zkoušky abrazivní odolnosti konstrukčních materiálů, zejména při lisování žárovzdorných materiálů. [K1] Princip zařízení je založen na provedené analýze mechanismu vzniku opotřebením lisovacích nástrojů, kde byly identifikovány hlavní příčiny vzniku opotřebením. Jedná se o zapichování tvrdých částice lisovaného materiálu na bázi Al_2O_3 nebo SiO_2 do funkčních ploch lisovacího nástroje a následně dochází k rýhování těchto ploch při vytlačování výlisku z lisovacího nástroje, dochází tedy k mikrořezání, kdy se částice chovají jako řezné nástroje. Vlastní technické řešení experimentálního zařízení je předmětem patentu PV 2015-126 – „Experimentální stroj pro testování otěruvzdornosti, zejména při lisování žárovzdorných materiálů“. [K1] Udělenou patentovou ochranou je zabezpečena novost řešení. Plné znění patentu je uvedeno v příloze této práce. V souvislosti s experimentálním zařízením byla vyvinuta přímočará a jednoduchá metoda vyhodnocení otěruvzdornosti konstrukčních materiálů, viz kapitola 0. Prostřednictvím této metody bylo možné porovnat výsledky experimentálních zkoušek abrazivní odolnosti různých konstrukčních materiálů.

V rámci experimentálních zkoušek bylo celkem vyrobeno celkem 117 experimentálních lisovacích nástrojů, které byly podrobeny abrazivnímu testu na celkem 5 000 lisovacích cyklů. Na nejlepších experimentálních nástrojích byly následně realizovány další testy, jejichž výdělkem jsou 3 konkrétní materiálová řešení, která dosáhla testované životnosti 110 000 cyklů. Na základě těchto výsledků vznikl prototyp s názvem „*Optimální materiálové složení lisovací formy a ochranného povlaku*“. [K2] V souvislosti s licenční smlouvou mezi společností P-D Refractories CZ a.s. a ČVUT v Praze, Fakultou strojní, mohly být publikovány pouze dílčí výsledky provedených experimentů abrazivní odolnosti materiálů. Jako dílčí publikovaný výsledek lze chápat porovnání různých konstrukčních materiálů, jejichž povrch byl sycen bórem z pohledu zbytkových napětí, mikrostruktury a tvrdosti povrchové vrstvy. [K5] [K10] [K13] [K14] Další dílčí výsledky byly publikovány v souvislosti s délkou sycení povrchu experimentálních lisovacích nástrojů bórem a s ohledem na jejich výsledné mechanické vlastnosti. [K9] Další dílčí publikované výsledky souvisí s depozicí HVOF vrstev na funkčních dílech lisovacích nástrojů, kde byla hodnocena zejména homogenita deponované vrstvy. [K8] [K11] [K12]

Na základě výsledků experimentálních zkoušek byly stanoveny omezující podmínky technologičnosti konstrukce nového materiálového řešení a byly zpracovány 4 varianty nového konstrukčního řešení lisovacího nástroje. Na základě finální varianty vznikl prototyp s názvem „*Optimální konstrukční uspořádání nového typu lisovací formy*“. [K3] Na základě konstrukční dokumentace prototypu lisovacího nástroje a také na základě zpracované technologie výroby jednotlivých komponent lisovacího nástroje byl vyroben a následně smontován prototyp lisovacího nástroje.

Pro ověření prototypu lisovacího nástroje byla navržena provozní zkouška. Během zkoušky byla provedena kontrola velikosti opotřebení funkčního povrchu prototypu lisovacího nástroje a následně bylo opotřebení porovnáno s opotřebením výsledného experimentálního lisovacího nástroje číslo 126. Díky výsledkům provozních zkoušek prototypu byla odhadnuta teoretická životnost prototypového lisovacího nástroje. S ohledem na tloušťku funkční vrstvy, nutné technologické úpravy funkčního povrchu a omezující podmínky dané lisovacím tlakem pro lisování dinasových materiálů lze očekávat reálnou životnost prototypu lisovacího nástroje cca 130 000 cihel, což je oproti původnímu stavu více než 25 x vyšší životnost lisovacího nástroje. [K4] [K6] [K7]

Konkrétní řešení podkladního materiálu a konkrétní materiálové řešení funkční vrstvy je předmětem vlastního know-how, na jehož základě je uzavřena licenční smlouva mezi společností P-D Refractories CZ a.s. a ČVUT v Praze, Fakultou strojní.

7.1 Splnění cílů práce

Hlavním cílem disertační práce bylo na základě teoretického základu a experimentálního měření navržení metody pro experimentální ověřování životnosti lisovacích nástrojů odpovídající reálnému lisovacímu cyklu při lisování žárovzdorných výrobků pomocí hydraulického lisu. Lze konstatovat, že prostřednictvím splnění dílčích cílů práce bylo dosaženo řádového zvýšení životnosti lisovacích nástrojů určených pro lisování žárovzdorných materiálů s minimálním navýšením výrobních nákladů.

Tímto byl hlavní cíl práce splněn.

Závěry této práce a její výsledky naplňují všechny dílčí zadané cíle, které byly v počátcích výzkumu stanoveny. Výsledky práce lze shrnout do následujících bodů.

1. Charakteristika a popis mechanismu vzniku opotřebení při lisování žárovzdorných materiálů

V rámci návrhu vlastní experimentálního zařízení určeného pro zkoušky abrazivní odolnosti materiálů byla provedena analýza mechanismu vzniku opotřebení, kdy z pohledu opotřebení lisovacích nástrojů byly identifikovány hlavní příčiny vzniku opotřebení. Jedná se o zapichování tvrdých částice lisovaného materiálu na bázi Al_2O_3 nebo SiO_2 do funkčních ploch lisovacího nástroje, kde následně dochází k rýhování těchto ploch při vytlačování výlisku z lisovacího nástroje, dochází tedy k mikrořezání, kdy se částice chovají jako řezné nástroje, viz kapitola 5.1.

Tímto byl dílčí cíl práce splněn.

2. Vlastní návrh metody pro experimentální ověřování životnosti lisovacích nástrojů určených pro lisování žárovzdorných materiálů

Bylo vyvinuto experimentální zařízení, které je schopně věrohodně simulovat provozní podmínky, které odpovídají lisování na hydraulických lisech s provozním tlakem až 100 MPa, viz kapitola 5.3. Vlastní technické řešení experimentálního zařízení je předmětem patentu PV 2015-126 – „Experimentální stroj pro testování otěruvzdornosti, zejména při lisování žárovzdorných materiálů“, podaného dne 24.02.2015 a uděleného dne 06.04.2016. [K1]

Tímto byl dílčí cíl práce splněn.

3. Realizace experimentálního výběru materiálů a jejich reálná aplikace na lisovací nástroje určené pro lisování žárovzdorných materiálů

V rámci experimentálních zkoušek bylo vyrobeno celkem 117 experimentálních lisovacích nástrojů. Všechny tyto nástroje byly podrobeny prvnímu testu na celkem 5 000 lisovacích cyklů. Na nejlepších experimentálních nástrojích byly následně realizovány další testy, jejichž výdělkem jsou 3 konkrétní materiálová řešení, která dosáhla testované životnosti 110 000 cyklů. Na základě těchto výsledků vznikl prototyp s názvem „*Optimální materiálové složení lisovací formy a ochranného povlaku*“. [K2] Následně byly zpracovány, na základě technologičnosti konstrukce nového materiálového řešení, varianty nového konstrukčního řešení lisovacího nástroje, na jehož základě vznikl prototyp s názvem „*Optimální konstrukční uspořádání nového typu lisovací formy*“. [K3] Tyto dva prototypy spolu tvoří jeden celek a jeden bez druhého nejsou schopni vykonávat svoji funkci.

Tímto byl dílčí cíl práce splněn.

4. Dosažení řádově vyšší životnosti lisovacích nástrojů

Byla navržena provozní zkouška určená pro ověření dosaženého výsledku prototypu lisovacího nástroje. Během zkoušky byla provedena kontrola velikosti opotřebení funkčního povrchu prototypu lisovacího nástroje, kde lze konstatovat, že výsledky velikosti hodnoty opotřebení experimentálních lisovacích nástrojů odpovídající opotřebení reálných lisovacích nástrojů při běžném provozu. S ohledem na tloušťku funkční vrstvy, nutné technologické úpravy funkčního povrchu a omezující podmínky dané lisovacím tlakem pro lisování Dinasových materiálů lze očekávat reálnou životnost prototypu lisovacího nástroje cca 130 000 cihel, což je oproti původnímu stavu více než 25 x vyšší životnost lisovacího nástroje.

Tímto byl dílčí cíl práce splněn.

7.2 Přenositelnost řešení

Při uplatnění moderních technologií ve výrobních procesech jsou díky vysokým působícím napětím zvyšovány nároky na používané materiály výrobních strojů. Rozmanitost nových technologií i velikost působících napětí však rostou větším tempem, než počet materiálů schopných vyhovět požadavkům konstruktérů, kontrolorů kvality finálních produktů, případně majitelům, kterým záleží na dlouhé životnosti výrobních zařízení. Týká se to zejména konstrukčních materiálů, které jsou vesměs vyrobeny z materiálů na bázi železa. Přestože v oblasti metalurgie dochází stále k vyvíjení nových slitin i litin s lepšími mechanickými, chemickými a jinými vlastnostmi, stále existuje limit, kdy je nezbytné přistoupit ke zvýšení užitnosti prostřednictvím ochranných povlaků a vrstev, případně k některé ze speciálních technik úpravy povrchu.

