ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2341 Strojírenství
Studijní zaměření: Strojní inženýrství

DIPLOMOVÁ PRÁCE

ZVÝŠENÍ TRVANLIVOSTI LISOVACÍHO NÁSTROJE PRO VÝROBU DŘEVENÝCH BRIKET

Autor: **Bc. Martin HÁLA**

Vedoucí práce: **Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.**

Akademický rok 2018/2019

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.
Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, jež je její součástí.

V Plzni dne: ……23.5.2019……. **. . . . . .**
podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za vstřícný přístup, věcné a cenné připomínky a odborné vedení, jež mi pomohlo tuto práci zkompletovat. Dále bych rád poděkoval Ing. Marku Vostřákovi, Ph.D. z NTC ZČU Plzeň, který realizoval laserové povlakování a pánům z firmy Škoda Doosan Power. Konkrétně vedoucímu oddělení Reverse Engineering panu Haračićovi, dále Ing. Zajícovi a Ing Schmidtovi, s nimiž jsem spolupracoval v oblasti skenování součástí.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	**Příjmení** Bc. Hála	**Jméno** Martin	
STUDIJNÍ OBOR	B2341 Strojírenství		
VEDOUCÍ PRÁCE	**Příjmení (včetně titulů)** Ing. Zetek,Ph.D.	**Jméno** Miroslav	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	**DIPLOMOVÁ**	~~**BAKALÁŘSKÁ**~~	**Nehodící se škrtněte**
NÁZEV PRÁCE	ZVÝŠENÍ TRVANLIVOSTI LISOVACÍHO NÁSTROJE PRO VÝROBU DŘEVENÝCH BRIKET		

FAKULTA	strojní		**KATEDRA**	KTO		**ROK ODEVZD.**	2019

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	60		**TEXTOVÁ ČÁST**			**GRAFICKÁ ČÁST**	

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) **ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL, POZNATKY A PŘÍNOSY**	V práci je nastíněn problém nízké trvanlivosti lisovacího nástroje pro výrobu dřevěných briket. Je rozebrán akruální stav a navrženo několik variant opatření, z nichž vybrané jsou otestovány reálným provozem. Následně je vyhodnoceno optimální řešení vedoucí k největšímu zlepšení současného stavu.
KLÍČOVÁ SLOVA **ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY,** **KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE**	Životnost, trvanlivost, lisovací nástroj, briketa

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	**Surname** Bc. Hála	**Name** Martin	
FIELD OF STUDY	B2341 Strojírenství		
SUPERVISOR	**Surname (Inclusive of Degrees)** Ing. Zetek,Ph.D.	**Name** Miroslav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	**DIPLOMOVÁ**	~~**BAKALÁŘSKÁ**~~	**Nehodící se škrtněte**
TITLE OF THE WORK	INCREASING DURABILITY OF THE PRESS TOOL FOR THE PRODUCTION OF WOODEN BRIQUETTES		

FACULTY	Mechanical Engineering	**DEPARTMENT**	Machining Technology	**SUBMITTED IN**	2019

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

TOTALLY	60	**TEXT PART**		**GRAPHICAL PART**	

BRIEF DESCRIPTION **TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS**	The thesis solves the problem of low durability and tool life of the screw for compressing wooden sawdust. It is focused on the increasing tool life by optimizing material selection, heat treatment and surface treatment.
KEY WORDS	durability, service life, press tool, briquette

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Martin HÁLA**
Osobní číslo:	**S17N0072K**
Studijní program:	**N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor:	**Strojírenská technologie - technologie obrábění**
Název tématu:	**Zvýšení trvanlivosti lisovacího nástroje pro výrobu dřevěných briket**
Zadávající katedra:	**Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh experimentu a jeho realizace
4. Zhodnocení výsledků
5. Závěr

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah kvalifikační práce: 50 - 70 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

- KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-697-5.
- MINAŘÍK, Václav. Plamenové svařování. Praha: *Scientia*, 1997. ISBN 80-7183-080-1.
- KATAYAMA, Seiji, ed. Handbook of laser welding *technologies*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. *Woodhead Publishing series in* electronic and optical materials. ISBN 978-0-85709-264-9.
- MATTOX, D. M. Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing: film formation, adhesion, surface preparation and contamination control. Westwood, N.J.: *Noyes Publications*, *c1998*. ISBN 0-8155-1422-0.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2019**

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

L.S.

Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 18. října 2018

Obsah

1. Úvod 3
1.1. Základní pojmy, rozdělení, charakteristika. 4
1.2. Základy úspěšného lisování a charakteristika briket. 4
1.3. Druhy briketovacích lisů, stručný popis, jejich výhody a nevýhody. 5
1.3.1. Klikový briketovací lis. 5
1.3.2. Hydraulický briketovací lis 6
1.3.3. Šnekový briketovací lis 6
2. Rozbor současného stavu 7
2.1. Tření – definice a druhy 7
2.2. Opotřebení a jeho druhy 10
2.3. Popis šnekového briketovacího lisu a princip lisování 13
2.4. Specifikace šneku dle stávající dokumentace 15
2.5. Úskalí nástroje a jeho opotřebení 16
2.6 Aktuálně používané technologie k renovaci 19
2.6.1 Teorie obloukového svařování a nanesení vrstvy 19
2.6.2 Žárový nástřik plamenem s přetavením 21
2.7. Další možnosti renovace nástroje. 23
2.8. Možnosti měření opotřebení tvarově složitých dílů. 27
2.8.1. 3D skenování 28
2.8.2 Fotogrametrie 31
2.8.3. Princip srovnání 3D naskenovaných objektů 31
3. Návrh experimentu a jeho realizace 32
3.1. Laser-princip rozdělení a oblast využití 32
3.2. Princip laserového povlakování LASER CLADDING 35
3.2. Volba prášku a podmínek 39

3.4. Podmínky experimentu 40

4. Zhodnocení výsledků 41

4.1. První generace 41

4.2. Druhá generace 43

4.3. Třetí generace 45

4.4. Čtvrtá generace 48

4.5. Shrnutí výsledků 50

5. Závěr 52

Seznam zdrojů: 53

Seznam zkratek a symbolů: 55

1. Úvod

Potřeba zdroje tepla sahá u lidské populace velmi hluboko do historie. V počátku se jednalo o zajištění komfortu a úpravu pokrmů. Tato prvotní myšlenka platí stále, avšak s masivním nárůstem lidské populace je patrná snaha získávat energie efektivně a z obnovitelných zdrojů. To vše s ohledem na životní prostředí.

Do kategorie obnovitelných zdrojů lze zařadit biomasu, jejíž využití má mnoho různých forem a podob. Může jít o prosté spalování, zplynování, vysoušení, lisování a další.

V tomto případě se bude jednat o biomasu z odvětví lesnického průmyslu a následné pilařské produkce, jejímž vedlejším produktem jsou piliny, hobliny, popř. štěpka. Ve většině případů je štěpka zpracovávána v teplárnách nebo firmách zabývajících se výrobou velkoformátových desek jako jsou OBS, QSB, překližka apod. Piliny a hobliny jsou zpravidla zpracovávány lokálně ve dřevařských závodech do briket nebo pelet.

Snaha o stoprocentní využití zdrojů má v tomto případě dvě roviny – ekonomickou a ekologickou. Ta první zvyšuje ziskovost podniku dalším využitím dříve nehodnotného odpadu a jeho následnou přeměnou na produkt. Ta druhá omezuje plýtvání neobnovitelných zdrojů a svůj efekt-zdroj tepla-přináší z obnovitelných zdrojů.

Avšak každá výroba stojí nějaké úsilí, energii, a i u lisování odpadu z dřevovýroby existuje několik úskalí, která mohou výrobu komplikovat. Jedná se zejména o vystavení lisovacích nástrojů obrovskému tlaku při vyšších teplotách. Proto je nutné nástroje před těmito vlivy způsobujícími opotřebení nějakým způsobem ochránit tak, aby byla zvýšena jejich trvanlivost a životnost.

Výsledný efekt samozřejmě pozitivně ovlivní i ekonomickou stránku věci, neboť zkrátí servisní intervaly, sníží poruchovost celého procesu a zvýší tak produktivitu zařízení.

