

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Zvyšování životnosti nástrojů určených k lisování žáruvzdorných materiálů

Ing. Jiří Kyncl

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Strojírenská technologie

Školitel: *prof. Ing. Antonín Zelenka, CSc.*

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Název anglicky: Increase of refractory pressing tools durability

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Jiří Kyncl
Ústav technologie obrábění, projektování
a metrologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 160 00 Praha 6

Školitel: prof. Ing. Antonín Zelenka, CSc.
Ústav technologie obrábění, projektování
a metrologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 160 00 Praha 6

Školitel-specialista: Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Ústav technologie obrábění, projektování
a metrologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 160 00 Praha 6

Oponenti: doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
doc. Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod,
v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze,
Technická 4, Praha 6.

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru strojírenská
technologie.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní
ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.
předseda oborové rady oboru strojírenská technologie
Fakulta strojní ČVUT v Praze

Obsah

1	Současný stav zkoumané problematiky.....	5
1.1	Materiály lisovacích nástrojů pro lisování žáruvzdorných materiálů	6
1.2	Metody experimentálních zkoušek abrazivní odolnosti materiálů	7
1.3	Opotřebení nástrojů určených k lisování žáruvzdorných materiálů	8
1.4	Stanovení cílů disertační práce	10
2	Návrh metody experimentálního ověřování odpovídající reálnému lisovacímu cyklu	11
2.1	Charakteristika mechanismu vzniku opotřebení	11
2.2	Kritéria pro návrh nové metodiky testování.....	12
2.3	Návrh a konstrukce zkušebního zařízení.....	13
2.4	Návrh metody hodnocení velikosti opotřebení	15
2.5	Ověření experimentálního zařízení	16
2.6	Výsledky experimentálních zkoušek.....	16
2.7	Shrnutí výsledků experimentu	22
3	Aplikace výsledků experimentu na reálný lisovací nástroj	25
3.1	Provozní zkoušky prototypu lisovacího nástroje.....	26
3.2	Shrnutí provozních zkoušek prototypu.....	28
4	Závěry a diskuze výsledků.....	30
4.1	Splnění cílů práce	31
4.2	Důsledky pro průmyslovou praxi a navazující výzkum.....	33
	Publikace autora související s tématem disertace	35
	Seznam použité literatury v tezích	37
	Anotace	39
	Summary	40
	Bez ohlasů a recenzí.....	40

1 Současný stav zkoumané problematiky

Problematika životnosti a opotřebení je obecně v průmyslovém prostředí velice diskutovaným tématem. 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.[1] [2]

Vzhledem k rostoucím nárokům na predikci opotřebení a zvyšování doby životnosti strojních součástí je nutné efektivně stanovovat jejich servisní intervaly a zvyšovat jejich dobu životnosti. V současné době existuje mnoho zkoušek simulujících proces opotřebení a snažících se o predikci doby životnosti, avšak díky snaze o vytvoření unifikované zkoušky, která by simulovala všechny vlivy opotřebení, není možné použít stávající laboratorní zkoušky pro simulaci opotřebení a predikci doby životnosti nástrojů v konkrétní aplikaci, jako je například lisování žáruvzdorných materiálů prostřednictvím hydraulických lisů.

Díky absenci experimentální metodiky, která by umožňovala jednoduše a efektivně simulovat proces abrazivního opotřebení a tím umožnit jednodušší testování nově vyvinutých materiálů a funkčních povlaků lisovacích nástrojů určených k lisování žáruvzdorných materiálů přicházejí průmysloví výrobci výše zmíněných součástí o nemalé finanční prostředky. Zároveň není možné zefektivnit proces testování a implementace nově vyvinutých funkčních povrchů, pro výše zmíněnou aplikaci na reálné lisovací nástroje.

Výše popsané faktory jsou hlavní motivací pro zpracování disertační práce na téma: „Zvyšování životnosti nástrojů určených k lisování žáruvzdorných materiálů“. Po realizaci experimentů a zavedení nové experimentální metodiky do reálných podmínek autor predikuje řádové zvýšení životnosti lisovacích

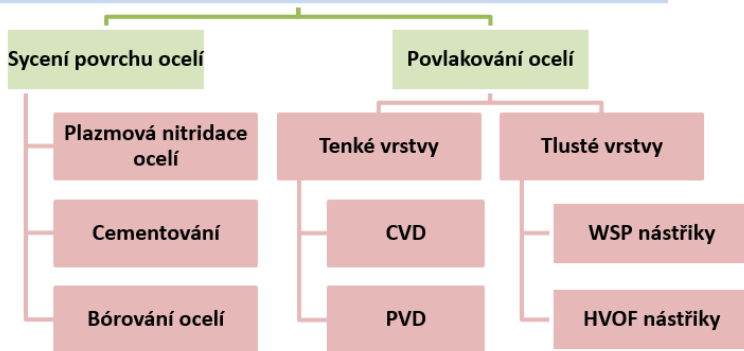
nástrojů a zefektivnění procesů testování nových konstrukčních materiálů a funkčních povlaků, při řádovém snížení nákladů spojených s vývojem a výzkumem pro výše zmíněnou aplikaci.

1.1 Materiály lisovacích nástrojů pro lisování žáruvzdorných materiálů

Ke konstrukci lisovacích nástrojů jsou nejčastěji využívány legované a tepelně zpracované nástrojové oceli (ledeburitické, subledeburitické), které vykazují vysokou odolnost vůči opotřebení, díky výskytu komplexních karbidů ve struktuře. V současnosti je kombinace tepelného zpracování a legování mezi výrobci nejpoužívanějším řešením. Kombinace výběru vhodné oceli a tepelného zpracování s definovanými parametry je téměř výhradně chráněna interním know-how dodavatelů. Další možností je aplikace otěruvzdorných povlaků na funkční povrchy lisovacích nástrojů. [3][4][5]

V souvislosti se zvyšováním abrazivní odolnosti strojních součástí lze na funkční části lisovacích nástrojů aplikovat velké množství povlaků, nanášených různými metodami. Téma disertační práce stanovuje jako hlavní činitele poškozování lisovacích nástrojů abrazivní opotřebení a otěr. 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 jsou: fyzikální, mechanické, chemické a strukturní vlastnosti vrstvy, odolnost vrstvy vůči působícím vlivům, kompatibilita vrstvy se základním materiálem, finanční náklady, logistika a dostupnost dodavatelů vrstev. [4][5][6][7][8] Schematické shrnutí jednotlivých typů povlaků a jejich rozdělení lze vidět na Obr. 1.