Vlastní experimentální zařízení pro zkoušení abrazivní odolnosti materiálů určených pro funkční díly lisovacích nástrojů určených k lisování žárovzdorných materiálů se týká zejména problematiky určení otěruvzdornosti povrchu při lisování žárovzdorných materiálů. Toto zařízení není však na tento obor výlučně omezeno. Výroba lisovaných žárovzdorných materiálů patří mezi výrobní procesy, při kterých jsou lisovány keramické materiály s extrémní tvrdostí, jako je například korund, a otěruvzdornost ploch, které jsou lisování účastny, je kritická jak pro životnost lisovacího nástroje, tak pro kvalitu výsledného výrobku. Problematika zvyšování životnosti povrchů, na kterých dochází k abrazivnímu opotřebení, je více než aktuální téma nejen v oboru výroby žárovzdorných kamenů, ale také například v oboru těžby nerostných surovin, například povrchová těžba hnědého uhlí kolesovými rypadly, či zemědělství, například životnost pluhu při orbě, a potravinářství, například lisování olejů. Ve všech těchto oblastech dochází vlivem značné konkurence k tlaku na zvýšení životnosti strojů, k čemuž lze využít moderní metody úpravy povrchu ať již pomoci tepelně-chemických procesů, jako je nitridování, cementování, boridování, povlakování tenkými vrstvami nebo depozicí tvrdých nástřiků. Díky značné blízkosti reálnému výrobnímu procesu a také schopnosti věrně simulovat kontakt se silně abrazivním prostředím, nalezne navržené experimentální zařízení uplatnění při testování otěruvzdornosti povrchů v extrémních podmínkách. Přímocí a jednoduchost metody vyhodnocení otěruvzdornosti patří mezi nesporné přednosti této experimentální metody zkoušení abrazivní odolnosti materiálů.

7.3 Důsledky pro vědu a průmyslovou praxi

V celosvětovém měřítku existuje velké množství alternativních řešení a velké množství rozšíření základních metod, ovšem všechny tyto metody mají společného jmenovatele, a to, že výstupní data z testování abrazivní odolnosti materiálů většinou nemají zcela přesnou vypovídající hodnotu, jako data získaná monitoringem reálného provozního opotřebení strojní součástí a to zejména z důvodu, že konstrukční řešení experimentálních zařízení je koncipováno tak, aby bylo možné simulovat co největší spektrum způsobů abrazivního opotřebení z pohledu nasazení strojních součástí v provozu. Různorodost abrazivních procesů a zároveň nedostatečná znalost těchto procesů, v jejichž důsledku vzniká opotřebení lisovacích nástrojů, způsobují, že abrazivní opotřebení lze pouze velice obtížně pro konkrétní aplikaci dopředu stanovit, případně modelovat. Z pohledu přínosů pro vědu lze konstatovat, že nová metodika pro určování abrazivní odolnosti konstrukčních materiálů, realizovaná prostřednictvím nového experimentálního zařízení, umožňuje informace o abrazivní odolnosti materiálů s vysokou vypovídající hodnotou. Je tedy možné díky přímočarosti a jednoduchosti metody vyhodnocení otěruvzdornosti vzájemně porovnávat různé konstrukční materiály či úpravy povrchu, které vycházejí z vědecko-výzkumné činnosti.

Z pohledu důsledků a přínosů pro průmyslovou praxi je možné konstatovat, že prostřednictvím nové metodiky pro zvyšování životnosti lisovacích nástrojů, bylo dosaženo takového materiálového a konstrukčního řešení lisovacího nástroje, které zabezpečí řádové zvýšení životnosti s minimálním navýšením nákladů. Technické řešení je unikátní na světové úrovni. Technické řešení je mezioborově přenositelné například do oblasti stavebnictví, do oblasti těžby surovin, zemědělství nebo potravinářství.

7.4 Navazující výzkum

Navazující výzkum v oblasti zvyšování životnosti lisovacích nástrojů bude směřovat do oblast aplikace funkčního povrchu na komplexní lisovací nástroj určený pro lisování nových typů žárovzdorných materiálů, které jsou určeny pro tepelné agregáty s vyšší energetickou účinností. Další výzkum bude směřován do optimalizace výrobní technologie tvarově složitých dílců lisovacích nástrojů pro lisování žárovzdorných směsí na hydraulických lisech. Na žárovzdorné výrobky jsou v dnešní době kladeny vysoké nároky z hlediska kvality materiálu a také z hlediska náročnosti tvaru. Čím náročnější je tvar výsledné tvarovky, tím složitější je konstrukce forem a jednotlivých dílců. Vzhledem k vysokým abrazivním vlastnostem žárovzdorné směsi musí být tvarově komplikované dílce formy dostatečně trvanlivé, aby bylo možné lisovat velké série tvarovek. Z tohoto důvodu byla v rámci této disertační práce vyvinuta metodika pro zvyšování životnosti lisovacích nástrojů, jejíž výsledkem bylo použití nových funkčních povrchů pro řádové zvýšení životnosti lisovacích nástrojů. Díky aplikaci výsledků projektu bylo možné několikanásobně zvýšit počet odlisovaných tvarovek během životnosti lisovacího nástroje. Od doby aplikace výsledku jsou v rámci tržního prostředí žárovzdorných výrobků monitorovány zvyšující se požadavky na tvarovou složitost a materiálové složení velkosériových žárovzdorných výrobků. Zvyšování požadavků klade vysoké nároky na přesnost dílců lisovacích nástrojů, kvalitu jejich povrchu, ale také zejména na konstrukci nástrojů samotných. Vyvinutá technologie aplikace funkčního povrchu je v současné době na hranici tvarové složitosti, výrobní kapacity a kvality dílů, které je možno touto technologií vyrobit. Bez optimalizace konstrukce nástrojů a jejich dílců, technologie aplikace funkčního povrchu a strojního dokončení funkčního povrchu dílců lisovacích nástrojů, by dále nebylo možné držet krok s nároky zákazníků na žárovzdorné výrobky. Optimalizace je tedy nutná za účelem zvýšení kvality dílců formy, schopnosti vyrobit tvarově složité díly s dlouhou trvanlivostí, a to vše za současného snížení nákladů na výrobu žárovzdorných tvarovek pomocí optimalizace výrobní technologie a konstrukce lisovacích nástrojů.

8. Bibliografie

1. ČSN 01 5050 *Opotřebení materiálu: Názvosloví*, sv. 1. vydání. Československo. Úřad pro normalizaci a měření, 1968 (Zrušena).
 2. BEČKA, J. *Tribologie*, sv. 1. vydání. Praha. České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01621-8.
 3. SUCHÁNEK, J. KUKLÍK, V. a ZDRAVECKÁ, E. *Abrazivní opotřebení materiálů*. Praha. ČVUT v Praze, 2007. ISBN 978-80-01-03659-4.
 4. SUH, N. P. *Delamination Theory of Wear*. Wear. 1973, č. 25, s. 111-24.
 5. HUTCHINGS, I. M. *Tribology [Arnold]*. Londo - Sydney - Auckland. Friction and Wear of Engineering Materials.
 6. RABINOWICZ, E. *Friction and Wear of Materials*. New York. J.Wiley and Sons, 1965.
 7. OVČAČÍK, F. *Základní pojmy a rozdělení žárovzdorných materiálů*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2008. Dostupné také z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/635/dokumenty/pdf/materialy_pro_studenty/Opory_Ovcacik/I_zakladni_pojmy.pdf
 8. SVOBODA, L. *Stavební hmoty*. Praha. 2013. ISBN 978-80-260-4972-2. Dostupné také z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodasl/sh/SH3v1.pdf>
 9. ROUTSCHKA, G. a WUTHNOW, G. *Handbook of refractory materials design - properties - testing*. 4. vyd. Essen. Vulkan-Verl, 2012. ISBN 978-380-2731-624.
 10. JANOVEC, J. CEJP, J. a STEIDL, J. *Perspektivní materiály*. 3. přeprac. vyd. Praha. České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
 11. LACH, V. *Keramika*. 3. vyd. Brno. Nakladatelství VUT Brno, 1992. ISBN 80-214-0332-2.
 12. LANG, K. *Žárovzdorné materiály*. Praha. ČSVTS - Silikátová společnost České republiky, 2010. ISBN 978-80-02-02244-2.
 13. KUTZENDOERFER, J. *Žárovzdorné materiály: Díl 1. Rozdělení, vlastnosti, výpočty*. Praha. VŠCHT, 1992. ISBN 80-708-0148-4.
 14. ČSN EN ISO 10081-1. *Klasifikace žárovzdorných výrobků tvarových hutných - Část 1: Hlinitokřemičité* Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005. ISRC Třídící znak 72 6014.
-

15. OVČAČÍK, F. *Hlinitokřemičité materiály I*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2008. Dostupné také z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/635/dokumenty/pdf/materialy_pro_studenty/Opory_Ovcacik/III_hlinitokremicite.pdf
 16. OVČAČÍK, F. *Hlinitokřemičité materiály II*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2008. Dostupné také z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/635/dokumenty/pdf/materialy_pro_studenty/Opory_Ovcacik/IV_hlinitokremicite.pdf
 17. MOORE, M. A. *Laboratory simulation testing for service abrasive wear environment*. New York. The American Society of Mechanical Engineers, K.C. Ludema (Ed.), 1987, č. Vol. II, s. 673–87.
 18. HAWK, J. A. et al. *Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation*. Elsevier, 1999. ISSN: 0043-1648. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164899000423>
 19. BHAT, M. S. et al. *Wear resistant alloys for coal handling equipment* [Prog. Rep. for the Period]. Berkeley, CA. ZP8006. 1979, s. 63.
 20. STERN, K. H. *Metallurgical and Ceramic Protective Coatings, Chapman and Hall, first edition*. 1996.
 21. TUCKART, W. FORLERER, E. a IURMAN, L. *Delayed cracking in plasma nitriding of AISI 420 stainless steel*. Surface & Coatings Technology. 2007, roč. 202, s. 199–202.
 22. JACK, D. a JACK, K. *Invited review: Carbides and nitrides in steel*. Materials Science and Engineering. 1973, 11 (1), s. 1-27.
 23. LOH, N. a SIEW, L. *Residual stress profiles of plasma nitrided steels*. Surf. Eng. 1999, 15 (2), s. 137.
 24. ALVES, J. C. DE ANCHIETA RODRIGUES, J. a MARTINELLI, A. E. *Growth of nitrided layers on Fe–Cr alloys*. Materials Science and Engineering: A. 2000, roč. 279, s. 10–15.
 25. GERSTENBERGER, J. *Vytváření tvrdých a otěruvzdorných povrchů pomocí boridování*. MM Průmyslové spektrum. 2010, roč. 3, s. 28-29.
 26. LIU, Y. Q. et al. *Thermodynamic optimization of the boron–cobalt–iron system*. Alloys and Compounds. 2011, 509 (14), s. 4805–10.
 27. KARTAL, G. ERYILMAZ, O. L. a KRUMDICK, G. E. A. *Kinetics of electrochemical boriding of low carbon steel*. Applied Surface Science. 2010, roč. 257, s. 6928–34.
-