Práce volně naváže na mou bakalářskou práci, v níž byly nastíněny určité možnosti opatření vedoucích ke zlepšení stavu. V úvodu bude připomenuta podstata lisování, její formy a několik základních pojmů. V hlavní části práce bude věnována pozornost opatřením na zvýšení trvanlivosti,

které dnešní moderní technologie umožňují. Jedná se zejména o navařování tenkých vrstev odolných vůči tření a abrazi pomocí laserových technologií.

1.1. Základní pojmy, rozdělení, charakteristika.

Briketováním je nazýván proces lisování materiálu organického či anorganického původu specifických vlastností při působení tlaku, v některých případech i teploty. Strojem k realizaci tohoto procesu je briketovací lis a výsledkem procesu je briketa mající různé tvary a velikosti dle specifik daného stroje či výrobní technologie. [1]

Jak bylo nastíněno v úvodu, lze v dnešní době lisovat prakticky cokoliv. Jak materiály anorganického původu, tak organického. Rozdíl mezi oběma druhy je ten, že u anorganického lisování se nevyužívá tak vysokých tlaků a teplot jako u organického a většinou je nutné užít nějaké pojivo. Řešen bude případ organického lisování, který až na výjimky nepotřebuje žádná pojiva. [2] Z těchto základních rozdílů vyplývá, že stroje pro lisování materiálů organického původu musí mít robustnější konstrukci proto, aby při lisování došlo k rozrušení buněčných stěn dřevního odpadu za účelem vyloučení pryskyřičné složky-ligninu. Ten slouží jako pojivo.

1.2. Základy úspěšného lisování a charakteristika briket.

K dosažení kvalitní dřevěné brikety je zapotřebí dodržení několika parametrů. Mezi základní však patří vstupní vlhkost materiálu a jeho homogenita. Obecně lze říci, že čím je materiál sušší a jemnější, tím je briketa kvalitnější. Limitní hodnota vlhkosti bývá 8-12%. Zdroje uvádějí, že přesáhne-li vstupní hodnota 15 %, je výsledná briketa plná trhlin a nad 20 % je materiál prakticky nemožno slisovat. Avšak jak vlhkost, tak zrnitost, je dána výrobcem stroje v závislosti na tom, jakou lisovací technologii používá. [3]

Briketa vyrobená dle normy ISO 17225-3 bez ohledu tvar a výrobce stroje se vyznačuje vysokou hustotou, jejíž hodnoty se pohybují do 1000-1300 kg/m^3, výhřevností 18-19,5 MJ/kg a nízkou hodnotou obsahu popele (1-3%).

1.3. Druhy briketovacích lisů, stručný popis, jejich výhody a nevýhody.

Stroje lze rozdělit podle lisovacího procesu na stroje vyrábějící kontinuálně, u nichž vzniká nekonečná briketa, která je následně dělena na vhodné délky, a stroje lisující jednotlivé brikety samostatně. Dalším možným rozdělením je dělení podle mechanismu, který lis pohání. Lze tak je rozdělit na lis klikový, šnekový a hydraulický.

1.3.1. Klikový briketovací lis.

Jak název napovídá, lis využívá klikového mechanismu. Hlavní motor pohání pomocí řemenového převodu klikovou hřídel se setrvačníkem, na kterou je upevněna ojnice s pístem. Pracovním nástrojem je píst konající pohyb přímočarý vratný. V jeho dolní úvrati dochází k přísunu materiálu, který je při pohybu pístu vzhůru zhutněn přes matrice daného průřezu. Ten bývá zpravidla kruhový, avšak se vyskytují i jiné. Tento cyklus se neustále opakuje, čímž se vytvoří nekonečná briketa.

Výhodou lisu je jednoduchost konstrukce a možnost snadno variovat délku brikety dle požadavku zákazníka. Jako jistou nevýhodu lze označit rozpad brikety při hoření na jednotlivé segmenty, které jsou definovány množstvím pilin stlačených při jednotlivém cyklu mechanismu.

Obrázek 1.: Pístový briketovací lis [4]

1.3.2. Hydraulický briketovací lis

Tento lis lze dle historického vývoje označit jako nejmodernější. Využívá jak hydrauliky, tak nejmodernější elektroniky, která celý proces řídí pomocí PLC.

Celý stroj pracuje pomocí tří přímočarých hydromotorů poháněných rotačním čerpadlem s rotujícími písty. Jeden hydromotor slouží pouze k přesouvání formy, neboť při posunu hlavního pístu vpřed dochází jak ke slisování brikety, tak k současnému vytlačení brikety vyrobené v cyklu předcházejícím. Další hydromotor je tzv. předzhutňovač, který po naplnění lisovacího prostoru stlačí materiál shora a čeká, až hlavní píst vytvoří stlačením materiálu přes formu o lisovací desku briketu. Čerpadlo lisu je schopné vytvořit tlak až 250bar.

Mezi nesporné výhody patří možnost lisovat téměř všechny druhy materiálů a to, že briketa je při hoření stále kompaktní na rozdíl od předchozího typu. Nevýhodou je stroj složitější konstrukce s množstvím elektroniky a to, že briketa je vždy stejných rozměrů na základě parametrů výrobce stroje.

Obrázek 2: Hydraulický briketovací lis[5]

1.3.3. Šnekový briketovací lis

Šnekový briketovací lis je relativně jednoduchý stroj z kategorie kontinuálních lisů. K lisování je zde využit průchod materiálu zmenšujícím se okolním prostorem, který je tvořen soustavou šneků a matric. Šneky jsou upevněny na hřídeli, která je uložena v ložiskách rámu stroje a je poháněna

pomocí řemenového převodu elektromotorem. Šneky v podstatě protlačují materiál strojem a vyhřívané matrice udělí briketě výsledný tvar. Hlavní výhodou je kontinuita lisovacího procesu, což významně ovlivňuje výhřevnost briket. Dalšími přednostmi jsou jednoduchost stroje a možnost snadného nastavení délky brikety. Jako nevýhodu lze označit nutnost pořízení dalšího zařízení v podobě zkracovací pily, pomocí níž jsou brikety děleny na požadovanou délku, dále pak nutnost odsávat zbytkové páry vytvořené průchodem materiálu přes předehřáté matrice.

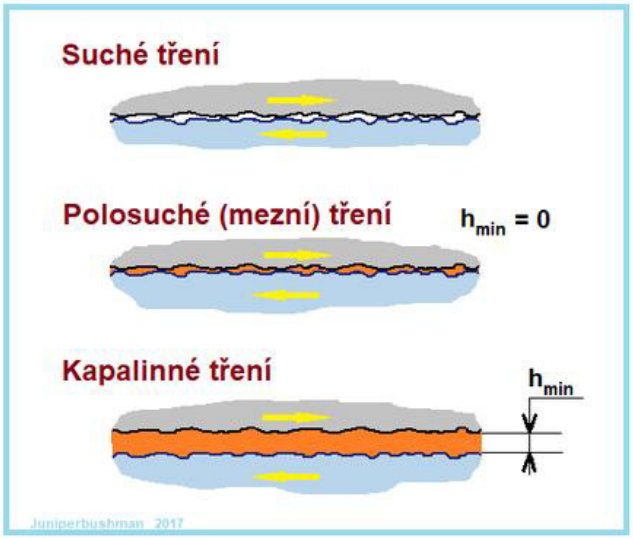
Obrázek 3: Šnekový briketovací lis[6]