Metody úprav povrchu pro zvýšení životnosti strojních součástí



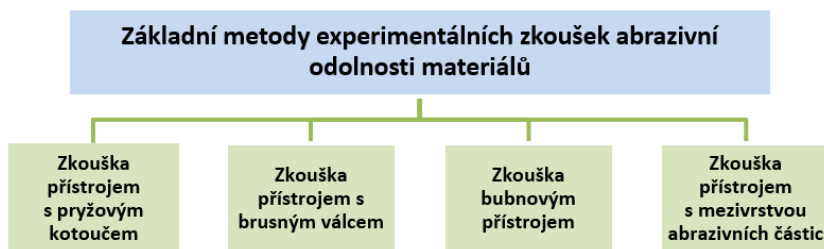
Obr. 1: Základní rozdělení metod úprav povrchu pro zvýšení životnosti strojních součástí [7]

Vzhledem k nedostatečnému výzkumu v oblasti povlakování nástrojů pro lisování žáruvzdorných materiálů a technologie nanášení povlaků na konstrukčně složité materiály je v rámci této práce nutné přistoupit k výzkumu výše zmíněné problematiky.

1.2 Metody experimentálních zkoušek abrazivní odolnosti materiálů

Opotřebení je v současné době vážným problémem v mnoha průmyslových odvětvích. Dle ověřených údajů je stanoveno, že základním a zároveň nejvíce poškozujícím typem opotřebení je opotřebení abrazivní. Z důvodu snížení nákladů na testování a snahy o predikci doby životnosti nástrojů, příp. strojních součástí byly vyvinuty laboratorní testy opotřebení [9]. Většina těchto testů jsou specifické pro danou společnost (interní know-how) a sestávají se z dat nashromážděných na základě mnoholetého pozorování. **Hawk** [10] uvádí čtyři základní sady laboratorních zkoušek pro testování abrazivního opotřebení společně s mechanismy opotřebení, které jsou pro charakteristické pro jednotlivé zkoušky. Jednotlivé zkoušky jsou charakterizovány dle úrovně napětí a konstrukčního uspořádání zařízení. Na základě shromážděných údajů

o opotřebení různých ocelí a kompozitů na bázi železa jsou vytvořeny jednoduché korelace mezi zkouškami a tvrdostí materiálů. [10]. Problémem Hawkem navržených zkoušek je snaha o jejich univerzálnost a proveditelnost v laboratorním prostředí. Pro simulaci a testování odolnosti lisovacích nástrojů vůči abrazivnímu opotřebení při lisování žáruvzdorných materiálů nelze výše zmíněné zkoušky použít. Typy zkoušek laboratorních zkoušek opotřebení lze vidět na Obr. 2



Obr. 2: Základní metody experimentálních zkoušek abrazivní odolnosti materiálů [10]

Vzhledem k nemožnosti aplikace v současnosti používaných zkoušek odolnosti materiálů vůči abrazivnímu opotřebení je nutné při zpracování práce zmapovat problematiku abrazivního opotřebení lisovacích nástrojů při lisování žáruvzdorných materiálů a navrhnout vlastní experimentální metodiku pro ověření životnosti lisovacích nástrojů.

1.3 Opotřebení nástrojů určených k lisování žáruvzdorných materiálů

Lisování žáruvzdorných materiálů je spojeno s vysokým tlakem, který je nutný pro zhutnění lisovaných materiálů na požadovanou kvalitu výrobku (až 100 MPa). [12]

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 bude v práci dále uvažován extrémní případ, viz Obr. 3. [11] [12]



Obr. 3: Životnosti lisovacích nástrojů při použití dinasové lisovací směsi

Různorodost abrazivních procesů a zároveň nedostatečná znalost procesů, v jejichž důsledku opotřebení lisovacích nástrojů vzniká, způsobují, že lze vliv abrazivního opotřebení obtížně predikovat, případně modelovat pro konkrétní aplikaci. Z tohoto důvodu, ale i z důvodu řádového zvýšení životnosti lisovacích nástrojů pro žárovzdorné materiály je kladen vysoký důraz na provedení zkoušek odolnosti materiálů proti opotřebení, které budou poskytovat objektivní informace o odolnosti konstrukčních materiálů vůči abrazivním žárovzdorným materiálům.

Vzhledem k výše popsaným důvodům (různorodost a neznalost procesů abrazivního opotřebení) je nutné v disertační práci přistoupit k jejich podrobnějšímu studiu v praktické aplikaci (lisování žárovzdorných materiálů na hydraulickém lisu).

1.4 Stanovení cílů disertační práce

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

K dosažení výše zmíněného cíle je samotné řešení disertační práce rozděleno do následujících dílčích cílů:

1. Charakteristika a popis mechanismu vzniku opotřebení při lisování žárovzdorných materiálů.
2. Vlastní návrh metody pro experimentální ověřování 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.

2 Návrh metody experimentálního ověřování odpovídající reálnému lisovacímu cyklu

Nová metodika pro návrh hodnocení odolnosti a životnosti lisovacích nástrojů vůči opotřebení je stanovena dle následujícího postupu činností, viz. Obr. 4.



Obr. 4: Postup činností při návrhu nové metodiky

Na základě analýzy mechanismů vzniku opotřebení jsou stanoveny omezující podmínky, které určují možnosti návrhu zkušebního zařízení a hodnotící metody. V závěru této části práce je provedeno porovnání velikosti opotřebení reálných lisovacích nástrojů a referenčních vzorků.