28. SMRČOK, L. LANGER, V. a KŘEŠŤAN, J. *Gamma-alumina: a single-crystal X-ray diffraction study*. Acta Crystallogr. 2006, C62 (9), s. i83 - i84.
29. PEJCHAL, V. MUŠÁLEK, R. a MATĚJÍČEK, J. *Comparison of WSP and HVOF Sprayed Alumina Coatings Behavior during Mechanical Loading*. Vrstvy a povlaky. 2010, s. 69-74. ISBN 978-80-970514-2-6.
30. WANG, Q. CHEN, Z. H. a DING, Z. X. *Performance of abrasive wear of WC-12Co coatings sprayed by HVOF*. Tribology International. 2009, 42 (7), s. 1046–51.
31. KIM, H.J. LEE, C.H. a HWANG, S.Y. *Superhard nano WC–12%Co coating by cold spray deposition*. Materials Science and Engineering: A. 2005, roč. 391, s. 243–48.
32. MCPHERSON, R. *A review of microstructure and properties of plasma sprayed ceramic coatings*. Surface and Coatings Technology. 1989, roč. 39-40, s. 173-81.
33. STEWART, D. A. a SHIPWAY, P. H. *Abrasive wear behaviour of conventional and nanocomposite HVOF-sprayed WC–Co coatings*. Wear. 1999, roč. 225–229, s. 789–98.
34. *Tenké vrstvy* [Prezentace]. Oddělení povrchového inženýrství. ZČU. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: http://ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf
35. FAUCHAIS, A. VARDELLE, A. a DUSSOUBS, B. Quo vadis thermal spraying? In: *Proceeding of the 2nd International Thermal Spray Conference*. Singapore: 2001, s. 1-32.
36. COSTIL, S. VERDY, C. a BOLOT, R. E. A. *On the Role of Spraying Process on Microstructural, Mechanical, and Thermal Response of Alumina* Therm. Spray Techn. 2007, roč. 16, s. 839-82.
37. KULKARNI, A. GUTLEBER, J. a SAMPATH, S. E. A. *Studies of the microstructure and properties of dense ceramic coatings*. Materials Science and Engineering: A. 2004, roč. 369, s. 124-37.
38. LIU, Y. FISHER, T. E. a DENT, A. *Comparison of HVOF and plasma-sprayed alumina/titania coatings—microstructure, mechanical* Surface and Coatings Technology. 2003, roč. 167, s. 68-76.
39. TURUNEN, E. HIRVONEN, A. a VARIS, T. E. A. *Application of HVOF techniques for spraying of ceramic coatings*. AZojomo. 2007, roč. 3, s. 6.
40. TANNER, B. *Thermal spraying*. Sulzer Metco Product & Services, 2008 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: http://www.sulzermetco.com/en/portaldata/13/Resources/documents/processes/ThermalSpraying_EN_4_web.pdf

41. PAWLOWSKI, L. *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. Second edition. John Wiley & Sons, Ltd. 2008, s. 626. ISBN 978-0471-49049-4.
 42. HERMAN, H. *Plasma sprayed coatings*. Scientific American. 1988.
 43. DAVIS, J. R. *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM International®, Materials Park, 2004, s. 338. ISBN 0-87170-795-0.
 44. CHRÁSKA, T. et al. *Crystallization kinetics of amorphous alumina–zirconia–silica ceramics*. Journal of the European Ceramic Society. 2009, 29 (15), s. 3159-65.
 45. DUBSKÝ, J. CHRÁSKA, P. a KOLMAN, B. E. A. *Phase Formation Control in Plasma Sprayed*. Ceramics – Silikáty. 2011, 55 (3), s. 294-300.
 46. ILAVSKÝ, J. LONG, G. G. a ALLEN, A. J. E. A. *Evolution of the void structure in plasma-sprayed YSZ deposits during heating*. Materials Science and Engineering: A. 1999, roč. 272, s. 215-21.
 47. CHRÁSKA, T. a KING, A. H. *Transmission electron microscopy study of rapid solidification of plasma sprayed zirconia — part I.* Thin Solid Films. 2001, roč. 397, s. 30-39.
 48. VAIDYA, A. STREIBL, T. a LI, L. E. A. *An integrated study of thermal spray process–structure–property correlations: A case study for* Materials Science and Engineering: A. 2005, roč. 403, s. 191-204.
 49. SAMPATH, S. SRINIVASAN, V. a VALAREZO, A. E. A. *Sensing, Control, and In Situ Measurement of Coating Properties: An Integrated Approach Toward* Therm. Spray Techn. 2009, roč. 18, s. 243-55.
 50. SAMPATH, S. JIANG, X. Y. a MATĚJÍČEK, J. E. A. *Role of thermal spray processing method on the microstructure, residual stress and properties of* Materials Science and Engineering: A. 2004, roč. 364, s. 216-31.
 51. PEJCHAL, V. *Comparison of adhesion and cohesion strength of thermal spray coatings evaluated by different* Master Thesis, KMAT FJFI ČVUT, 2012.
 52. CHRÁSKA, P. a HRABOVSKÝ, M. An overview of water stabilized plasma guns and their applications. In: *Proceedings of International Thermal Spray Conference 1992*. Orlando, Florida, USA: ASM International, 1992, s. 81-85.
 53. ESPIE, G. DENOIRJEAN, A. a FAUCHAIS, P. E. A. *Surface and Coatings Technology*. 2005, roč. 195, s. 17-28.
-

54. HRABOVSKY, M. KONRÁD, M. a KOPECKÝ, V. E. A. IEEE Trans. on Plasma Sci. 1997, roč. 25, s. 833-39.
55. KURODA, S. KAWAKITA, J. a WANATABE, M. E. A. *Warm spraying – a novel coating process based on high-velocity impact of solid particles.*
56. P-D REFRACTORIES CZ A.S. *Podnikové zdroje.* [cit. 2019].
57. KYNCL, J. *Návrh standardizace konstrukčních prvků lisovacích nástrojů.* Diplomová práce (Ing.). ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2012.
58. KYNCL, J. *Technologické možnosti nástrojárny společnosti P-D Refractories.* Bakalářská práce (Bc.). ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2010.
59. EYER, T. S. *Wear Resistance of Metals. Treatise on Materials Science and Technology.* New York. Academic Press, Inc. 1979.
60. VITRY, V. KANTA, A.F. a DELAUNOIS, F. *Mechanical and wear characterization of electroless nickel-boron.* Surface & Coatings Technology. 2011, roč. 206, s. 1879–85.
61. MATTHEWS S. J. *Erosion-Corrosion of Cr3C2-NiCr High Velocity Thermal Spray Coatings.* Ph.D. thesis, University of Auckland, 2004.
62. BENSCH, J. *Lomové chování funkčně gradovaných materiálů.* Praha. Disertační práce, KMAT FJFI ČVUT, 2008.
63. VILÉMOVÁ, M. *Mechanical properties of hard coatings.* Praha. Ph.D. thesis, KMAT FJFI ČVUT, 2012.

9. Publikace autora

9.1 Publikace přímo související s disertační prací

- K1. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; KOLAŘÍK, K.; PALA, Z.; KYNCL, J.; KUTĚJ, D. *Experimentální stroj pro testování otěruvzdornosti, zejména při lisování žárovzdorných materiálů*. Czech Republic. Patent CZ 305959. 2016-04-06.
- K2. KYNCL, J.; MIFKOVÁ, M.; KYNCL, J.; BERÁNEK, L.; KOLAŘÍK, K.; PALA, Z. *Optimální materiálové složení lisovací formy a ochranného povlaku*. [Prototype] 2014.
- K3. KYNCL, J.; MIFKOVÁ, M.; KUTĚJ, D.; BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; KOLAŘÍK, K.; PALA, Z. *Optimální konstrukční uspořádání nového typu lisovací formy*. [Prototype] 2014.
- K4. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; KELLNER, T. *Zvyšování životnosti lisovacích nástrojů [Technical Report] 2018*.
- K5. PALA, Z.; FOJTÍKOVÁ, J.; KOUBSKÝ, T.; MUSALEK, R.; STRASKY, J.; ČAPEK, J.; KYNCL, J.; BERÁNEK, L. ET AL. *Study of residual stresses, microstructure, and hardness in FeB and Fe2B*. Powder Diffraction. 2015, 30(S1), S83-S89. ISSN 0885-7156.
- K6. BERÁNEK, L.; KYNCL, J. *Jak zvyšovat životnost lisovacích nástrojů*. Technický týdeník. 2015,(23), 29-30. ISSN 0040-1064.
- K7. KYNCL, J. *Zvyšování životnosti lisovacích nástrojů*. TecniCall. 2015,(2), 18-19. ISSN 1805-1030.
- K8. KYNCL, J. *PVD Deposition on HVOF Layer*. In: Technological forum 2015, 6th International Technical Conference, Book of Proceedings. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2015, pp. 82-84. ISBN 978-80-87583-13-5.
- K9. PALA, Z.; MUŠÁLEK, R.; KYNCL, J.; HARCUBA, P.; STRÁSKÝ, J.; KOLAŘÍK, K.; GANEV, N.; MATĚJÍČEK, J. *Effect of Boriding Time on Microstructure and Residual Stresses in Borided Highly Alloyed X210CR12 Steel*. In: Key Engineering Materials. Zurich: Trans Tech Publications, 2014, pp. 27-30. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-03835-062-0.
- K10. PALA, Z.; MUŠÁLEK, R.; KYNCL, J.; ČAPEK, J.; STRÁSKÝ, J.; FOJTÍKOVÁ, J. *Study of microstructure, hardness and residual stresses in FeB and Fe2B ultrahard layers*. In: Book of abstracts of 14th European Powder Diffraction Conference, Aarhus, 15-18 June. 2014. pp. 100.
- K11. PALA, Z.; KOLAŘÍK, K.; MUŠÁLEK, R.; KYNCL, J.; BERÁNEK, L. *Functionally graded multilayer for withstanding indentations and inhibition of hard particle embedding into the surface*. In: Book of abstracts of 14th European Powder Diffraction Conference, Aarhus, 15-18 June. 2014. pp. 156.
- K12. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; MIKEŠ, P. *Analysis of HVOF Coating on Molds Used for Refractory Fireclay Shapes*. Manufacturing Technology. 2014, 14(3), 268-271. ISSN 1213-2489.