2. Rozbor současného stavu

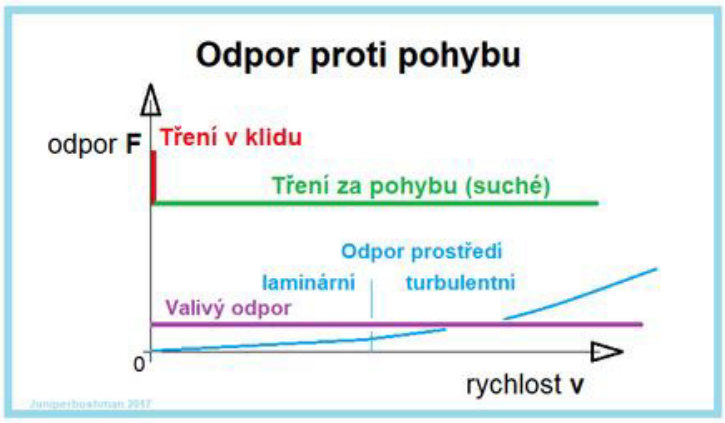
2.1. Tření – definice a druhy

Tření je fyzikální jev, který vzniká při posouvání (smýkání) jednoho tělesa po povrchu jiného tělesa. Jeho původ je především v nerovnosti obou styčných ploch, kterými se tělesa vzájemně

dotýkají. Nerovnosti povrchů při posouvání těles na sebe vzájemně narážejí, deformují se a obrušují. Tento jev je doprovázen vznikem třecí síly Ft, jejíž působiště je na stykové ploše obou těles a působí proti směru rychlosti vzájemného pohybu těles, popř. proti změně stavu u klidového tření. K překonání třecí síly ne nutné vynaložit určitou práci, která se následně mění na v teplo, respektive přírůstek vnitřní energie, což způsobí nárůst teploty.



Obrázek 4: Druhy tření [7]



Obrázek 5: Průběh odporových sil v závislosti na rychlosti [8]

Tření se liší podle skupenství stýkajících se těles a to následovně:

- **smykové tření -** vznik sil ve styčné ploše mezi dvěma pevnými tělesy
- **odpor prostředí** - jedná se o tření povrchu pevných těles s kapalinami či plyny

- **vnitřním třením** – jde o tření mezi částicemi či vrstvami tekutin (jedná se o vazkost či viskozitu, což je charakteristická veličina tohoto jevu)

U smykového tření (*Coulombova tření*) rozlišujeme:

- **tření v klidu** – statické tření (používá se index **0**)
- **tření za pohybu** – kinematické tření, je zpravidla menší než tření v klidu (obvykle o 20 ÷ 25 %)

Tření z hlediska použití maziva lze rozdělit na:

- **suché** – tzn. bez maziva, v tomto případě jde teoreticky o tření dvou čistých materiálů. V reálném styku dvou těles ale vždy figurují další látky, jako jsou plyny nebo vlhkost adsorbovaná povrchem těles nebo oxidické vrstvy,

- **kapalinné** (elastohydrodynamické) – jsou-li povrchy odděleny při tření vrstvou maziva nebo jiného kapalného média,

- **mezní** – je limitní případ kapalinného tření, kdy se vlastnosti tenké vrstvy (několik molekul) kapaliny liší od jejích vlastností objemových

- **smíšené** – jde o případ, kdy dochází k občasným dotekům mikro-nerovností povrchů stýkajících se těles i přes přítomnost maziva.

Součinitel smykového tření μ je fyzikální veličina, který udává poměr třecí síly Ft a kolmé tlakové síly Fn mezi tělesy při smykovém tření.

$$\mu = Ft/Fn$$

Součinitelé mohou být statické nebo dynamické. Statický součinitel udává hodnotu, kdy pohyb začíná z klidu a dynamický v pohybu. Příklady hodnot součinitelů jsou uvedeny v následující tabulce [9].

Materiály	Statický	Dynamický
Dřevo na dřevě (průměrně)	0,65	0,30
Dřevo na ledu (sněhu)		0,035
Kožený řemen na dřevě	0,47	0,27
Kožený řemen na litině	0,56	0,28
Kůže na kovu	0,60	0,25
Ocel na bronzu (mazáno)	0,1	0,01
Ocel na bronzu (suchá)	0,18	0,16
Ocel na dřevě	0,55	0,35
Ocel na ledu		0,027
Ocel na oceli (suchá)	0,15	0,10
Pryž (pneumatika) na náledí	0,1 - 0,2	
Pryž na betonu	0,7 - 0,8	
Pryž na dlažbě (malé kostky)	0,6 - 0,7	
Pryž na dlažbě (velké kostky)	0,6	
Pryž na mokrém asfaltu	0,2 - 0,5	
Pryž na suchém asfaltu	0,55	

Tabulka 1: Součinitele opotřebení [10]

2.2. Opotřebení a jeho druhy

Opotřebení je ztráta materiálu z povrchu, přenos materiálu z jednoho povrchu na druhý nebo pohyb materiálu v rámci jedné plochy. Poškození pevného povrchu, obvykle zahrnuje progresivní ztrátu materiálu, v důsledku relativního pohybu mezi tímto povrchem a kontaktní látkou nebo látkami. Norma ČSN 015050 definuje opotřebení jako změnu povrchu, rozměrů nebo vlastností tuhých těles, která není žádoucí a je způsobená vzájemným působením funkčních povrchů nebo povrchu a média, které opotřebení vyvolává. V technické praxi dochází velmi často ke kombinaci různých druhů opotřebení.

Norma ČSN 01 5050, která určuje názvosloví v oblasti opotřebení materiálu, je od roku 2007 neplatná. Názvosloví uvedené v této normě se však stále používá, a proto je níže uvedeno 6 základních druhů opotřebení. Jedná se o opotřebení adhezívní, abrazívní, erozivní, kavitační, únavové, vibrační. Důsledkem opotřebení strojních částí a jejich celků je ztráta požadované funkčnosti, což má vliv na ekonomiku výrobního procesu. Důležitými faktory pro volbu materiálů strojních částí jsou provozní mechanické a tepelné namáhání a charakter degradačních procesů působících na povrchu. Nelze upřít pozornost pouze na vyvolané síly a zatížení i přesto, že překročením meze únavy či pevnosti dojde k lomu a tím náhlé nefunkčnosti součásti nebo celku. Též volbě materiálu, popř. povrchové úpravě, která podléhá degradačním procesům jako je opotřebení, je nutné se věnovat s ohledem na postupnou ztrátu funkčnosti. [11]

Opotřebení tedy není materiálová vlastnost, ale lze ji považovat za odezvu systému. Odolnost povrchů proti opotřebení je však důležitým parametrem přímo ovlivňující životnost komponent. Míra opotřebení materiálu závisí na kontaktních podmínkách jako například materiál protikusu, tlak v místě kontaktu, kluzná rychlost, tvar kontaktu, tuhost odpružení, prostředí a maziva. [12]

K opotřebení nástroje dochází otěrem stykových ploch. Zde však nedochází k otěru mezi jednotlivými strojními komponenty, ale mezi nástrojem a briketou. A přestože piliny tvořící briketu nejsou nějak zvlášť abrazivním materiálem, tak vzhledem k vysokým lisovacím tlakům a zvýšené teplotě lisovacího procesu k opotřebení dochází.

Obecně tedy u strojních soustav a dílů dochází k opotřebení působením několika vlivů. Ty působí samostatně nebo v kombinaci. Jedná se o:

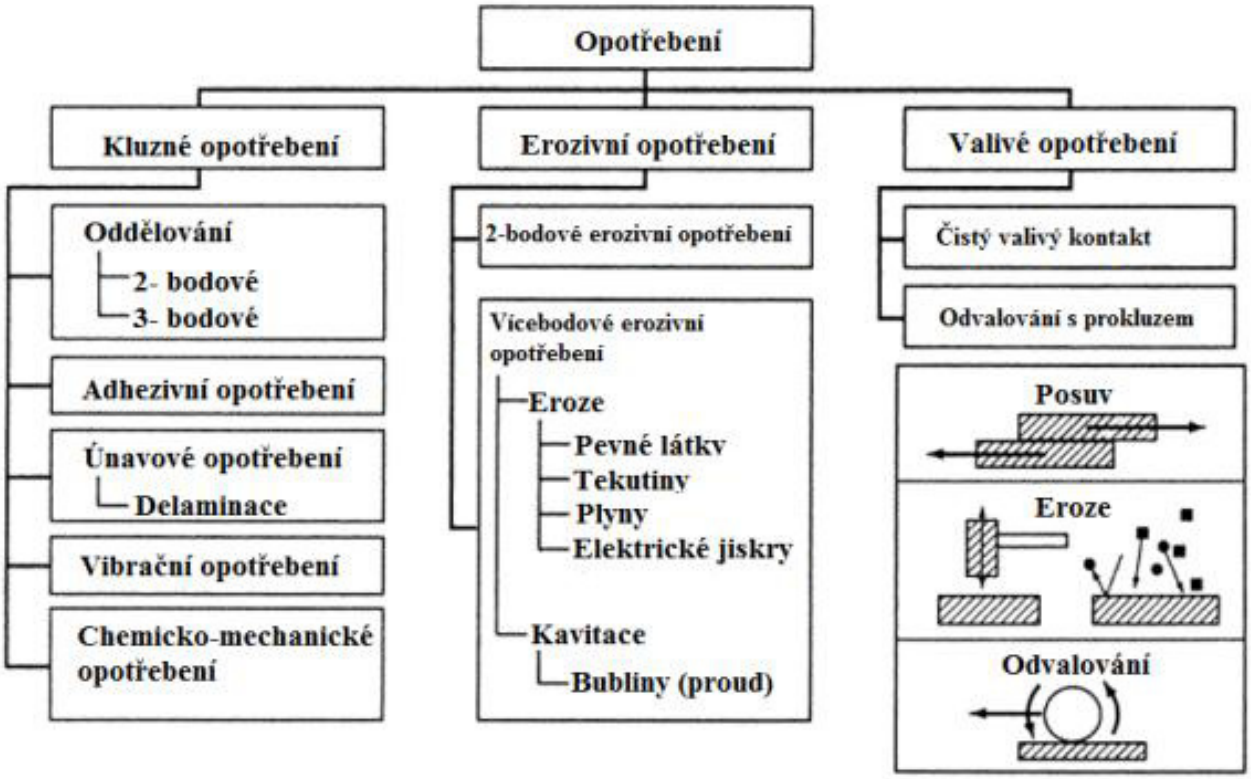
- **Abraze** - brusný otěr vlivem tvrdých mikročástic zúčastněných materiálů
- **Adheze** - vznik mikrosvarových spojů na styčných plochách v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů.

- **Difúze** - dochází k ní při teplotě, při níž se struktura kovů rozpadá na atomy, které následně migrují mezi zúčastněnými povrchy. Difundující atomy vnikají do mřížky kovu nástroje a vytvářejí nové nežádoucí tuhé roztoky nebo chemické vazby.
- **Oxidace** - je jev, při němž dochází ke vzniku chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí.

Vzhledem k výše uvedenému působení vlivů je logické, že k adhezi nedochází z důvodu rozdílných materiálů styčných ploch. Též difúzi lze vyloučit ze stejného důvodu a dále pak z nedosažení teploty potřebné k tomuto jevu. Je tedy jasné, že nejvýznamnější roli v opotřebení bude hrát právě abraze.

ABRAZE

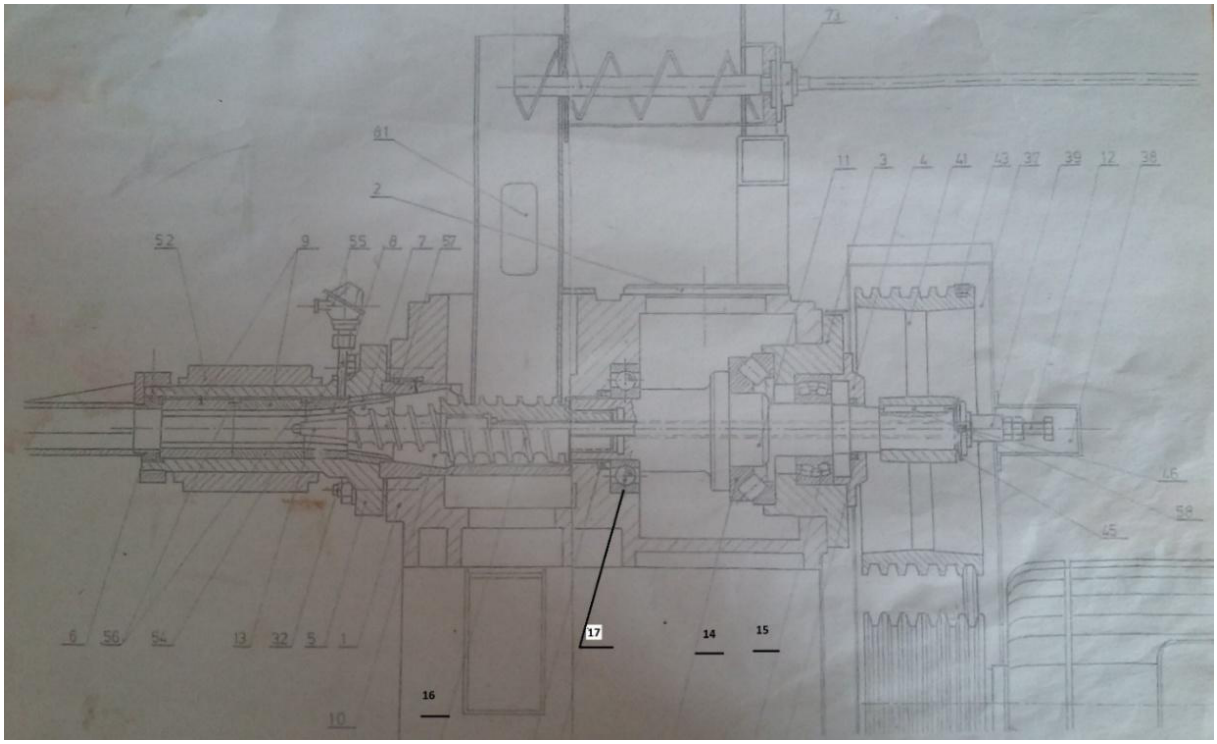
Zdroje udávají, že více než 50% všech případů opotřebení strojních součástí a jejich celků je způsobeno abrazí. Abrazívní opotřebení je charakterizováno silovým působením tvrdých částic a funkčního povrchu součásti, se kterým se lze v praxi setkat u lžic rypadel, na korbách nákladních automobilů nebo u potrubí dopravující písek. Velikost opotřebení je zjednodušeně řečeno závislá na poměru tvrdosti funkční plochy a abrazívní částice. Obecně platí, že čím tvrdší je abrazivo, tím měkčí musí být povrch funkční plochy a opačně. Proto se např. velmi osvědčilo použití měkčených plastů jako ochranného povlaku potrubí pro dopravu písku. Účinně se lze bránit vzniku abrazívního opotřebení u spalovacích motorů dobrou filtrací nasávaného vzduchu současně s filtrací motorového oleje. [13]



Obrázek 6: Rozdělení opotřebení [14]

2.3. Popis šnekového briketovacího lisu a princip lisování

Lis je po mechanické stránce jednoduchý stroj, který se skládá z hlavního hřídele uložené v sestavě valivých ložisek ponořených v olejové lázni. Radiální zatížení zachycují dvě ložiska (poz.17 a 15 obr. 7). Axiální zatížení je eliminováno jedním soudečkovým ložiskem (poz.14 obr. 7). Hlavní hřídel je dutý a vede jím závitová tyč (poz.12 obr. 7) sloužící k axiální aretaci primárního šneku. Hlavní hřídel je na jednom konci vyveden ze skříně a osazen klínovou řemenicí (poz.41 obr.7) s drážkami pro řemen typu A (poz.43 obr.7) sloužící k přenosu kroutícího momentu. Na druhé straně skříně je hřídel opatřen vnitřním závitem M70x4 mm LH, který umožňuje spojit podávací (sekundární) šnek (poz.16 obr. 7) a hlavní hřídel. Do podávacího šneku je vložen kuželový tlačný šnek (poz.13 obr. 7), který je akčním členem celé soustavy a zajišťuje lisovací proces. Piliny protlačuje přes předehřátou soustavu matric (poz.7,8,9 obr. 7) a vytvoří tak kontinuální briketu požadované kvality a tvaru.