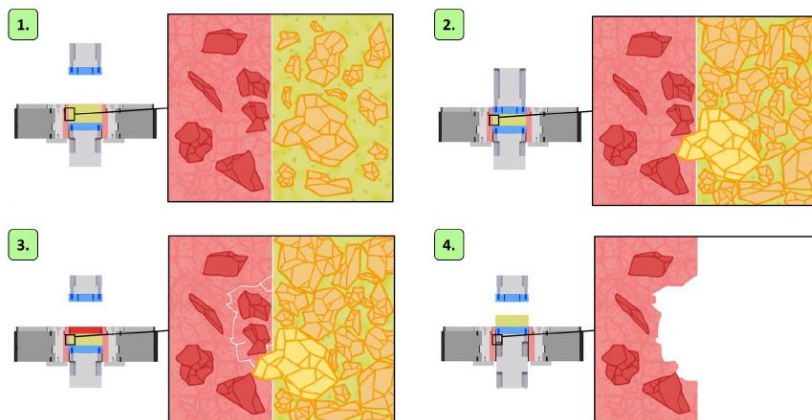
2.1 Charakteristika mechanismu vzniku opotřebení

V rešeršní části jsou popsány jednotlivé mechanismy vzniku opotřebení na lisovacích nástrojích. V rámci analýzy jsou stanoveny tři hlavní činitelé vzniku opotřebení (abraze, adheze, koroze), z nichž nejvýznamnějším je abrazivní činitel. Při lisování vykazují tvrdé abrazivní částice na bázi Al_2O_3 , nebo SiO_2 chování rezných nástrojů a obrábějí funkční plochy nástroje.

Jednotlivé dílčí operace lisovacího cyklu lze vidět na Obr. 5. Kritickými body jsou operace 2 a operace 4. V důsledku vysokého lisovacího tlaku při operaci 2 dochází k zatlačování tvrdých částic (SiO_2 , Al_2O_3) do funkční plochy nástroje. Následně dochází při vysouvání výlisku z formy k porušení integrity materiálu formy a vylomení jeho části. Výše popsaný proces abraze je hlavní

příčinnou opotřebení lisovacích nástrojů. Charakteristickým znakem abrazivního opotřebení nástroje je tzv. rýhování funkčních ploch.

Opotřebení lze pozorovat po cca 1000 lisovacích cyklech při současné životnosti lisovacích nástrojů 5000 cyklů. Schematické znázornění vzniku abrazivního opotřebení při lisovacím cyklu je znázorněno na Obr. 5.



Obr. 5: Mechanismus abrazivního opotřebení při lisování a konstrukce lisovacího nástroje

Z provedené analýzy lisovacího cyklu a konstrukce lisovacího nástroje u konkrétního výrobce je patrné, že nejvíce namáhanými díly jsou záložky, a to konkrétně v druhé a čtvrté fázi lisovacího cyklu. Po 5000 cyklech je stanovena velikost opotřebení funkčního povrchu záložky na 0,25 mm.

2.2 Kritéria pro návrh nové metodiky testování

Základní omezující podmínky pro návrh nové metodiky zkoušení ořezuvzdornosti konstrukčních materiálů lze chápat jako kritéria, viz Obr. 6.

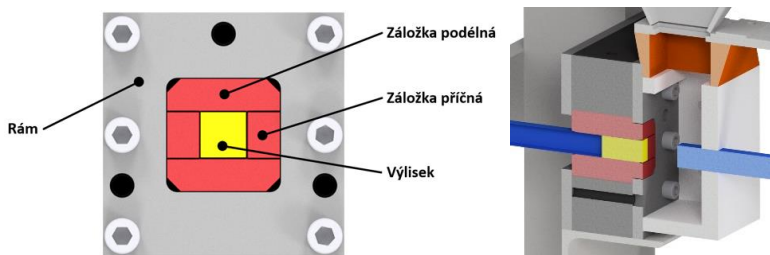


Obr. 6: Základní vstupní parametry pro návrh metodiky testování

Vzhledem ke stanovené životnosti lisovacího nástroje v reálných podmínkách (5000 cyklů) je pro návrh metodiky stanoven stejný počet cyklů. Jako zpracovávaný materiál je určena směs s ostřivou na bázi Al_2O_3 a SiO_2 s minimální možnou vlhkostí (požadavek na recyklaci). Referenčním materiálem pro hodnocení opotřebení je nástrojová ocel ISO EN 1.2436, zakalená na 63 ± 2 HRC a funkční povrch nástroje je obroben na $R_a = 0,8 \mu\text{m}$. Referenční lisovací nástroj a rozměry experimentálních lisovacích nástrojů jsou definovány prostřednictvím lisovaného objemu. Jako vhodná velikost testovacího výlisku je stanoven na základě normy spotřeby materiálu rozměr $20 \times 20 \times 20$ mm. Délka celého lisovacího cyklu je stanovena na 5 s (samotné lisování 1 s) při tlaku $25 \div 100$ MPa. Velice důležitým kritériem je kromě výše zmíněných parametrů jsou také náklady vztahované na jeden lisovací cyklus.

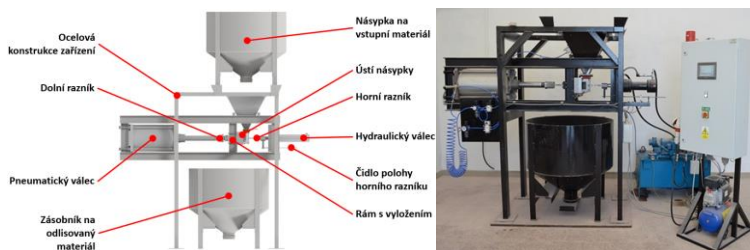
2.3 Návrh a konstrukce zkušebního zařízení

Zkušební zařízení vychází z principu lisování žárovzdomných materiálů. Zásadním rozdílem je poloha osy pohybu razníků, která je v rámci minimalizace prostoru umístěna horizontálně, nikoliv vertikálně (konvenční lis). Délka funkčních dílů je 70 mm. Umístění záložek v experimentálním zařízení a jeho model v řezu lze vidět na Obr. 7.



Obr. 7: Umístění záložek a model experimentálního zařízení v řezu

Záložky jsou do zkušebního zařízení vloženy s vůlí, kterou lze vymezit prostřednictvím šroubů. Plnění je realizováno otvorem u horního razníku. Model a prototyp zkušebního zařízení lze vidět na Obr. 8.