- K13. PALA, Z.; MUŠÁLEK, R.; KYNCL, J.; HARCUBA, P.; STRÁSKÝ, J.; KOLAŘÍK, K.; GANEV, N.; MATĚJÍČEK, J. *EFFECT OF BORIDING TIME ON MICROSTRUCTURE AND RESIDUAL STRESSES IN BORIDED HIGHLY ALLOYED X210CR12 STEEL*. In: Local Mechanical Properties 2013 - 10th International Conference - Book of Abstracts. Praha: CTU Publishing House, 2013, pp. 82. ISBN 978-80-01-05374-4.
- K14. PALA, Z.; MUŠÁLEK, R.; KYNCL, J.; HARCUBA, P.; STRÁSKÝ, J.; KOLAŘÍK, K. *STRUCTURE MICROSTRUCTURE AND RESIDUAL STRESSES IN BORIDED STEELS*. In: Materials Structure. 2013, pp. 93-95. ISSN 1211-5894

9.2 Ostatní publikace a tvůrčí činnost autora

- K15. BERÁNEK, L.; ŠTAJNOCHR, L.; KYNCL, J.; SOMMER, J.; KELLNER, T.; KYNCL, M. *Design and development of an In-line inspection in the production of ceramic chimney pipes*. In: TECHNOLOGICAL FORUM 2019. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2019. p. 202-208. ISBN 978-80-87583-30-2.
- K16. KYNCL, J.; KELLNER, T.; KYNCL, M.; SLANÝ, M.; BERÁNEK, L. *Design Optimization of Moulds for Vibrocasted Refractory*. In: TECHNOLOGICAL FORUM 2019. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2019. p. 77-81. ISBN 978-80-87583-30-2.
- K17. KELLNER, T.; KYNCL, M.; KYNCL, J.; KOPTIŠ, M.; URBAN, J.; BERÁNEK, L.; KOTOUČEK, M. *Manipulation with Raw Ceramic Chimney Pipes*. Manufacturing Technology. 2019, 19.(3.), 419-425. ISSN 1213-2489.
- K18. KYNCL, J.; KYNCL, M.; KELLNER, T. *CONCEPT OF MANIPULATION WITH REFRACTORY PRODUCTS*. In: INVENTION FOR ENTERPRISE. Bielsko-Biała: Akademia Techniczno-Humnistyczna, 2019. p. 80-83. ISBN 978-83-66249-18-9.
- K19. KELLNER, T.; KYNCL, J.; BERÁNEK, L.; KYNCL, M. *Technologie uchopování a manipulace s odděleným polotovarem komínové tvarovky*. [Functional Sample] 2018.
- K20. ŠTAJNOCHR, L.; BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; KELLNER, T.; ŠIMOTA, J.; KYNCL, M. *Technologie dělení kontinuálního pásma materiálu*. [Functional Sample] 2018.
- K21. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; KELLNER, T.; KYNCL, M.; SLANÝ, M.; KYNCL, J.; VOSTROVSKÝ, M.; KOVAŘÍKOVÁ, M. *Forma pro vibrolité žárovzdorné materiály*. Czech Republic. Utility Model CZ 32284. 2018-11-06.
- K22. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; KELLNER, T.; KYNCL, M.; PELIKÁN, L.; SLANÝ, M.; SOLAŘÍK, M. *Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2018*. [Research Report] 2018.
- K23. KELLNER, T.; KYNCL, J.; PITRMUC, Z.; BERÁNEK, L.; KAŇÁK, M.; KYNCL, M. *Production process planning in Additive manufacturing and Conventional machining technology manufacturing system*. Manufacturing Technology. 2019, ISSN 1213-2489.
- K24. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; KELLNER, T.; KYNCL, M. *Návrh dispozičního řešení prototypové haly v Doosan Bobcat Engineering s.r.o.* [Research Report] 2018.

- K25. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; KYNCL, M. *Analytické a optimalizační činnosti v procesu výroby ve společnosti SOPO s.r.o.* [Research Report] 2018.
- K26. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; KELLNER, T.; KYNCL, M. *Racionalizace výroby v Schäfer - Menk s.r.o.* [Research Report] 2018.
- K27. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; KELLNER, T.; KYNCL, M.; ŠTAJNOCHR, L.; ŠIMOTA, J.; URBAN, J.; PELIKÁN, L. ET AL. *Odborná zpráva o řešení projektu FV10151 za rok 2018* [Research Report] 2018.
- K28. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; KELLNER, T.; KYNCL, M.; NOVÁK, P.; HERMAN, A.; ŠTOURAČ, F.; SLANÝ, M. ET AL. *Odborná zpráva o řešení projektu FV10057 za rok 2018.* [Research Report] 2018.
- K29. ČAPEK, J.; KOLAŘÍK, K.; NESLUŠAN, M.; PITRMUC, Z.; BERÁNEK, L.; TROJAN, K.; NĚMEČEK, J.; GANEV, N. ET AL. *Surface Integrity after Turning a Duplex Stainless Steel with Respect to Tool Geometry.* Transactions of Famera. 2018, 42(4), 1-14. ISSN 1333-1124.
- K30. HERMAN, A.; ŠTOURAČ, F.; BERÁNEK, L.; KYNCL, J. *NEW DESIGN OF POLYURETHANE FOAM MOULDS FOR VIBRATIONAL CASTED REFRACTORY MATERIALS.* In: 29 TH DAAAM INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT MANUFACTURING AND AUTOMATION Proceedings. Vídeň: DAAAM International Vienna, 2018. p. 1231-1238. 29. ISSN 1726-9679. ISBN 978-3-902734-20-4.
- K31. KYNCL, M.; KELLNER, T.; KYNCL, J.; BERÁNEK, L.; GREGOR, M. *Design of the Assembly workplace considering the Ergonomics.* In: Konference studentské tvůrčí činnosti. ČVUT v Praze, fakulta strojní, 2018. ISBN 978-80-01-06421-4.
- K32. KELLNER, T.; KYNCL, M.; BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; NĚMEC, N. *Optimization of Warehouse management and Material flows.* In: Konference studentské tvůrčí činnosti. ČVUT v Praze, fakulta strojní, 2018. ISBN 978-80-01-06421-4.
- K33. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; PITRMUC, Z.; VYSKOČIL, Z. *Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2017.* [Research Report] Velká Bíteš: PBS Velká Bíteš, 2017.
- K34. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; HERMAN, A.; NOVÁK, P.; KELLNER, T.; KYNCL, M.; KYNCL, J.; VOSTROVSKÝ, M. ET AL. *Forma pro odlévání žárovzdorných vibrolitých materiálů.* Czech Republic. Utility Model CZ 31719. 2018-04-24.
- K35. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; KELLNER, T.; KYNCL, M.; NOVÁK, P.; HERMAN, A.; ŠTOURAČ, F.; SLANÝ, M. ET AL. *Odborná zpráva o řešení projektu FV10057 za rok 2017.* [Research Report] Velké Opatovice: P-D Refractories CZ a.s., 2017.
- K36. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; KELLNER, T.; KYNCL, M.; ŠTAJNOCHR, L.; ŠIMOTA, J.; URBAN, J.; PELIKÁN, L. ET AL. *Odborná zpráva o řešení projektu FV10151 za rok 2017.* [Research Report] Velké Opatovice: P-D Refractories CZ a.s., 2017.
- K37. HERMAN, A.; ŠTOURAČ, F.; KELLNER, T.; KYNCL, J.; BERÁNEK, L. *Návrh a zkoušky materiálů pro výrobu forem pro vibrolité žáruvzdorné materiály.* [Research Report] Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2017.