Obrázek 7: Sestava lisu [15]

Princip lisování je zachycen po demontáži lisovacího šneku na fotografiích uvedených níže. Z nich je zřejmé, že lisovací proces probíhá mezi primárním kuželovým šnekem a prvotní kuželovou matricí. Podle fotografie na obr. 5 přichází materiál z pravé stravy a vlevo se tvoří briketa. Vlivem tření, vysokých teplot a tlaků dochází k největšímu opotřebení přední části šneku.

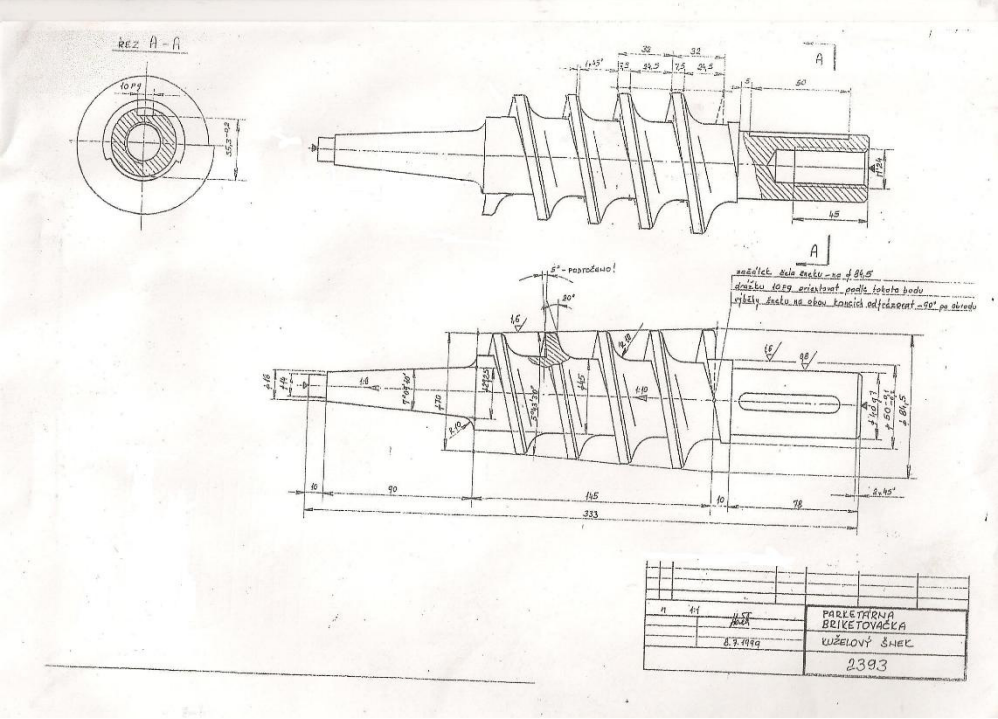
Obrázek 8: Briketa tvořící se v primární matrici [16]

Obrázek 9: Částečně slisovaný materiál[17]

Obrázek 10: Čelní pohled na tvořící se briketu [18]

2.4. Specifikace šneku dle stávající dokumentace

Primární zkoumaný šnek zajišťující vlastní lisovací proces má délku 333mm, kuželovitost těla 1:10, špičky pak 1:8. Do sekundárního šneku je upevněn pomocí válcovité části průměru 40g7, v němž je vyfrézovaná drážka 10P9 délky 50mm sloužící k uložení pera, které zajistí přenos kroutícího momentu. Ostatní rozměry lze nalézt ve výkresu níže.



Obrázek 11: Výkres zkoumaného šneku[19]

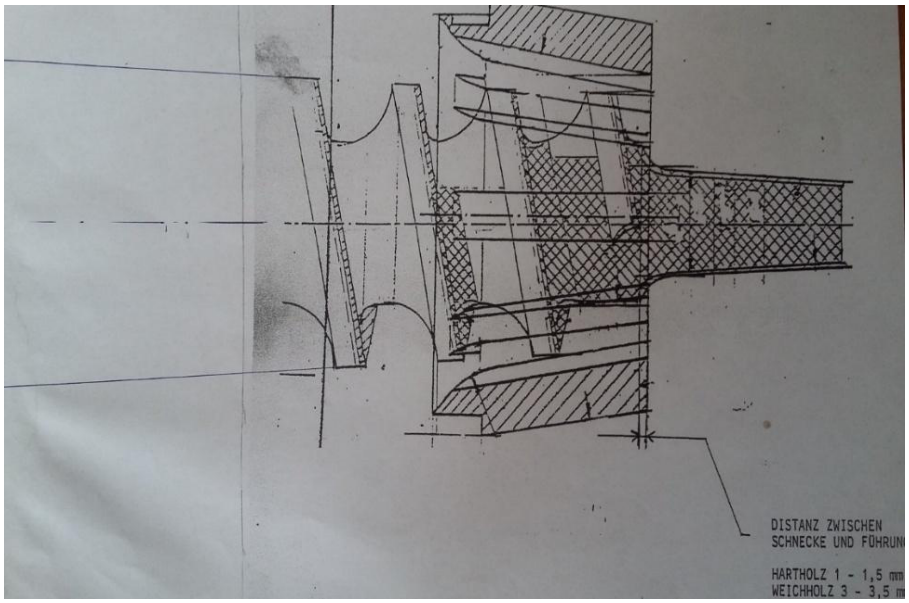
2.5. Úskalí nástroje a jeho opotřebení

Největší pozornost je třeba věnovat špičce a prvnímu závitu. Tyto plochy se nejvíce podílí na lisovacím procesu. Jsou tedy nejvíce namáhány na tlak, teplotu i otěr. Tlak je způsoben zmenšujícím se prostorem soustavy matric, kterým musí piliny při lisovacím procesu projít. Tření vzniká rotací šneku kolem své osy mezi přední částí šneku (špička a první závit) a tvořící se briketou. Soustava lisovacích matric je při výrobě předehřívána na teplotu kolem 180°C. Tento předehřev je nutný k vyloučení ligninu, který je nutný při lisování pilin, neboť slouží jako pojivo. Vedlejšími efekty je snížení zbytkové vlhkosti, která odchází středem brikety ve formě par. Vizuální efekt předehřevu je vytvoření lazury na povrchu brikety, což způsobuje snížení tření na mezi briketou a soustavou matric, které udělí briketě výsledný profil.

Lze jen velmi obtížně zjistit hodnotu teploty na povrchu špičky a prvního závitu při vlastním lisovacím procesu. Důvodem je to, že nástroj je zcela uzavřen a demontáž hubice s matricemi zabere určitý čas. Mezitím teplota klesne a hodnota by nebyla vypovídající. Na problematiku lze nahlédnout z dvou stran. Na straně jedné je teplota zvýšená z důvodu výše zmíněného předehřevu matric, na

straně druhé jsou při plynulém chodu stroje šnek i matrice chlazeny průchodem pilin. Lze tedy předpokládat, že teplota zcela jistě při normálním provozu nepřesáhne teplotu 200°C . Problém by napsal v okamžiku, kdy by došlo zastavení přísunu pilin. To by způsobilo prudký nárůst teploty a z konce brikety otírajícího se o špičku a čelo prvního závitu by se stalo silně abrazivní dřevěné uhlí. Tomuto stavu je tedy nutné předcházet a případně stroj kompletně vypnout.

K bezproblémovému průběhu lisování je nutné dodržet čelní a obvodovou mezeru mezi primárním šnekem a první kuželovou matricí (obr. 8). V případě přesáhnutí určité meze opotřebení prvního závitu a drážek matrice dojde k poklesu lisovacího tlaku a briketa neplní normu. V horším případě stroj zcela přestane fungovat. Stroj musí být vypnut, hubice s matricemi a topným tělesem demontována. Primární šnek, popřípadě celou soustavu, je nutné pomocí distančních kroužků posunout opět vpřed a příslušnou distanci. Tento proces však zabere určitý čas a tím snižuje výrobnost celého zařízení. Proto je snaha zvýšit trvanlivost nástroje a nežádoucí jevy v podobě opotřebení eliminovat.