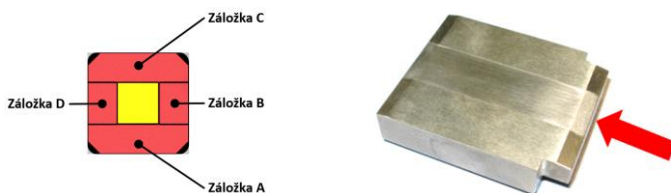
Obr. 8: Model a prototyp zkušebního zařízení

Horní razník s hydraulickým pohonem realizuje vtláčení směsi do lisovacího nástroje, proti dolnímu razníku, který je připojen na pneumatický válec se zpětným chodem. Po vyvinutí kritické lisovací síly prostřednictvím hydraulického pohonu dojde k přetlačení pneumatického válce a výlisek je tlačěn skrze záložky, po celé délce komory (záložky).

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

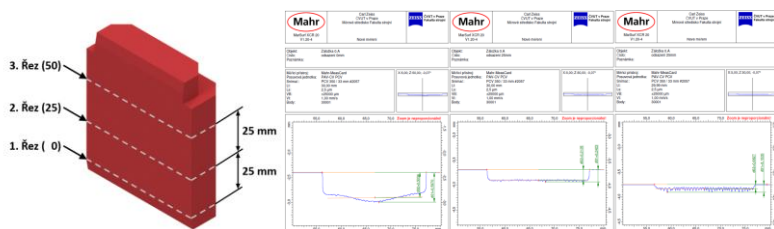
2.4 Návrh metody hodnocení velikosti opotřebení

Následující kapitola navrhuje systém pro vyhodnocení velikosti opotřebení a porovnání výsledků. Na Obr. 9 lze vidět označení jednotlivých záložek umístěných v experimentálním zařízení a opotřeбенou podélnou zkušební záložku po odlisování 5000 cyklů.



Obr. 9: Značení dílců experimentálního lisovacího nástroje a opotřeбенá záložka s vyznačeným směrem pohybu materiálu

Pro měření opotřebení experimentálních vzorků bylo zvoleno měřicí pracoviště MarSurf XCR 20, které umožňuje měření drsnosti a profilu kontury. Pro porovnání výsledků měření jsou stanovena konkrétní místa, kde měření probíhá. V rámci vyhodnocení jsou stanoveny tři řezy označené jako (0,25,50). Vzdálenost řezu 0 od dolní hrany podélné záložky činí 2 mm. Schematické znázornění polohy jednotlivých řezů na záložce lze vidět na Obr. 10. V každém řezu je prostřednictvím softwaru vyhodnocena velikost středního a nejvyššího opotřebení, viz Obr. 10 vpravo.



Obr. 10: Poloha řezů a protokoly z vyhodnocení vzorku 0

Pro verifikaci funkčnosti experimentálního zařízení a pro porovnání výsledků byl vyroben referenční experimentální lisovací nástroj označený jako 0, který je zároveň představitelem současné technologie výroby lisovacích nástrojů. Vyhodnocovány jsou pouze podélné záložky označené jako „záložka A“ a „záložka C“. Ukázkou vyhodnocení pro referenční nástroj lze vidět v Tab. 1.

Tab. 1: Příklad naměřených a zpracovaných hodnot velikosti opotřebení záložek 0

Č.zorku	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			

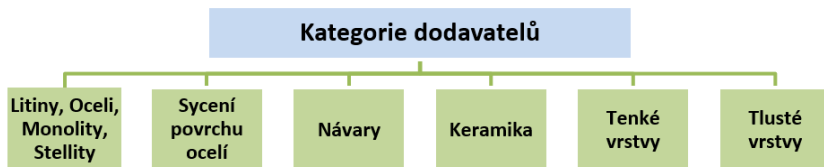
Z Tab. 1. jsou patrné zřetelné rozdíly v hodnotách příslušejícím jednotlivým řezům. Nejvyšších hodnot opotřebení je dosaženo v místě výstupu výlisku z nástroje, tedy v řezu 0.

2.5 Ověření experimentálního zařízení

V rámci tohoto kroku bylo vyrobeno celkem 6 referenčních nástrojů, které byly podrobeny provoznímu testu. Cílem testu bylo dosáhnout na referenčních nástrojích stejného opotřebení jako na reálných lisovacích nástrojích po odlisování 5000 cyklů. Postupnou úpravou lisovacích parametrů, bylo dosaženo shodného opotřebení jako na reálném lisovacím nástroji.

2.6 Výsledky experimentálních zkoušek

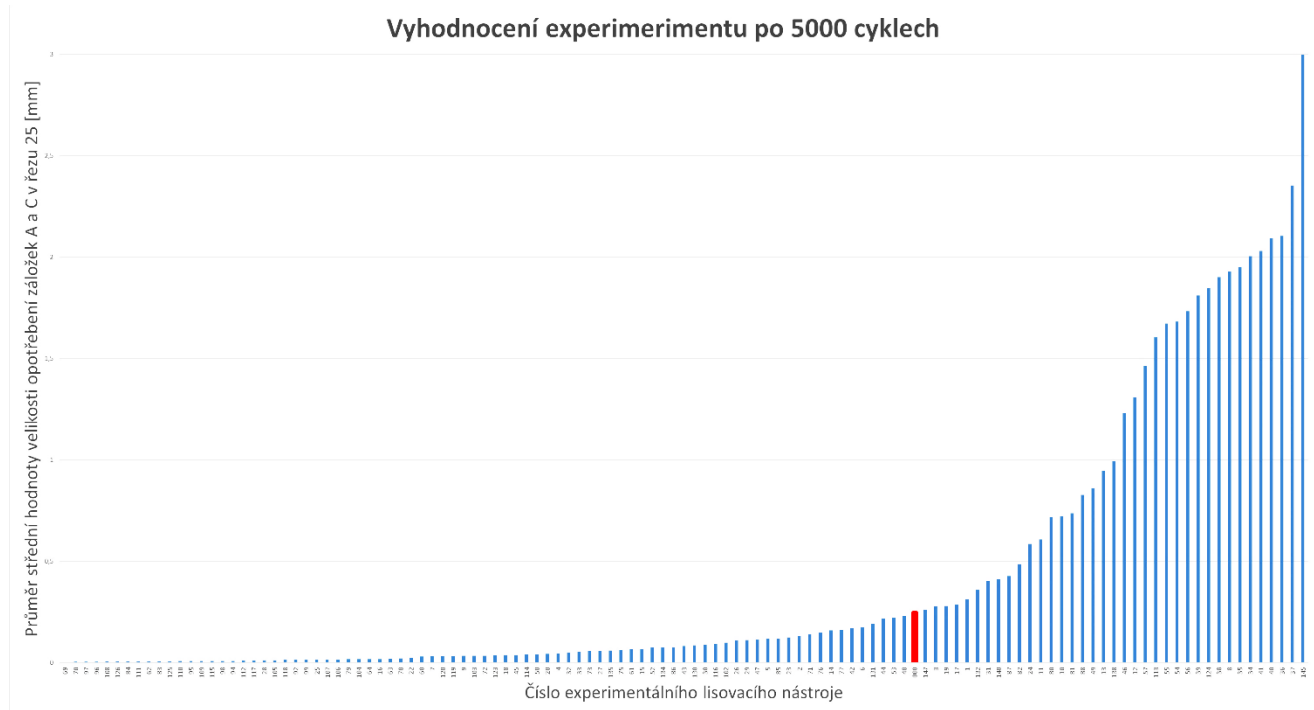
V rámci disertační práce je provedena rešerše metod úpravy povrchu lisovacích nástrojů pro zvýšení jejich životnosti. V rámci rešerše byli dodavatelé jednotlivých řešení úprav povrchu rozděleni do šesti kategorií, viz Obr. 11.