- K38. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; PITRMUC, Z.; ŠIMOTA, J.; VYSKOČIL, Z. *Přípravek pro upínání lopatek pro letecký a energetický průmysl na rovinné brusky*. Czech Republic. Utility Model CZ 30673. 2017-05-15.
- K39. KYNCL, J.; KELLNER, T.; KYNCL, M.; PELIKÁN, L. *Weldox 960 Dry Machining*. In: Technological forum 2017 Book of proceedings. Jaroměř: Kudláček Jan, Ing., 2017. p. 60-65. ISBN 978-80-87583-22-7.
- K40. PITRMUC, Z.; ŠIMOTA, J.; BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; VYSKOČIL, Z. *Silové broušení tvarových ploch superslitin*. [Verified Technology] 2016.
- K41. BERÁNEK, L.; KYNCL, J. *Vývoj a optimalizace výrobních procesů navíjení statorů a rotorů* [Research Report] SOPO s.r.o., 2016.
- K42. KYNCL, J.; BRAJER, J.; MAŠEK, P.; ŠIMOTA, J.; URBAN, J.; KELLNER, T.; PITRMUC, Z. *Odborná zpráva o průběhu projektu za rok 2016*. [Research Report] 2016.
- K43. KYNCL, J.; BERÁNEK, L.; KYNCL, M. *Kurz "Základy normování práce"*. [Research Report] Sdružení MTM pro ČR a SR, 2016.
- K44. KYNCL, J.; BERÁNEK, L.; KYNCL, M. *Analytické a optimalizační činnosti v procesu výroby ve společnosti SOPO s.r.o.* [Research Report] SOPO s.r.o., 2016.
- K45. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; KYNCL, M.; KELLNER, T. *Racionalizace výroby v Schäfer - Menk s.r.o.* [Research Report] Schäfer – Menk s.r.o., 2016.
- K46. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; KELLNER, T.; KYNCL, M.; HERMAN, A.; NOVÁK, P.; KYNCL, J. *Odborná zpráva o řešení projektu FV10057 za rok 2016*. [Research Report] Velké Opatovice: P-D Refractories CZ a.s., 2016.
- K47. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; KELLNER, T.; KYNCL, M.; ŠIMOTA, J.; KYNCL, J. *Odborná zpráva o řešení projektu FV10151 za rok 2016*. [Research Report] Velké Opatovice: P-D Refractories CZ a.s., 2016.
- K48. KYNCL, J.; KELLNER, T.; KUBIŠ, R. *Tricanter production process optimization by digital factory simulation tools*. Manufacturing Technology. 2017, 17(1), 49-53. ISSN 1213-2489.
- K49. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; VYSKOČIL, Z. *Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2016*. [Research Report] Velká Bíteš: První brněnská strojírna Velká Bíteš, a. s., 2017.
- K50. ČAPEK, J.; KOLAŘÍK, K.; PITRMUC, Z.; GANEV, N.; BERÁNEK, L.; TROJAN, K.; KYNCL, J.; ŠIMOTA, J. *Influence of Cutting Conditions on Surface Integrity after Progressive Grinding of Blade Roots from Inconel 713LC*. In: Experimental Stresss Analysis 2016. Plzeň: Západočeská universita, Fakulta aplikovaných věd, 2016. ISBN 978-80-261-0624-1.
- K51. BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; KYNCL, M. *Návrh technicko-organizační inovace výrobního procesu pečovatelských lůžek*. [Research Report] 2015.
- K52. KYNCL, J.; BERÁNEK, L. *Analytické a optimalizační činnosti v procesu výroby ve společnosti SOPO s.r.o.* [Research Report] Praha: CTU FME. Department of Machining, Process Planning and Metrology, 2015.
-

- K53. KYNCL, J. *Digital Factory Simulation Tools*. Manufacturing Technology. 2016, 16(2), 371-375. ISSN 1213-2489.
- K54. ČAPEK, J.; KYNCL, J.; KOLAŘÍK, K.; BERÁNEK, L.; PITRMUC, Z.; MEDŘICKÝ, J.; PALA, Z. *Grinding of Inconel 713 Superalloy for Gas Turbines*. Manufacturing Technology. 2016, 16(1), 38-45. ISSN 1213-2489.
- K55. VYSKOČIL, Z.; BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; PALA, Z.; KOLAŘÍK, K.; ČAPEK, J. *Silové broušení rovinných ploch superslitin*. [Verified Technology] 2015.
- K56. VYSKOČIL, Z.; BERÁNEK, L.; KYNCL, J. *Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2015*. [Research Report] Praha: CTU FME. Department of Machining, Process Planning and Metrology, 2015.
- K57. VYSKOČIL, Z.; BERÁNEK, L.; KYNCL, J. *Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2014*. [Research Report] Velká Bíteš: První brněnská strojírna, 2014.
- K58. KYNCL, J. *Implementation of Digital Factory Simulation Tools*. Manufacturing Technology. 2016, 16(2), 371-375. ISSN 1213-2489.
- K59. VYSKOČIL, Z.; BERÁNEK, L.; KOLAŘÍK, K.; PALA, Z.; TOMÍČEK, J.; KYNCL, J.; MOLOTOVNIK, A.; ČAPEK, J. *Obrábění superslitiny inconel 738lc technologií pětiosého frézování*. [Verified Technology] 2014.
- K60. KYNCL, J.; MOLOTOVNIK, A. *The Research of the Surface Profile after Profiling of Superalloys*. In: Procedia Engineering. Oxford: Elsevier Ltd, 2015. p. 853-860. ISSN 1877-7058.
- K61. KYNCL, J.; BERÁNEK, L.; KOLAŘÍK, K.; PALA, Z. *The Research of the Surface Profile after Profiling of Inconel 738LC*. In: Procedia Engineering. Amsterdam: Elsevier B.V., 2014. pp. 974-979. ISSN 1877-7058.
- K62. PALA, Z.; KOLAŘÍK, K.; BERÁNEK, L.; ČAPEK, J.; KYNCL, J.; MUŠÁLEK, R.; GANEV, N. *Real Structure of Milled Inconel 738LC Turbine Blades*. In: Advanced Materials Research - Residual stresses IX. Zurich: TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2014, pp. 646-651. Residual Stresses IX. ISSN 1662-8985. ISBN 9783038351535. Available from: <http://www.scientific.net/AMR.996.646>
- K63. KYNCL, J. *Volba řezných podmínek pro obrábění superslitin s ohledem na integritu povrchu*. In: STČ 2014. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2014, ISBN 978-80-01-05484-0. Available from: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf14/4540.pdf>
- K64. KYNCL, J.; BERÁNEK, L.; KOLAŘÍK, K.; PALA, Z. *The Research of the Surface Profile after Profiling of Inconel 738LC*. Procedia Engineering. 2013, 2014(69), 974-979. ISSN 1877-7058.
- K65. VYSKOČIL, Z.; BERÁNEK, L.; ČAPEK, J.; KOLAŘÍK, K.; KYNCL, J.; MOLOTOVNIK, A.; PALA, Z.; TOMÍČEK, J. *Dokončovací frézování lopatek turbíny ze slitiny Inconel 718*. [Verified Technology] 2013.
-

- K66. VYSKOČIL, Z.; BERÁNEK, L.; ČAPEK, J.; KOLAŘÍK, K.; KYNCL, J.; MOLOTOVNIK, A.; PALA, Z.; TOMÍČEK, J. *Čtyřosé frézování tvarových ploch ze superslitiny Inconel 738LC*. [Verified Technology] 2013.
- K67. KOLAŘÍK, K.; PALA, Z.; ČAPEK, J.; BERÁNEK, L.; VYSKOČIL, Z.; KYNCL, J.; TOMÍČEK, J. *XRD ANALYSES OF SURFACE INTEGRITY PARAMETERS AFTER 3 AXIS MILLING OF INCONEL 738LC*. In: Degradacia konštrukčných materiálův. Žilina: Žilinská universita, Strojnícka fakulta, 2013, pp. 52-57. ISBN 978-80-554-0741-8.

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Druhy opotřebení [1]	13
Obr. 2.2: Mechanismus vzniku adhezivního opotřebení [1]	13
Obr. 2.3: Mechanismus vzniku abrazivního opotřebení [1]	14
Obr. 2.4: Mechanismus vzniku erozivního opotřebení [1]	14
Obr. 2.5: Mechanismus vzniku kavitačního opotřebení [1]	15
Obr. 2.6: Mechanismus vzniku únavového opotřebení [1]	15
Obr. 2.7: Mechanismus vzniku vibračního opotřebení [1]	15
Obr. 2.8: Vzájemné působení tvrdých abrazivních vázaných částic a funkčního povrchu [3]	17
Obr. 2.9: Postupné zatěžování a fragmentace abrazivních částic mezi funkčními povrchy [3]..	17
Obr. 2.10: Zjednodušený model interakce abrazivní částice s funkčním povrchem součásti [6]	18
Obr. 2.11: Hlavní rozdělení žárovzdorných materiálů [12] [14]	22
Obr. 2.12: Detailnější rozdělení žárovzdorných materiálů [12] [14]	22
Obr. 2.13: Rozdělení hliníkokřemičitých žárovzdorných materiálů	23
Obr. 2.14: Schéma výroby lisovaných žárovzdorných výrobků	24
Obr. 2.15: Složky žárovzdorného materiálu	24
Obr. 2.16: Základní požadavky na konstrukční materiály pro výrobu lisovacích nástrojů	26
Obr. 2.17: Základní dělení konstrukce lisovacího nástroje	27
Obr. 2.18: Dělení nástrojových materiálů z hlediska odolnosti proti opotřebení [3]	27
Obr. 2.19: Životnosti lisovacích nástrojů při použití dinasové lisovací směsi	29
Obr. 3.1: Základní metody experimentálních zkoušek abrazivní odolnosti materiálů	32
Obr. 3.2: Schéma zkouška přístrojem s pryžovým kotoučem [18]	32
Obr. 3.3: Schéma zkoušky brusným válcem [18]	34
Obr. 3.4: Schéma zkoušky bubnovým přístrojem [18]	35
Obr. 3.5: Schéma zkoušky přístrojem s mezivrstvou abrazivních částic [18]	36
Obr. 3.6: Základní rozdělení metod úprav povrchu pro zvýšení životnosti strojních součástí ...	40
Obr. 3.7: Porovnání mikrostruktury základního materiálu a nitridované vrstvy slitiny Fe–5% Cr [24]	41
Obr. 3.8: Fázový diagram system Fe-B [26]	42
Obr. 3.9: Typická zubovitá mikrostruktura vrstvy s boridy železa [27]	42
Obr. 3.10: Vývoj tloušťky boridové vrstvy s časem při různých teplotách boridování nízkouhlíkové oceli [27]	43
Obr. 3.11: Profil tvrdosti po boridování [27] nízkouhlíkové oceli po dobu 1 h při různých teplotách (a), hloubkový profil fázového složení po 1 h boridování při teplotě 950 °C (b)	44
Obr. 3.12: Srovnání HVOF a WSP nástřiků na bázi Al ₂ O ₃ ; vlevo srovnání otěrvzdornosti při tzv. „slurry abrazion“ testu, vpravo srovnání tvrdosti [29]	45
Obr. 3.13: Mikrostruktura WC-12Co nástřiku po opotřebení [30], vlevo povrch a vpravo příčný řez nástřikem	46
Obr. 3.14: Mikrostruktura HVOF nástřiku prášku se standardním (a) a nanokrystalickým (b) WC [33]	46
Obr. 3.15: Základní metody nanášení tenkých vrstev [34]	48