Obrázek 12: Výkres odstupu šneku a matrice [20]

Existují určité signály, které nám i za chodu stroje sdělí, že se je nástroj opotřebený. Jedním z nich je například ucpávající se středová dutina v briketě. Tento jev je způsoben tenčící se špičkou. Další druhy opotřebení jsou patrná z níže přiložených fotografií. (obr. 9). Může dojít například

tenčení profilu závitu nebo špičky. V dalších snímcích je vidět drážka na náběžném kuželu, jejíž zvětšování muže vést až ulomení přední části nástroje.

Obrázek 13: Opotřebení nástroje- špička[21]

Obrázek 14: Opotřebení nástroje – drážka + závit [22]

Obrázek 15: Opotřebení nástroje - drážka [23]

2.6 Aktuálně používané technologie k renovaci

Firma se v současné době v rámci úspory nákladů snaží o renovaci šneků pomocí vlastních prostředků. Kombinuje navařování kritických částí nástroje elektrodami s vhodným složením nebo nanesení otěruvzdorného prášku pomocí acetylen-kyslíkového plamene. Přestože současné metody trvanlivost zvyšují, existuje několik důvodů, proč nadále hledat vhodnější technologii. Hlavní z nich je ten, že obě aktuálně používané metody jsou prováděny manuálně a přesnost rozměrů tak není zaručena.

2.6.1 Teorie obloukového svařování a nanesení vrstvy

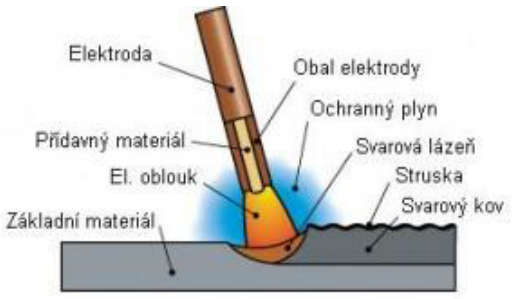
Technologie svařování obalenou elektrodou patří do skupiny svařování elektrickým obloukem. Jedná se o poměrně jednoduchou a rozšířenou metodou svařování, kdy lze velmi snadno volit parametry svařování, tak i jeho polohy. Svařovací proud = (I)[A] se nastaví podle údajů výrobce elektrod, které jsou většinou vedeny na obalu výrobku. Existují však určité empirické vztahy, z nichž lze vycházet při absenci údajů:

- elektrody s kyselým a rutilovým obalem: I(A) I = (40 až 55)*d
- elektrody s bazickým obalem I(A) I = (35 až 50)*d, kde d je průměr jádra elektrody;

Elektrický oblouk vzniká mezi základním materiálem a elektrodou, čímž vzniká teplo, které taví jak základní materiál, tak elektrodu s obalem. Rozkladem obalu vznikají plyny chránící kapku kovu směřující do svarové lázně. Látky obsažené v obalu elektrody jsou pak vyloučeny na povrchu

svaru ve formě strusky a zabraňují jeho oxidaci. Vzniklou strusku je pak nutno odstranit. Teplo vytvořené obloukem může dosahovat hodnoty až 6000°C.

Při vedení elektrického oblouku a elektrody je třeba postupovat tak, aby byla elektroda mírně skloněna proti svarové housence a roztavená struska nepředbíhala elektrický oblouk, v čehož by vznikaly vady svaru v podobě struskových vměstků ve svarovém kovu. Délka elektrického oblouku má být přibližně rovna průměru jádra elektrody. Zakončení svarové housenky musí být provedeno takovým způsobem, aby nedošlo vzniku staženiny v koncovém kráteru. Pro svářeče to znamená, že musí v koncovém kráteru se při odtavení svarového kovu provést ještě zatočení se s obloukem a odtavit ještě určité množství svarového kovu, aby bylo ještě z čeho dosazovat svarový kov a zabránit tak vzniku staženiny. [25]



Obrázek 16: Princip obloukového svařování[26]

V současnosti firma používá jako jednu z metod renovace navaření elektrodou OK Weartrode 62 2,5x350mm (dříve OK 84.84). Jedná se o návarovou elektrodu s vysokým podílem jemných karbidů. K nanesení vrstvy je potřeba teplo, které vnikne hořením elektrického oblouku mezi elektrodou a základním materiálem. Vzniklý povrch však není dostatečně hladký a je nutno ho přebrousit, což je vzhledem k množství obsažených karbidů velmi obtížné. Jiné technologie opracování jsou vzhledem k tvrdosti návaru nemožné. Rovněž firma nedisponuje speciální bruskou, která by opracovala návar do hodnot vycházejících ze základní geometrie šneku. To má v krajním případě za následek nefunkčnost lisu, což se opět projevuje na nárůstu ztrátového času zapříčiněného tím, že stroj se musí rozebrat, šnek opětovně přebrousit a stroj znovu sestavit.

Obrázek 17: Elektrody [27]

Další nevýhodou navaření elektrodou je to, že po vícenásobném navaření povrchu dochází k praskání a ulomení části závitu. To způsobí náhlé přerušení lisovacího procesu, stroj musí být okamžitě zastaven a nástroj demontován. V tu chvíli se nástroj stává bezcenným a musí být nahrazen jiným. Existuje rovněž podezření, že ulomení části závitu má za následek velká TOO materiálu při svařování.

2.6.2 Žárový nástřik plamenem s přetavením

Nástřik plamenem patří mezi nejstarší technologie v oblasti žárových nástřiků. Byl vynalezen roku 1917 švýcarským inženýrem Schoppem a jeho vlastnosti jsou ve srovnání s ostatními na velmi nízké úrovni. Tato technologie se v současné době využívá už jen zřídka a to zejména při aplikaci přetavených povlaků, jejichž výhodou je velmi nízká pórovitost a vysoká adhézní pevnost. Jako nevýhodu lze uvést tepelné ovlivnění součástí během nástřiku. Obecně lze konstatovat, že modernější metody žárových nástřiků dosahují lepších vlastností a tuto metodu překonávají. [28]

Metoda spočívá v natavení základního materiálu a tavení přídavného pomocí směsi plynů vytvářejících plamen. Přídavný materiál může být ve formě holého drátu nebo prášku. Plamen je tvořen plyny, z nichž jeden je hořlavý (zpravidla acetylen) a druhý podporuje hoření (většinou tedy kyslík). Proto bývá plamen často nazýván acetylen-kyslíkovým. Při správném mísícím poměru plynů teplota dosahuje až 3200°C.

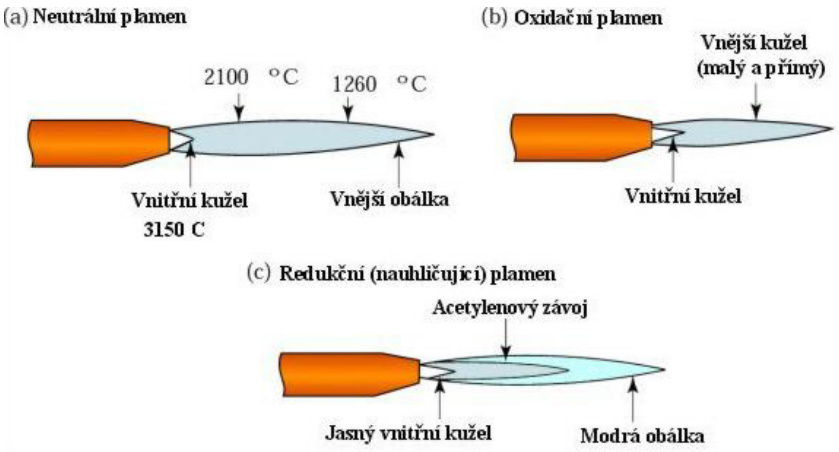
Podle poměru mísení plynů lze rozdělit plamen na neutrální, oxidační a redukční. Dle výtokové rychlosti rozeznáváme plamen měkký, střední nebo ostrý. Měkký má výstupní rychlost 70-100 m/s, je nestabilní a náchylný ke zpětnému šlehnutí. Používá se zřídka a to pro svařování Pb, Zn a jejich slitin. Střední plamem se vyznačuje výstupní rychlostí 100-120 m/s, je stabilní a zaručuje

dobrou jakost svaru, používá se ke svařování ocelí. Ostrý plamen má výstupní rychlost přes 120 m/s, víří svarovou lázeň a zvětšuje TOO. Výkon svařování je vyšší na úkor kvality svaru. [29]