Obr. 11: Rozdělení kategorií dodavatelů

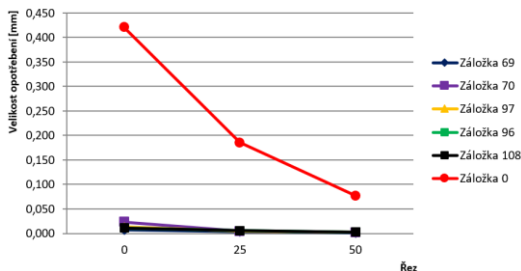
Do realizace experimentu bylo zapojeno celkem 33 dodavatelů primárně z ČR, ale také ze států EU a USA. Celkem bylo dodáno 117 experimentálních lisovacích nástrojů, které byly podrobeny abrazivní zkoušce na zkušebním zařízení čítající 5000 lisovacích cyklů.

Na Obr. 12 je znázorněna průměrná střední velikost opotřebení po 5000 cyklech ve středním řezu (řez 25). Referenční záložka 000 je označena červeně.



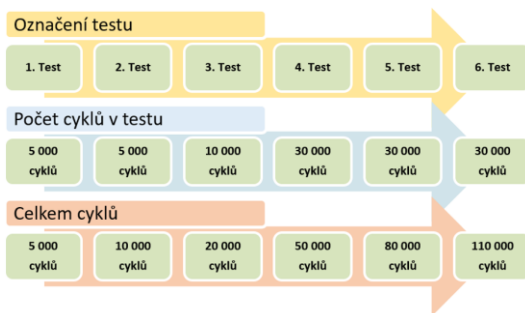
Obr. 12: Vyhodnocení velikosti opotřebení experimentálních lisovacích nástrojů v řezu 25 po 5000 cyklech

Pro vybrané záložky byl vyhodnocen i průběh opotřebení. Na Obr. 13 lze vidět průběh opotřebení nejlépe vyhodnocených záložek v porovnání s referenční záložkou (označena červeně).



Obr. 13: Průběh opotřebení nejlépe vyhodnocených záložek po 5 000 cyklech společně s referenční záložkou 000

V návaznosti na výsledky prvního testu bylo zvoleno na základě vybraných kritérií (velikost opotřebení, cena) 26 lisovacích nástrojů pro další testování. Plán následujících testů pro vybrané nástroje lze vidět v blokovém schématu na Obr. 14.



Obr. 14. Schéma plánu testování experimentálních lisovacích nástrojů

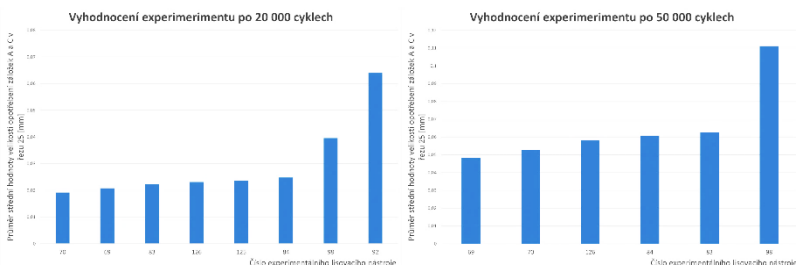
Po provedení druhého testu byly stanoveny perspektivní skupiny materiálů, které lze uvažovat pro další testování. Jednalo se o materiály z kategorie

„Litiny, Oceli, Monolity, Stellyty“, kategorie „Nitridování, Cementace“ a kategorie „Tlusté vrstvy“ uvedené v rozdělení viz Obr. 11.

Z pohledu kategorie „Nitridování, Cementace“ byly prvnímú testu podrobeny také experimentální lisovací nástroje, jejichž povrch byl sycen bórem. Dílčí výsledky experimentů byly dále hodnoceny. [K5] [K9] [K10] [K13] [K14]

Z pohledu kategorie „Tlusté vrstvy“ byly prvnímú 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]

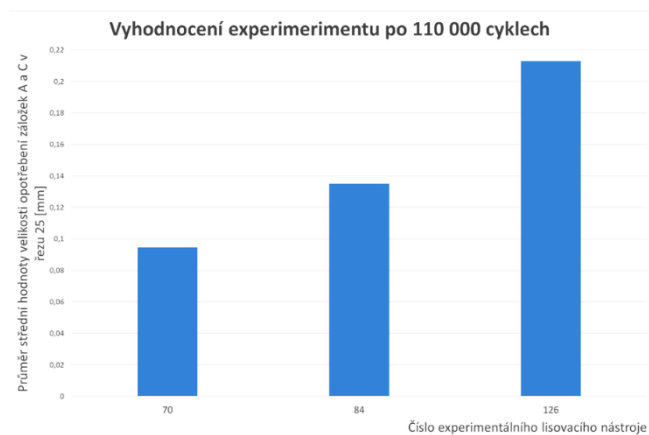
Po druhém testu bylo vyraženo celkem 18 vzorků (pro třetí test 8 vzorků), které vykazovaly mechanické poškození a jejichž finanční náklady jsou při nasazení na reálný nástroj řádově vyšší. Na Obr. 15 jsou znázorněny výsledky třetího a čtvrtého testu. Po třetím a čtvrtém testu byly vyraženy vzorky, které vykazovaly řádově vyšší opotřebení v řezu 50.