Obr. 3.16: Princip žárového stříkání [40]	49
Obr. 3.17: Schematicky znázorněná mikrostruktura plazmového nástřiku [42]; originál této kresby je uložen v Tate Gallery v Londýně	50
Obr. 3.18: Přehled procesů a technik žárového stříkání [51]	51
Obr. 3.19: Řez vodou stabilizovaným plazmatronem [54]	52
Obr. 3.20: Řež HVOF hořákem [55]	54
Obr. 3.21: Mikrostruktury WSP a HVOF nástřiků; snímky z elektronového rastrovacího mikroskopu [29]	54
Obr. 3.22: Vzorek AH a povrch vzorku AH pod mikroskopem (zvětšení 120x) [56]	56
Obr. 3.23: Povrch vzorku EC a povrch vzorku EC pod mikroskopem (zvětšení 120x) [56]	56
Obr. 3.24: Povrch vzorku PMV a Povrch vzorku PMH pod mikroskopem (zvětšení 40x) [56]	57
Obr. 3.25: Výsledky analýzy drsnosti povrchu	58
Obr. 5.1: Postup činností	61
Obr. 5.2: Příklad ocelového lisovacího nástroje a výlisku [57]	62
Obr. 5.3: Schématický řez lisovacím nástrojem [57]	63
Obr. 5.4: Materiály používané pro konstrukci lisovacích nástrojů	64
Obr. 5.5: Příčiny opotřebení lisovacích nástrojů	66
Obr. 5.6: Fáze lisování žárovzdorných materiálů	67
Obr. 5.7: Schématické znázornění fáze plnění lisovacího nástroje lisovaným materiálem	68
Obr. 5.8: Schématické znázornění fáze lisování žárovzdorných materiálů	69
Obr. 5.9: Detail porovnání poškození nového razníku (vlevo) a použitého razníku (vpravo)	70
Obr. 5.10: Schématické znázornění fáze uvolnění lisovacího tlaku v lisovacím nástroji	71
Obr. 5.11: Schématické znázornění fáze vyrážení tvarovky z lisovacího nástroje	72
Obr. 5.12: Základní vstupní parametry pro návrh metodiky testování	73
Obr. 5.13: Tvar a rozměry experimentálního výlisku	74
Obr. 5.14: Závislost spotřeby materiálu na velikosti výlisku a počtu cyklů	75
Obr. 5.15: Schéma funkce experimentálního zařízení	77
Obr. 5.16: Umístění záložek v experimentálním zařízení	79
Obr. 5.17: Funkční díly experimentálního lisovacího nástroje	80
Obr. 5.18: Model lisovací komory zkušebního zařízení v řezu	81
Obr. 5.19: Model experimentálního zařízení	82
Obr. 5.20: Schématický popis konstrukce experimentálního zařízení	83
Obr. 5.21: Experimentální lisovací nástroj	84
Obr. 5.22: Prototyp experimentálního zařízení	85
Obr. 5.23: Uživatelské prostředí řídicího systému experimentálního zařízení	86
Obr. 5.24: Pokles lisovacího tlaku v závislosti na opotřebení vyložení experimentálního lisovacího nástroje během prvního testu	87
Obr. 5.25: Opotřeбенý spodní razník (vlevo) a horní razník (vpravo)	88
Obr. 5.26: Nový (vlevo) a opotřeбенý (vpravo) dílec experimentálního lisovacího nástroje po prvním testu	88
Obr. 5.27: Průběh lisovacího tlaku při druhém testu	89
Obr. 5.28: Průběh lisovacího tlaku při třetím testu	89

Obr. 5.29: Průběh lisovacího tlaku při čtvrtém testu.....	90
Obr. 5.30: Nový (vlevo) a opotřebený (vpravo) dílec experimentálního lisovacího nástroje po čtvrtém testu.....	90
Obr. 5.31: Grafické znázornění síťového rozboru experimentálního lisovacího materiálu před experimentem.....	92
Obr. 5.32: Grafické znázornění síťového rozboru experimentálního lisovacího materiálu po 1 cyklu experimentu.....	92
Obr. 5.33: Test vybrané lisovací směsi 10% M1-2 , 50% MO-2 , 20% PR32 , 20% MT8.....	93
Obr. 5.34: „Experimentální stroj pro testování otěruvzdornosti, zejména při lisování žárovzdorných materiálů“. [K1]	95
Obr. 5.35: Značení dílců záložek experimentálního lisovacího nástroje.....	96
Obr. 5.36: Měřený vzorek a znázorněný směr pohybu horního razníku v lisovacím nástroji.....	97
Obr. 5.37: Záložka s vyznačenými měřenými řezy	98
Obr. 5.38: Protokoly z měření velikosti opotřebení referenční záložky 0 A.	99
Obr. 5.39: Průběh opotřebení referenční záložky A 0	100
Obr. 5.40: Rozdělení kategorií dodavatelů	102
Obr. 5.41: Přehled kategorií dodavatelů experimentálních lisovacích nástrojů.....	103
Obr. 5.42: Přehled kategorií materiálů a povrchových vrstev experimentálních lisovacích nástrojů	103
Obr. 5.43: Vyhodnocení velikosti opotřebení experimentálních lisovacích nástrojů v řezu 25 po 5000 cyklech.....	105
Obr. 5.44: Průběh opotřebení nejlépe vyhodnocených experimentálních lisovacích nástrojů po 5 000 cyklech.....	106
Obr. 5.45: Průběh opotřebení nejlépe vyhodnocených záložek po 5 000 cyklech společně s referenční záložkou 000.....	106
Obr. 5.46: Schéma plánu testování experimentálních lisovacích nástrojů.....	107
Obr. 5.47: Vyhodnocení velikosti opotřebení experimentálních lisovacích nástrojů v řezu 25 po 10 000 cyklech.....	108
Obr. 5.48: Vyhodnocení velikosti opotřebení experimentálních lisovacích nástrojů v řezu 25 po 20 000 cyklech.....	109
Obr. 5.49: Vyhodnocení velikosti opotřebení experimentálních lisovacích nástrojů v řezu 25 po 50 000 cyklech.....	110
Obr. 5.50: Vyhodnocení velikosti opotřebení experimentálních lisovacích nástrojů v řezu 25 po 80 000 cyklech.....	111
Obr. 5.51: Vyhodnocení velikosti opotřebení experimentálních lisovacích nástrojů v řezu 25 po 110 000 cyklech.....	112
Obr. 5.52: Přehled experimentů	113
Obr. 5.53: Tvarově náročný lisovací nástroj vpravo a tvarově náročný výlisek určený pro ohřívače větrů vlevo	114
Obr. 6.1: Tvarově náročný výlisek označený jako DGS1 3/55K určený pro použití v „ohřívačích větrů“	116
Obr. 6.2: Základní požadavky na novou konstrukci lisovacího nástroje	117
Obr. 6.3: Varianty konstrukčního řešení vnitřního vyložení prototypu (detail konstrukčního řešení je z důvodu licencování rozmazán)	118

Obr. 6.4: Finální konstrukční řešení prototypu jednohřízdrového lisovacího nástroje	119
Obr. 6.5: Výrobní dokumentace prototypu lisovacího nástroje	120
Obr. 6.6: Místa pro kontrolu rozměru lisovacího nástroje pro pozici DGSI 3/55K	122

Seznam tabulek

Tab. 2.1: Teploty tání oxidů [13]	21
Tab. 2.2: Orientační teploty výpalu pro jednotlivé druhy hlinitokřemičitých výrobků [15] [16]:25	
Tab. 3.1: Parametry používané u zkoušky přístrojem s pryžovým kotoučem [18]	33
Tab. 3.2: Materiálové složení nástřiků jednotlivých hnízd pro úvodní experiment [56]	56
Tab. 3.3: Vyhodnocení výsledků	58
Tab. 5.1: Oceli používané pro konstrukci funkčních dílů [3]	65
Tab. 5.2: Výsledky síťového rozboru směsi před a po 1 lisovacím cyklu.....	91
Tab. 5.3: Příklad naměřených a zpracovaných hodnot velikosti opotřebení záložek 0	99
Tab. 5.4: Vyhodnocení experimentálních vzorků.....	101
Tab. 5.5: Přehled informací o experimentálních zkouškách abrazivní odolnosti materiálů	113
Tab. 5.6: Porovnání potencionálních materiálů vhodných pro konstrukci lisovacích nástrojů	115
Tab. 6.1: Chemické složení materiálu Dinas DUCW	121
Tab. 6.2: Naměřené hodnoty velikosti vnitřního rozměru standardního lisovacího nástroje ..	122
Tab. 6.3: Naměřené hodnoty velikosti vnitřního rozměru prototypového lisovacího nástroje po lisování 5 000 tvarovek	123
Tab. 6.4: Naměřené hodnoty velikosti vnitřního rozměru prototypového lisovacího nástroje po lisování 10 000 tvarovek.....	124
Tab. 6.5: Naměřené hodnoty velikosti vnitřního rozměru prototypového lisovacího nástroje po lisování 20 000 tvarovek	124

Seznam použitého software

1. Microsoft Word 2016
2. Microsoft Excel 2016
3. Microsoft Powepoint 2016
4. Autodesk Inventor Professional 2018
5. MarWin