Hořlavé plyny a jejich vybrané vlastnosti

vlastnosti plynu	acetylen	vodík	propan	metyl-acetylen-propadien	etylen (eten)	propylen	Zemní plyn
chem. vzorec	C_2H_2	H_2	C_3H_8	MAPP, TETREN, APACHI C_3H_4	C_2H_4	C_3H_6	CH_4
způsob skladování	rozpuštěný v acetonu	Stlačený	kapalný	kapalný	stlačený (kapalný)	kondenzo vaný	Stlačený
Výhřevnost (MJ/m^{-3})	56,5	10,8	93,2	82,2	53,9	87,6	35,9
meze výbušnosti se vzduchem(%)	2,2-85,0	4,0-74,5	2,2-95,5	1,7-12,0	3,1-32,0	2,0-10,5	5,0-15,0

Tabulka 2 : Hořlavé plyny a jejich vlastnosti [30]



Obrázek 18: Druhy plamene [30]

Další metodou renovace, kterou firma momentálně praktikuje, je nanášení prášku pomocí výše uvedené metody. Volba mezi navařením elektrodou a touto metodou závisí na stupni opotřebení. Pro větší stupně se hodí spíše metoda návaru elektrodou, pro nižší stupně opotřebení právě metoda pomocí plamene. Kovový karbidový prášek je nanášen na poklad zahřátý na cca 800°C. Při pozvolném otevírání ventilu zajišťujícího přívod prášku do hořáku dochází k jeho unášení proudem plynu. Natavený prášek pak dopadá na natavený materiál. Tím dojde k dokonalému propojení obou materiálu a vznikne tak plně hustý povlak, který se vyznačuje se vysokou odolností vůči abrazi, korozi a oxidaci. Výsledný povrch je při dodržení technologických podmínek přiměřeně hladký a kopíruje rovnoměrně tvar součásti.

Obrázek 19: Renovace plamenem [19]

Vzhledem k tomu, že obě momentálně využívané metody jsou prováděny ručně, je potřeba renovovaný povrch brousit do požadovaného tvaru. U metody pomocí plamene jsou sice úběry mnohonásobně menší, neboť metoda je přesnější. Vzhledem k tomu, že funkčnost stroje je náchylná na geometrii a pozici šneku vůči matrici, je finální broušení nezbytné.

Cílem této práce je tedy návrh otěruvzdorného a tepelně stabilního nástřiku/návaru na kritické plochy, který by byl proveden pomocí strojního zařízení tak, aby již nemusel být broušen do požadovaného tvaru. Základem je definování kritických míst nástroje a volba optimálního druhu nástřiku. Samozřejmostí i nadále zůstává požadavek na co nejdelší trvanlivost zajišťující snížení ztrátových časů. Dále pak životnost nástroje, resp. možnosti jeho renovace. V současnosti je šnek opravován pomocí jedné z výše uvedených metod vždy po odpracování jedné směny. To odpovídá vyrobenému množství přibližně 2500 – 3000 kg briket.

2.7. Další možnosti renovace nástroje.

Materiál odebraný otěrem musí být pro uvedení nástroje do původního stavu navrácen zpět. Tento aditivní děj probíhající za tepla lze nazvat termickým nástřikem.

Termické nástřiky (= žárové nástřiky) vytváří na povrchu povlakované součásti z natavených nebo částečně natavených částic o velikosti 0,05 - 100 μm široké spektrum kovových, keramických i kompozitních povlaků, z nichž některé mají velmi dobrou odolnost proti abrazivnímu a erozivnímu opotřebení. Jejich vlastnosti závisí jak na složení povlaku, technologii nástřiku a na přípravě povrchů před aplikací nástřiku.

Výhody: - široký výběr materiálů (kovy, keramické materiály, cermety a karbidy)
- možnost vytvářet i relativně tlusté povlaky z různých druhů materiálů
- vysoká rychlost renovace s nízkými náklady
- povlaky jsou dobře mechanicky ukotveny k základnímu materiálu
- součásti není potřeba tepelně zpracovávat a to jak před, tak i po nanesení
- nízké deformace součástí
- možnost ručního i automatizovaného nanášení

Nevýhody: - častý výskyt pórovitosti
- nízké využití materiálu nástřiku
- poměrně nízká pevnost rozhraní nástřik – podklad
- lamelární struktura a vznik trhlin v důsledku tepelných pnutí, zvláště u tlustších povlaků

V současnosti existuje řada různých technologií vytváření nástřiku:

- nástřik plamenem
- detonační nástřik
- HVOF (High Velocity Oxyfuel) nástřik práškem
- plazmatický nástřik
- nástřik elektrickým obloukem

Nástřik plamenem

Tento druh využívá stlačený vzduch nebo kyslík společně s palivem (acetylen, propylen, propan, vodík). Nanášený materiál ve formě prášku nebo drátu je přiváděn do plamene, vzniklého hořením této směsi, kde dojde k jeho natavení a urychlení směrem k povlakované součásti. Obecně tento proces vytváří povlaky o nižší kvalitě, které nejsou využívány pro aplikace, u kterých je potřeba povlak s vysokou hustotou a přilnavostí. Hlavním důvodem těchto nedostatků je nízká dopadová rychlost částic a nízká teplota plamene. [28] [31]

Detonační nátřik

Detonační nástřik, jak již název napovídá, využívá k urychlení prášku detonační vlnu. Celý proces funguje tak, že se spalovací komora se zaplní kyslíkem, acetylénem a vhodným práškovým materiálem. Po zapálení směsi elektrickou jiskrou nastane detonace, při které se v spalovací komoře dosahují teploty až 3 000° C. Částice přídavného materiálu s rychlostí až 800 m.s-1 vylétávají z ústí komory a dopadají na povrch povlakované součásti. S určitým zpožděním je do spalovací komory přiveden dusík, který ukončí spalovací proces a připraví pracovní proces pro další cyklus. Vysoká kinetická energie částic zajišťuje dobrou přilnavost povlaku a jeho nízkou porositu ($<$ 1%). Nevýhodou povlakovacího zařízení je hluk (až 140dB) a nezbytnost odsávat pracovní prostor. Povlakovací proces probíhá s kadencí 3 - 5 zážehů za sekundu. [28] [31]

Vysokorychlostní nástřik plamenem

HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) je metoda vyvinutá z detonačního povlakování s tím rozdílem, že plnění spalovací komory a hoření plynů probíhá kontinuálně. Je založena na speciální konstrukci hořáku, kde dochází k hoření směsi kyslík - palivo (kerosin, propylen, propan, acetylen, vodík atd.). Produkty hoření jsou urychlovány v konvergentně-divergentní trysce až na supersonické hodnoty. Materiál ve formě prášku je za pomoci nosného plynu přiváděn do supersonického plamene, kde dojde k jeho natavení a výraznému urychlení směrem k povlakované součásti. Vysoká rychlost částic prášku při dopadu způsobí dokonalé rozprostření a zakotvení částic k podkladu a proto HVOF povlaky mají vysokou hustotu a dobrou adhezi. Relativně nízká teplota plamene (ve srovnání s plazmatickým nástřikem) zabraňuje oxidaci, fázovým přeměnám a vyhořívání některých prvků nanášeného materiálu v průběhu nástřiku. Zajímavou vlastností HVOF technologie je možnost vytvářet při vhodné volbě depozičních parametrů povlaky s tlakovým pnutím. Tlakové pnutí v povlaku je totiž příznivé jak pro únavové vlastnosti povlakovaných součástí, tak pro vytváření otěruvzdorných povlaků s velkou tloušťkou. Typickými přídavnými materiály jsou prášky z cermetů na bázi karbidů wolframu, chrómu a titanu. [28] [31]