Obr. 15: Vyhodnocení velikosti opotřebení experimentálních lisovacích nástrojů v řezu 25 po 20 000 a 50 000 cyklech

V pátém testu byl vyřazen vzorek 83, který opět vykazoval výrazné opotřebení v oblasti řezu 50. Dále bylo tedy testováno celkem 5 vzorků. Po provedení pátého testu došlo k vyřazení vzorku 98, opět z důvodu výrazně vyššího opotřebení a vzorku 69, který vykazoval na funkční ploše křehký lom.

Poslední test byl proveden pro tři vzorky. Tyto vzorky byly celkem testovány v průběhu dílčích experimentů na celkem 110 000 cyklů. Výsledky posledního testu lze vidět na Obr. 16.



Obr. 16: 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 žárovzdomých vysoce abrazivních materiálů. Střední hodnota opotřebení nejlepšího experimentálního nástroje po realizaci 110 000 lisovacích cyklů 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 cyklech na experimentálním zařízení.

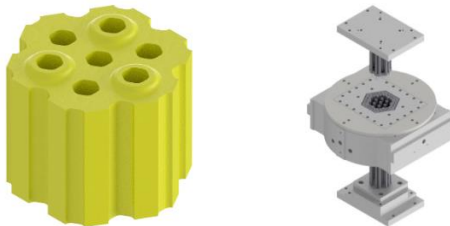
2.7 Shrnutí výsledků experimentu

V rámci experimentu bylo otestováno celkem 117 experimentálních lisovacích nástrojů. Na základě dílčích vyhodnocení velikosti opotřebení po celkem 6 testech čítajících 110 000 cyklů byly zvoleny 3 experimentální lisovací nástroje, které dosáhly řádově vyšší životnosti než referenční experimentální nástroj. Shrnutí experimentu lze vidět v Tab. 2.

Tab. 2: 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 jsou 3 materiálová řešení pro nový typ lisovacího nástroje, pro lisování žárovzdorných materiálů. O ověření v reálném provozu a ekonomické porovnání jednotlivých variant byla požádána společnost P-D Refractories CZ a.s. Byl zvolen komplexní tvarový nástroj určený pro velkosériovou výrobu tvarovek pro ohřívače větrů. Lisovací nástroj a výrobek lze vidět na Obr. 17.



Obr. 17: Tvarově náročný lisovací nástroj vpravo a tvarově náročný výlisek určený pro ohříváče větrů vlevo

Cena zvoleného lisovacího nástroje vyrobeného konvenční technologií je cca 500 000 Kč. První experimentální nástroj označený jako 70 byl vyroben z monolitu cermetu.

Druhý experimentální nástroj (označen 80), který byl opatřen odolnou funkční vrstvou nanesenou prostřednictvím laboratorní metody žárového nástříku, vykázal při experimentu nejvyšší odolnost vůči abrazivnímu opotřebení ze všech testovaných vzorků. Zmíněná metoda je však aplikovatelná pouze na vzorky malých rozměrů v laboratorním prostředí.

Posledním experimentálním nástrojem testovaným na 110 00 cyklů je nástroj č. 126 s odolnou funkční vrstvou aplikovanou na podkladový materiál prostřednictvím žárového nástříku. Na základě experimentálního lisovacího nástroje č. 126 vznikl prototyp s názvem „Optimální materiálové složení lisovací formy a ochranného povlaku“. [K2] Konkrétní řešení předmětem vlastního know-how, na základě kterého je uzavřena licenční smlouva mezi společnostmi P-D Refractories CZ a.s. a ČVUT v Praze. 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. Celkové porovnání tří potencionálních materiálů vhodných pro konstrukci lisovacích nástrojů je uvedeno v Tab. 3.

Tab. 3: Porovnání potenciálních materiálů vhodných pro výrobu reálných lisovacích nástrojů

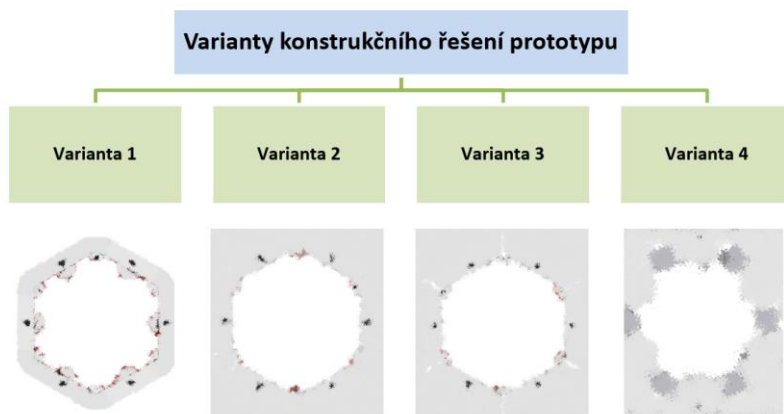
Název	Označení experimentálního nástroje			
	000	70	84	126
Cena nového lisovacího nástroje [Kč]	500 000	19 000 000	-	1 500 000
Násobek životnost [x]	1	58	40	25
Teoretický počet výlisků [Ks]	5 000	225 000	200 000	125 000
Náklady na 1 výlisek [Kč]	100	65	-	12

Vzhledem k výše popsaným důvodům ekonomického účinku je pro aplikaci na reálný lisovací nástroj zvolen materiál experimentálního lisovacího nástroje 126. Náklady na nástroj zvoleného výlisku jsou vypočteny na 12 Kč/ks oproti původním nákladům 100 Kč/ks.

3 Aplikace výsledků experimentu na reálný lisovací nástroj

Na novém konstrukčním řešení lisovacího nástroje (dále jen prototypu) se podílel konstrukční tým společnosti P-D Refractories CZ a.s., která do konstrukčního řešení implementovala stávající postupy pro konstrukci lisovacích nástrojů. Na základě společných diskuzí byly na konstrukci nového lisovacího nástroje stanoveny následující požadavky (pevnost, výrobní technologie, montáž, standardizace, technologičnost).