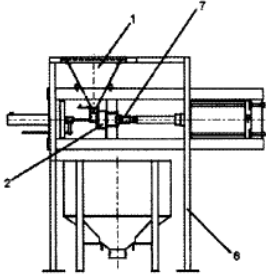
Seznam příloh

Textové a grafické přílohy

- A. Patentový spis 305959

Textové a grafické přílohy

Příloha A – Patentový spis 305959

PATENTOVÝ SPIS		(11) Číslo dokumentu: 305 959
(19) ČESKÁ REPUBLIKA  ÚŘAD PRŮMYSLOVÉHO VLASTNICTVÍ	(21) Číslo přihlášky: 2015-126 (22) Přihlášeno: 24.02.2015 (40) Zveřejněno: 18.05.2016 (Věstník č. 20/2016) (47) Uděleno: 06.04.2016 (24) Oznámení o udělení ve věstníku: 18.05.2016 (Věstník č. 20/2016)	(13) Druh dokumentu: B6 (51) Int. Cl.: G01N 19/08 (2006.01) B30B 11/00 (2006.01)
	(56) Relevantní dokumenty: US 2004/0195715 A1; CN 1861380 A.	
(73) Majitel patentu: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, Praha 6, CZ		
(72) Původce: Ing. Libor Beránek, Ph.D., Počedělice, CZ Ing. Jiří Kyncl, Svitavy, CZ Ing. Kamil Kolařík, Ph.D., České Budějovice, CZ Ing. Zdeněk Pala, Ph.D., Zlín, CZ Ing. Jiří Kyncl, Svitavy, CZ David Kutěj, Velké Opatovice, CZ		
(74) Zástupce: Ing. Václav Kratochvíl, Husníkova 2086/22, 158 00 Praha 13		
(54) Název vynálezu: Experimentální stroj pro testování otěruvzdornosti, zejména při lisování žárovzdorných materiálů		
CZ 305959 B6	(57) Anotace: Experimentální stroj pro testování vzorků, zejména žárovzdorných kamenů, je tvořen rámem (6), ke kterému je z jedné boční strany připojen horní razník (2) opatřený hydraulickým válcem, z protilehlé strany spodní razník (7) opatřený pneumatickým válcem a v horní části je násypka (1), přičemž forma mezi horním razníkem (2) a spodním razníkem (7) je vyrobena s úkosem $0,1 \pm 0,02$ mm při výšce vyložení 65 až 75 mm.	

CZ 305959 B6

Experimentální stroj pro testování ořezuvzdornosti, zejména při lisování žárovzdorných materiálů5 Oblast techniky

Vynález se týká zejména problematiky určení ořezuvzdornosti povrchu při lisování žárovzdorných materiálů, není však na tento obor výlučně omezen. Výroba žárovzdorných kamenů patří mezi výrobní procesy, při kterých jsou lisovány keramické materiály s extrémní tvrdostí, např. korund, a ořezuvzdornost ploch, které jsou lisování účastny je kritická jak pro životnost lisu, tak pro kvalitu výsledného výrobku.

15 Dosavadní stav techniky

Ořezuvzdornost (wear resistance) charakterizuje odolnost materiálu při jeho styku se zvoleným okolím z hlediska jeho úbytku. Z tohoto vymezení je zřejmé, že ořezuvzdornost je konkrétní veličina daná nejen materiálem, který má ořezu vzdorovat, ale také prostředím, ve kterém vzdoruje, a typem interakce materiálu s tímto prostředím.

20 Nejspolehlivější přístup k určení ořezuvzdornosti daného materiálu by zřejmě spočíval ve vystavení konkrétního objektu ze zkoušeného materiálu podmínkám, ve kterých je jeho ořezuvzdornost relevantní pro jeho životnost. Toto je ovšem z praktického hlediska nesmírně drahé a zdlouhavé, neboť by k tomu muselo dojít v rámci podmínek výrobního procesu a za provozu. Z těchto důvodů se používá pro stanovení ořezuvzdornosti takřka výlučně laboratorních měření. K dispozici jsou tři standardní metodiky testování, které ovšem nemají zavedený český název. Označují se jako (i) „standard Slurry Abrasion Response“ (SAR), (ii) „standard Dry Sand Rubber Wheel“ (DSRW) abrazivní testy a tzv. (iii) „scratch test“ (ST).

30 SAR je standardizovaný test. V rámci tohoto testu je nejdříve stanoveno tzv. Millerovo číslo, které určuje relativní abrazivitu standardního vzorku vyrobeného ze slitiny železa a 27 % chromu v abrazivním prostředí kalu či kaše obsahující nejčastěji směs vody s křemičitým nebo korundovým pískem. V dalším kroku dochází k umístění vzorku standardních rozměrů, obvykle $7,5 \times 12 \times 25 \text{ mm}^3$ do drážky, na jejíž dně je stejná směs jako v prvním kroku. Tento vzorek je pevně uchycen na pohyblivém rameni a zatěžován. Standardní zatížení vzorku je dle normy 22,24 N. Měří se váhový úbytek a dráha, kterou vzorek vykonal za dobu trvání testu, která je obvykle řádově několik hodin. K měření dochází také v průběhu, nejčastěji po 1 až 2 h. Váhový úbytek se poté přepočítá na objemový v mm^3 , udávané hodnoty mají přesnost 5 %. Zcela jednoznačnou nevýhodou této metodiky je skutečnost, že abrazivní materiál je stále stejný, nedochází k jeho výměně a jeho abrazivní schopnost s časem značně klesá. Pro případ lisování silně abrazivních materiálů jsou jeho výsledky nerepresentativní a značně vzdálené skutečnosti.

45 DSRW je také standardizován. Princip tohoto testu spočívá v přitlačování vzorku k ocelovému kolu s gumovým vyloženíem po obvodu. Kolo se v průběhu testování otáčí a do otvoru mezi gumou a vzorkem je sypán stále čerstvý abrazivní prášek, nejčastěji křemičitý či korundový. Doba trvání testu je obvykle několikrát kratší než u SAR testu, znovu se měří váhový úbytek a dráha vzorku, kterou ujel po obvodu kola. Váhový úbytek se znovu přepočítá na objemový, hustota vzorku, případně nástřiku se měří na principu Archimedova zákona. Nevýhodou tohoto abrazivního testu je materiál podložky – gumové kolo, které v případě lisování žárovzdorných materiálů je také značně vzdáleno reálné podstatě interakce ve výrobním procesu.

55 Metodika ST spočívá v indentaci obvykle indentoru Rocwellova typu do povrchu normálovou silou F_n při současném pohybu měřeného povrchu, čímž je vyvolána tečná síla F_t . Výsledkem je tedy jedna rýha na povrchu, která je dále analyzována metodami optické mikroskopie a kvantifikována pomocí analýzy obrazu. Cenově se jedná o velmi nákladnou techniku, ovšem jí dediko-

CZ 305959 B6

vané přístroje představují již sofistikovaná zařízení a výsledky mají značnou vypovídající hodnotu. Pro určování otěruvzdornosti povrchů při lisování žárovzdorných materiálů je tento přístup nevýhodný z hlediska použití indentoru z jednoho materiálu, obvykle diamantu, který se nelisuje a také provedení pouze jednoho „vrypu“ do povrchu. Nicméně v reálném výrobním procesu je účastno několik tisíc indentorů a vzniká několik tisíc „vrypů“.

Podstata vynálezu

- 10 Výše uvedené nedostatky všech tří laboratorních metod, jsou do značné míry odstraněny experimentálním strojem pro testování povrchů, zejména při lisování žárovzdorných materiálů, podle tohoto technického řešení. Jeho podstatou je rám, ke kterému je z jedné boční strany připojen horní razník opatřený hydraulickým válcem, z protilehlé strany spodní razník opatřený pneumatickým válcem a v horní části je násypka, přičemž forma mezi horním razníkem a spodním razníkem je vyrobena s úkosem $0,1 \pm 0,02$ mm při výšce vyložení 65 až 75 mm.

- Účelem projektu je získat, z konstrukčního i materiálového hlediska, nové formy na lisování žárovzdorných kamenů. Projekt má v průběhu svého řešení několik dílčích cílů. Prvním je výběr vhodných materiálů, různých metod nanášení povlaků, návarů atd. Budou studovány faktory, tj. technologické podmínky depozice, které mají vliv na výsledné parametry, tzv. responsní veličiny, např. fázové složení vrstvy, její tvrdost, adheze k základnímu materiálu formy, drsnost povrchu, otěruvzdornost a nelepivost lisovaného materiálu. Ze série vzorků a jejich ochranných povlaků bude zpracováno vyhodnocení, dle kterého bude vybrán nejvhodnější materiál pro výrobu nové formy v reálném provozu. Vzorky budou analyzovány z hlediska ingery povrchu, tj. jejich struktury povrchu, fázového složení, mikrotvrdosti, otěruvzdornosti, soudržnosti nanášené vrstvy se základním materiálem atd. U vybraných perspektivních materiálů bude provedena i analýza zbytkové napjatosti a metalografie s ohledem na jejich vhodnost pro použití při lisování žárovzdorných materiálů.

- 30 Konstrukční řešení testovacího stroje bylo navrženo dle požadavků na lisování tak, aby se co nejvíce podobalo lisování na skutečných lisech, např. SGP ve Svitavách. Běžně lisování probíhá např. na hydraulických lisech SGP se jmenovitým příkonem 630 W a lisovacím tlakem 45 MPa ve vertikální poloze. Spodní razník prochází formou s tolerancí v nejmenším rozměru - 0,05 mm. Spodní razník vymezuje výšku výlisku tak, aby při stlačení horním razníkem odpovídala požadavkům. Při slisování výlisku vyjede horní razník z hnízda a spodní razník vytlačí výlisek ven z formy. Vyložení formy je vyrobeno s úkosem tak, aby nedocházelo při vytlačení k poškození stěn výlisku.

- 40 Dle těchto požadavků byl navržen i testovací stroj. Testovací stroj má možnost lisovat až se jmenovitým tlakem 100 MPa, při seřizování je nutno správně stanovit násyp hmoty do hnízda a tím vymezit správný lisovací tlak. Celá forma je vyrobena s úkosem 0,1 mm při výšce vyložení 70 mm, kdy menší otvor je na výstupu. Tím bylo konstrukčně hnízdo nastaveno tak, aby opotřebení při testování bylo mnohem vyšší než při běžném lisování. Proto je nutno správně nastavit koeficient přepočtu životnosti daného vyložení. Toto konstrukční řešení bylo navrženo vzhledem k urychlení testování. Forma se zakládá tak, že je třeba správně založit vyložení proti ose razníků. Celé vyložení se do formy ukládá s vůlí, která je posléze dotažena šrouby tak, aby uložení vyložení splňovalo požadavky při lisování. Opět bylo toto konstrukční řešení navrženo vzhledem k použitým jakostem a speciálním povlakům, na které nesmí být vyvinuta žádná mechanická síla - běžně je vyložení do formy natloukáno pomocí kladiva.