Na základě požadavků byly navrženy celkem 4 varianty konstrukčního prototypu, které lze vidět na Obr. 18. Z důvodu ochrany interního know-how firmy, na jehož základě je uzavřena licenční smlouva mezi společností P-D Refractories CZ a.s. a ČVUT v Praze jsou jednotlivé návrhy rozmazány.



Obr. 18: Varianty 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, jejichž vzájemná poloha je vymezena pomocí pera.

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.

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.

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 nejvíce vyhovující. Na základě výše zmíněného konstrukčního řešení lisovacího nástroje vznikl prototyp s názvem „Optimální konstrukční uspořádání nového typu lisovací formy“. [K3]

3.1 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 na sérii 20 000 ks tvarovek pozice DGSI 3/55K. Opotřebením reálného nástroje bylo měřeno po vylisování 5 000, 10 000 a 20 000 ks tvarovek. Následuje validace výsledků a porovnání velikosti opotřebením experimentálním lisovacím nástrojem.

Pro provozní zkoušku byl použit materiál označený jako Dinas DUCW, který je běžně určen pro výrobu pozice DGSI 3/55K. Jedná se o hutný křemičitý

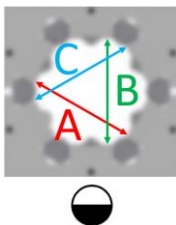
materiál s vysokým obsahem SiO_2 . Chemické složení materiálu Dinas DUCW lze vidět v Tab. 4.

Tab. 4: 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

Opotřebení lisovacího nástroje pro pozici DGSI 3/55K vyrobeného standardní technologií, která odpovídá experimentálnímu lisovacímu nástroji číslo 000, s použitím směsi DUCW je 5 000 cihel s opotřebením 0,5 mm na vnitřním rozměru vyložení lisovacího nástroje, tedy 0,25 mm na stěně. Opotřebení je limitní z důvodu dodržení rozměrových tolerancí finálních výrobků.

Měření opotřebení prototypu je realizováno prostřednictvím měření příčných rozměrů ve třech podélných řezech, viz Obr. 19.



Obr. 19: Místa pro kontrolu rozměru lisovacího nástroje pro pozici DGSI3/55K

Po odlisování 5000 tvarovek neodpovídá opotřebení prototypového lisovacího nástroje (0,046 mm) opotřebení experimentálního lisovacího nástroje číslo 126 (0,01 mm). Rozdílné hodnoty naměřené při provozní zkoušce jsou dány zejména vymezením vůlí v lisovacím nástroji, nikoli opotřebením funkčního povrchu. Za předpokladu přesného vymezení vůlí lze odhadovat reálné opotřebení na cca 0,01 mm. Pro potvrzení této hypotézy nejlépe poslouží

vyhodnocení opotřebenění po 10 000 odlisovaných tvarovkách, kde dojde k úplnému vymezení vůlí.

Průměrná hodnota opotřebenění (0,057 mm) naměřená po provozní zkoušce lisování 10 000 tvarovek odpovídá hodnotě naměřené při experimentu s použitím záložky č. 126.

Výsledky provozních zkoušek prototypu byly následně přímo implementovány do výroby lisovacích nástrojů ve společnosti. 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. [K4][K6][K7]

3.2 Shrnutí provozních zkoušek prototypu

Z výsledků experimentálních zkoušek a zavedení prototypu nástroje do výroby je patrné, že vhodnou kombinací podkladního materiálu a funkčního povrchu je možné několikanásobně zvýšit životnost lisovacích nástrojů.

Pro ověření prototypu lisovacího nástroje byla navržena provozní zkouška s omezením délky série na 20 000 ks tvarovek (ekonomické důvody). Během této zkoušky byla provedena kontrola velikosti opotřebenění funkčního povrchu prototypu po 5, 10 a 20 tisících tvarovkách. Následně bylo toto opotřebenění porovnáno s opotřebením experimentálního lisovacího nástroje číslo 126. Na základě porovnání naměřených hodnot lze novou metodiku zvyšování životnosti nástrojů určených k lisování žárovzdorných materiálů pokládat za validovanou a verifikovanou.

Navržená metodika navíc poskytuje díky verifikaci experimentu na reálném prototypu možnost odhadnout životnost reálného 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 cyklů, což je oproti původnímu stavu více než 25násobek.

V návaznosti na provozní zkoušku prototypu byly výsledky testování přímo zavedeny do výrobních procesů určených k produkci lisovacích nástrojů. Dle interních informací společnosti byla životnost nástroje dokonce 75× vyšší oproti původnímu nástroji.

4 Závěry a diskuze výsledků

Disertační práce s názvem „Zvyšování životnosti nástrojů určených k lisování žárovzdomých materiálů“ se zabývá problematikou abrazivní odolnosti materiálů v průmyslovém využití.

V rešeršní části je popsána problematika zvyšování životnosti abrazivních nástrojů a jejího experimentálního ověřování. V současné době jsou definovány 4 experimentální metodiky pro určení životnosti nástrojů a jejich odolnosti vůči mechanismům opotřebení. V souvislosti se zjišťováním opotřebení strojních součástí bylo vyvinuto několik dalších metodik, které však nemají přesnou vypovídající metodu, jako data získaná z reálného provozu. Současné konstrukční řešení experimentálních zařízení je koncipováno tak, aby bylo možné simulovat co největší spektrum opotřebení 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 žárovzdomých materiálů.

Výše uvedené nedostatky jsou v další části práce do značné míry odstraněny návrhem experimentálního zařízení pro zkoušky abrazivní odolnosti konstrukčních materiálů při lisování žárovzdomých materiálů. Princip fungování experimentálního zařízení je založen na provedené analýze mechanismu vzniku opotřebení lisovacích nástrojů, kde byly identifikovány hlavní příčiny vzniku opotřebení. Vlastní technické řešení experimentálního zařízení je předmětem patentu PV 2015-126, který zabezpečuje novost řešení. Zároveň byla vyvinuta přímočará metoda vyhodnocení otěruvzdornosti konstrukčních materiálů, která umožňuje sledování a porovnání výsledků experimentálních zkoušek.

V rámci experimentálních zkoušek bylo testováno celkem 117 experimentálních lisovacích nástrojů, které byly postupně eliminovány na základě vyhodnocení celkem šesti sérií experimentálních testů. Výsledkem testování byl výběr třech materiálových řešení, která dosáhla experimentálně určené životnosti čítající 110 000 cyklů. V rámci licenční smlouvy mohly být publikovány pouze dílčí výsledky provedených experimentů, viz kapitola 2.6. V dalším kroku byl na základě určených omezujících podmínek zkonstruován nový funkční prototyp lisovacího nástroje pro zvolenou tvarovku s cílem ověřit výsledky experimentu v reálných podmínkách. Výše zmíněné dílčí výsledky experimentálních zkoušek a prototyp lisovacího nástroje jsou obsahem dalších publikací autora.

Pro ověření prototypu byla navržena provozní zkouška čítající 20 000 lisovacích cyklů. Během zkoušky byly provedeny 3 kontroly funkčního povrchu prototypu s cílem ověření dat získaných z experimentální zkoušky nástroje 126. 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 cyklů, což je oproti původnímu stavu více než 25násobek.

4.1 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 žárovzdomých výrobků pomocí hydraulického lisu. Lze konstatovat, že splněním dílčích cílů práce, bylo dosaženo řádového zvýšení životnosti lisovacích nástrojů určených k lisování žárovzdomých materiálů.

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

V rámci návrhu experimentálních zkoušek byl analyzován vliv jednotlivých činitelů opotřebení a bylo vyvinuto zařízení pro testování abrazivního opotřebení lisovacích nástrojů.

Tímto byl dílčí cíl práce splněn.

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

Bylo vyvinuto experimentální zařízení, které je schopně věrohodně simulovat provozní podmínky, které odpovídají lisování žárovzdorných materiálů na hydraulických lisech s provozním tlakem až 100 MPa. Vlastní technické řešení experimentálního zařízení je předmětem patentu PV 2015-126 podaného dne 24.02.2015 a uděleného dne 06.04.2016.

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 zkoušek bylo vyrobeno celkem 117 experimentálních lisovacích nástrojů. Na nejlepších experimentálních nástrojích byly následně realizovány další testy, jejichž výsledkem jsou 3 konkrétní materiálová řešení, která dosáhla testované životnosti 110 000 cyklů. Následně byly zpracovány, na základě nového materiálového řešení, varianty nového konstrukčního řešení lisovacího nástroje, na jehož základě vznikl prototyp.

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, kde lze konstatovat, že výsledné hodnoty opotřebení experimentálních nástrojů odpovídající opotřebení reálných lisovacích nástrojů.

Tímto byl dílčí cíl práce splněn.

4.2 Důsledky pro průmyslovou praxi a navazující výzkum

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 nástroje při snížení kusových nákladů. Navržené řešení je unikátní na světové úrovni a je mezioborově přenositelné například do oblasti stavebnictví, těžby surovin, zemědělství nebo potravinářství.

Navazující výzkum v oblasti zvyšování životnosti lisovacích nástrojů bude směřovat do oblasti aplikace funkčního povrchu na komplexní lisovací nástroj určený pro lisování nových typů žárovzdomých materiálů. Další výzkum bude směřován do optimalizace výrobních technologií tvarově složitých dílců lisovacích nástrojů pro lisování žárovzdomých materiálů.

Od doby aplikace výsledků práce jsou v rámci tržního prostředí žárovzdomých výrobků monitorovány zvyšující se požadavky na tvarovou složitost a materiálové složení velkosériových žárovzdomých výrobků. Vyvinutá technologie aplikace funkčního povrchu je v současné době na hranici tvarové složitosti, výrobní kapacity a kvality dílů, které je možno touto technologií

vyrobít. 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.

Publikace autora související s tématem disertace

- [K1] BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; KOLAŘÍK, K.; PALA, Z.; KUTĚJ, D. Experimentální stroj pro testování otěruvzdornosti, zejména při lisování žárovzdomých materiálů. Czech Republic. Patent CZ 305959. 2016-04-06.
- [K2] KYNCL, J.; MIFKOVÁ, M.; 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.; 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

Seznam použité literatury v tezích

- [1] ČSN 01 5050 *Opořebení 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] JANOVEC, J. CEJP, J. a STEIDL, J. *Perspektivní materiály*. 3. přeprac. vyd. Praha. České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [4] STERN, K. H. *Metallurgical and Ceramic Protective Coatings*, Chapman and Hall, first edition. 1996.
- [5] 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.
- [6] OVČAČÍK, F. *Základní pojmy a rozdělení žározdorných 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
- [7] LIU, Y. Q. et al. *Thermodynamic optimization of the boron–cobalt–iron system*. *Alloys and Compounds*. 2011, 509 (14), s. 4805–10.
- [8] 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.

- [9] 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.
- [10] 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>
- [11] 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.
- [12] P-D REFRACTORIES CZ A.S. Podnikové zdroje. [cit. 2019].

Anotace

Tato disertační práce s názvem „Zvyšování životnosti nástrojů určených k lisování žárovzdušných materiálů“ se zabývá vývojem nové metodiky experimentálního ověřování životnosti konstrukčních materiálů v extrémních podmínkách, jako je například lisování žárovzdušných 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.

Summary

The dissertation thesis entitled " Increase of refractory pressing tool durability" deals with the issue of material abrasive resistance in industrial use. Currently, there is not developed experimental methodology, which can describe durability a and pressing tools wear of resistance used in refractory industry.

Research was motivated by needs of several refractory factories, which could not predict the durability of their pressing tools. In addition, these factories could not predict the life cycle of pressing tools, which estimated to enormous financial losses. Due to listed issue development of new experimental pressing tools durability verification methodology and testing machine (This machine was patented shortly after launch) was necessary.

Furthermore, developed experimental methodology and testing machine have been used to develop new coats and coating methods for refractory pressing tools. Together, there have been 117 different tool materials and coatings tested. Data gathered from experimental testing have been verified on real prototype of pressing tool. This research estimated in 25fold refractory pressing tool durability increase.

Bez ohlasů a recenzí