Objasnění výkresů

- 55 Experimentální stroj pro testování vzorků, zejména žárovzdorných kamenů, podle tohoto technického řešení bude podrobněji popsán na konkrétním příkladu provedení s pomocí přiložených

CZ 305959 B6

výkresů, kde na obr. 1 je znázorněn příkladný stroj v nárysu, na obr. 2 v bokorysu a na obr. 3 je znázorněno schéma zapojení stroje.

5 Příklady uskutečnění vynálezu

Příkladný experimentální stroj pro testování vzorků žárovzdorných kamenů je tvořen rámem 6, ke kterému je z jedné boční strany připojen horní razník 2 opatřený hydraulickým válcem, z protilehlé strany spodní razník 7 opatřený pneumatickým válcem 10 a v horní části je násypka 1, 10 přičemž forma mezi horním razníkem 2 a spodním razníkem 7 je vyrobena s úkosem 0,1 mm při výšce vyložení 70 mm.

Samotné lisování probíhá tak, že horní razník 2 s hydraulickým pohonem natlačí směs do hnízda proti spodnímu razníku 7, kde je zpětný chod s pneumatickým válcem. Tedy ve chvíli stlačení 15 lisovací směsi dojde k přetlačení pneumatického válce hydraulickým pohonem a tak se vytlačí suchá lisovací směs mimo hnízdo. Směs je tak tlačena největší možnou dráhou vyložení z většího rozměru do menšího, lisovacím tlakem cca 50 MPa. Při běžném lisování se používá lisovací směs s 6 % vlhkostí pro držení tvaru. Suchá lisovací směs je mnohem abrazivnější a má také vliv na stanovení koeficientu pro přepočítání životnosti vyložení hnízda.

20 Během testování bylo třeba vyřešit vzniklé závady. Bylo třeba nastavit správný lisovací tlak, který je přímo úměrný odporu pneumatického válce a objemu jednotlivé dávky lisovací směsi na výlisek. Množství není přesně dávkováno, ale závisí na sypkosti lisovací směsi a je přímo úměrné množství vniklé směsi během časové prodlevy horního razníku 2 a hloubkou zajetí horního razníku 2 do hnízda. Byl stanoven nejnižší možný tlak pneumatického válce pro spodní zajetí do 25 hnízda, který je cca 41 kPa. Dále bylo dle dílčích cyklů stanoveno vymezení zajetí horního razníku 2 do ústí násypky 1, kdy konec horního razníku 2 je cca 20 mm od ústí vstupu vyložení formy. Tím byl dosažen hydraulický lisovací tlak pohybující se v rozmezí mezi 30 až 50 MPa. Během testování dochází k opotřebením vyložení formy, kdy je možno opotřebením pozorovat při poklesu 30 lisovacího tlaku, který je zaznamenán v grafu.

Dále je třeba dodržet zásadu, že ke každému testovanému vyložení musí být použita sada nových razníků. Tedy musel být konstrukčně upraven horní razník 2 i spodní razník 7 tak, aby bylo možno 35 vyměnit vždy jen část, která lisuje z důvodu finančních úspor a náročnosti na výrobu nových razníků a také dodržet takové řešení, které nebude náročné na výměnu. K tomuto závěru bylo nutno přistoupit vzhledem k masivním opotřebením styčných ploch z důvodu abrazivního působení lisovací směsi.

Přes všechna úskalí se povedlo odladit testovací stroj a začít testovat konkrétní vzorky. Vzhledem 40 k vysoce abrazivní lisovací směsi, je ještě třeba testovací stroj vybavit odsávací jednotkou, která zamezí nadměrné prašnosti. Prašnost okolo testovacího stroje má velmi negativní vliv na pohony testovacího stroje. Vzhledem k velkému množství vzorků byl stanoven postup takový, aby bylo možno v co nejmenším časovém horizontu otestovat cca okolo 70-ti vyložení. Každé vyložení bude změřeno před uložením do rámu testovacího stroje, dále bude změřen rozměr otvoru po 45 založení před lisováním, následně bude v časovém horizontu cca 3 h odlisováno celkem 3000 zalisování, poté bude opět přeměřen otvor vyložení v rámu. Podle velikosti opotřebením bude stanoven další počet výlisků a postup se bude opakovat. Všechna měření se budou zaznamenávat do protokolu, ze kterých bude stanoven výběr materiálů odpovídajících 25x násobné životnosti oproti životnosti při běžném lisování.

50 Opotřebením se musí pohybovat max. okolo 0,2 mm na obvodu, jinak nesplní požadavek běžného opotřebením. Opotřebením větší než 0,4 mm na obvodu rozměru, tedy záložka menší o 0,2 mm nevyhovuje tvaru výlisku.

55

CZ 305959 B6

Průmyslová využitelnost

5 Problematika snížení životnosti povrchů, na kterých dochází k abrazi, je více než aktuální téma nejen v oboru výroby žárovzdorných kamenů, ale také v oboru dobývání nerostných surovin, např. povrchová těžba hnědého uhlí kolesovými rypadly, či zemědělství, např. životnost pluhu při orbě, a potravinářství, např. lisování olejů. Ve všech těchto oblastech dochází vlivem značné konkurence k tlaku na zvýšení životnosti strojů, k čemuž lze využít moderní metody úpravy povrchu ať již pomocí tepelně-chemických procesů, jako je nitrídování, cementování, boridování, atd., povlakování tenkými vrstvami nebo depozicí tvrdých nástřiků. Díky značné blízkosti reálnému výrobnímu procesu a také schopnosti věrně simulovat kontakt se silně abrazivním prostředím, nalezne navržený experimentální stroj uplatnění při testování oteruvzdornosti povrchů. Přímocha-rost a jednoduchost vyhodnocení oteruvzdornosti patří mezi nesporné přednosti navrhovaného řešení.

15

PATENTOVÉ NÁROKY

20

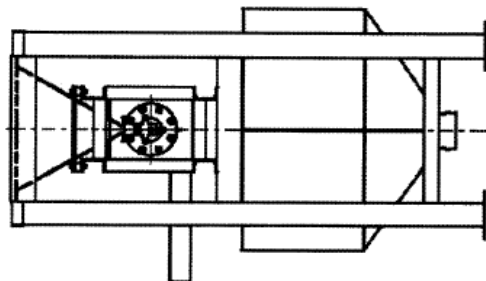
1. Experimentální stroj pro testování vzorků, zejména žárovzdorných kamenů, **v y z n a ě u - j í c í s e t í m**, že je tvořen rámem (6), ke kterému je z jedné boční strany připojen horní razník (2) opatřený hydraulickým válcem, z protilehlé strany spodní razník (7) opatřený pneumatickým válcem (10) a v horní části je násypka (1), přičemž forma mezi horním razníkem (2) a spodním razníkem (7) je vyrobena s úkosem $0,1 \pm 0,02$ mm při výšce vyložení 65 až 75 mm.

25

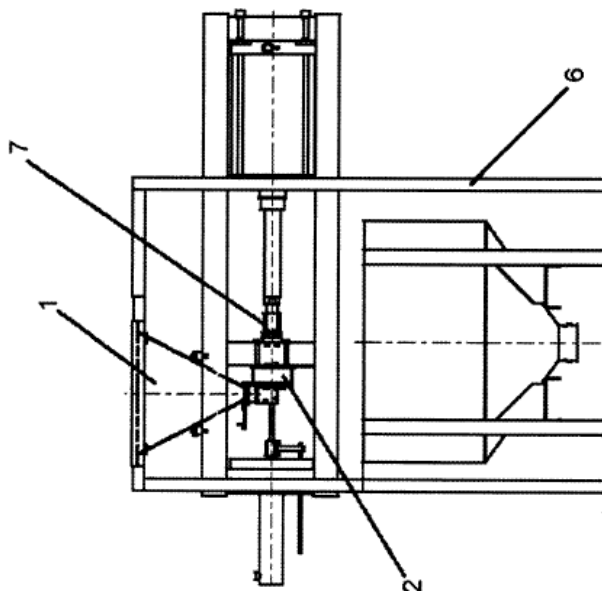
30

2 výkresy

CZ 305959 B6

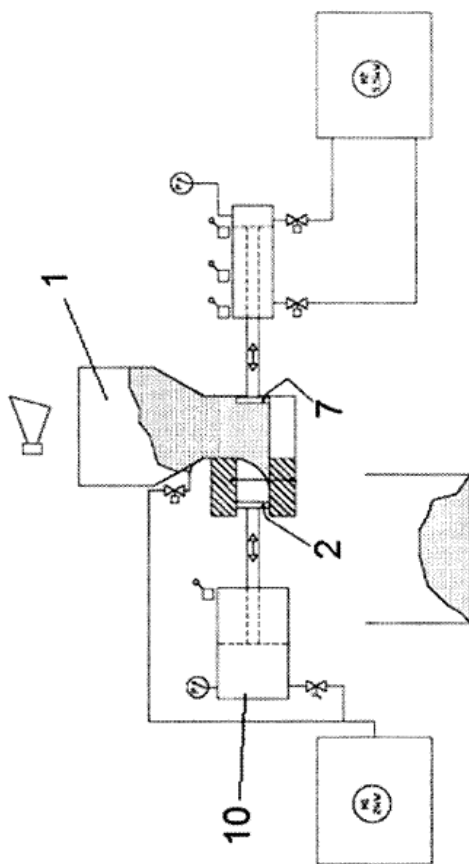


Obr. 2



Obr. 1

CZ 305959 B6



Obr. 3

Konec dokumentu