Plazmatický nástřik

I přes řadu modifikací se praxi nejčastěji využívá stejnosměrný, anizotermický, plazmatický nástřik. Základem je hořák s chlazenou wolframovou katodou a válcovou měděnou anodou, mezi nimiž hoří elektrický oblouk a ve kterém je ionizován plyn (argon, vodík, dusík) za vzniku plazmatického prostředí do kterého je radiálně nebo axiálně radiálně podáván přídavný materiál ve formě prášku. Ten je v prostředí plazmatu roztaven a v proudu plynů urychlen směrem k povrchu základního materiálu. Do něj se pomocí nosného plynu přivádí nanášený materiál ve formě prášku. Díky vysoké teplotě plazmatu je možné nanášet všechny druhy materiálů od čistých kovů až po těžce tavitelné materiály (např. keramické). Pro dosažení vysoké hustoty, přilnavosti a čistoty povlaků je možné provádět plazmatický nástřik v uzavřené komoře za sníženého tlaku (obvykle 0,005-0,02 MPa), tzv. VPS (vacuum plasma spraying) nebo LPPS (low pressure plasma spraying). [28] [31]

Základní typy plazmatického nástřiku lze rozdělit následovně:

- atmosférický plazmatický nástřik (APS)
- plazmatický nástřik za sníženého tlaku (LPPS)
- plazmatický nástřik ve vakuu (VPS)
- vodou stabilizovaný plazmatický nástřik (WSP)
- hybridní plazmatický nástřik (WSP-H),
- podvodní plazmatický nástřik (UPS
- radiofrekvenční plazmatický nástřik (RFPS).

Obecnými vlastnostmi jsou vysoké teploty korony plazmatu 12 000 – 25 000 °C a rychlost částic dopadajících částic 60 – 400 m/s. To umožňuje přípravu vysoce variabilních funkčních povlaků o tloušťkách od 0,05 – 3 mm s porozitou 2 – 8 % a adhezí 20 – 70 MPa. [28] [31]

Nástřik elektrickým obloukem

Oproti plynným technologiím využívá tato technologie elektrického oblouku, který hoří mezi dvěma dráty a vytváří tak roztavené částice přídavného materiálu, které jsou za pomoci stlačeného vzduchu urychlovány směrem k povrchu základního materiálu (obr. 5). Přídavný materiál je tak limitován pouze na elektricky vodivé dráty či plněné tyčinky, mezi nimiž vzájemně je možné vytvořit elektrický oblouk. Teplota oblouku se pak pohybuje mezi 3 800 – 4 000 °C. Dopadová rychlost roztavených částic je 100 – 240 m/s a tloušťka povlaku se běžně pohybuje mezi 0,1 – 15 mm. V kombinaci vysokého tlaku stlačeného vzduchu a nízké dopadové rychlosti částic se pohybuje porozita povlaku mezi 2 – 8 %. [28] [31]

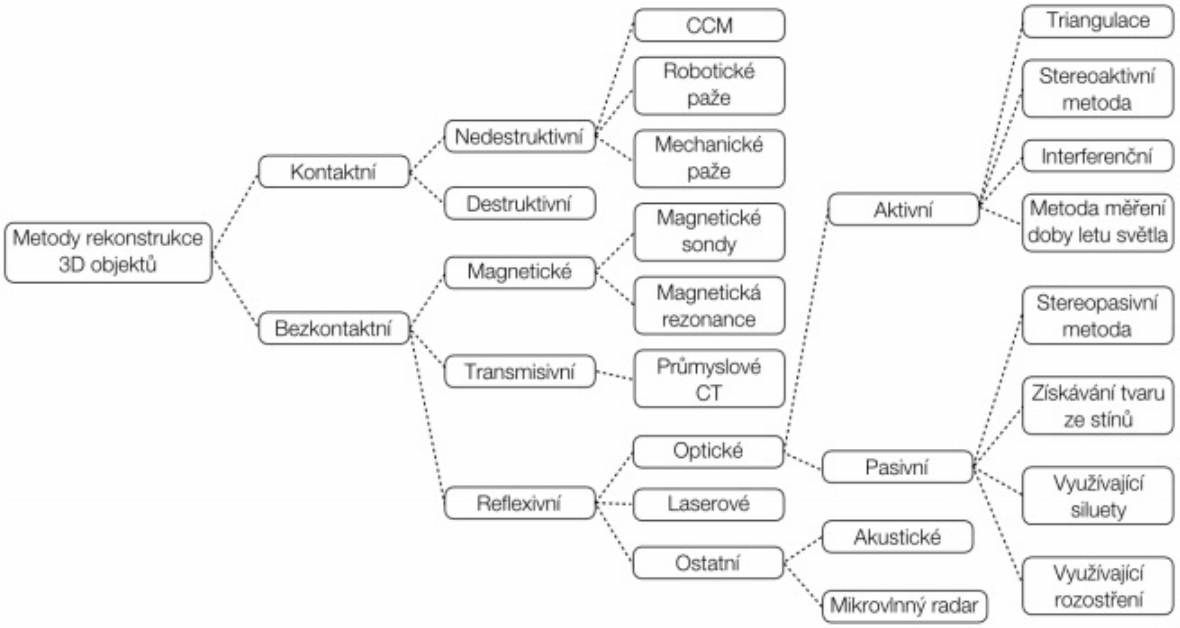
Technol. nástřiku	Forma příd.mat	Teplota zdroje[°C]	Rychlost částic [m/s]	Přilnavost-adheze [MPa]	Typické stříkané materiály	Vlastnosti povlaku	Vhodné aplikace
HVOF	prášek	2800-5200	200-1200	60-90	Kovy,slitiny, cermety	Vyšší hustota,výborná adheze,tlak. pnutí	Ochrana proti opotřebení, korozi
El. oblouk	drát	400-8000	50-300	10-40	Kovy,slitiny, cermety	Větší tloušťka, vyská hustota	Otěruvzdorné povlaky,renovace
plazma	prášek	1200-20000	100-800	+-68	keramika	Porézní u keramiky	izolátory
plamen	Prášek/drát	2700-3200	50-100	7-18	Kovy,slitiny, plasty	Vyšší porezita a obsah oxidů	Méně náročné aplikace

Tabulka 3 : Srovnání metod žárových nástřiků [28]

2.8. Možnosti měření opotřebení tvarově složitých dílů.

Na trhu existuje celá řada měřidel, pomocí nichž lze měřit velikost, tvar a další požadované vlastnosti výrobků. Měřidla lze rozdělit podle toho, jaké parametry je třeba kontrolovat. Měřidla pracující s jednou osou (posuvná měřítka, mikrometry…), se dvěma osami (dílenské mikroskopy, profilprojektory…) a se třemi osami. Ty se obecně nazývají 3D skenery. Hlavní výhodou těchto strojů

celkové změření komplikovaných součástí a následná možnost porovnání s výchozím stavem, popř. modelem. 3D skenery se tedy uplatňují tam, kde je velká četnost výskytu obecných tvarových ploch.



Obrázek 20: Rekonstrukce 3D objektů [32]

2.8.1. 3D skenování

3D skenování již dávno není jen nová technologie na získávání dat. Postupem času se dynamicky rozvíjí jako ostatní moderní elektronické technologie a dostává se do podvědomí stá většího počtu lidí pracujících v oblasti konstrukce a kontroly. Tato technologie umožňuje provádět uživatelům práce, které byly často zdlouhavé a tím pádem i finančně neefektivní nebo práce, které klasické technologie neumožňovaly. Technologie 3D se tedy stále častěji uplatňuje díky své velké úspoře času a tam, kde to nebylo dříve možné. Pomocí 3D skenerů lze dnes skenovat objekty všech tvarů, velikostí a barev. [32] [33]

Všeobecně jsou 3D skenery zařízení, která jsou určena pro digitalizaci různých 3D objektů. Po digitalizaci objektu získáme v počítači 3D model, který můžeme dále upravovat v různých programech (např. pro reverzní inženýrství, kontrolu). Výsledný datový model je zpracován s vysokou přesností a může se tak stát základem pro 3D tisk nebo i klasickou výrobu na CNC centrech. [32] [33]

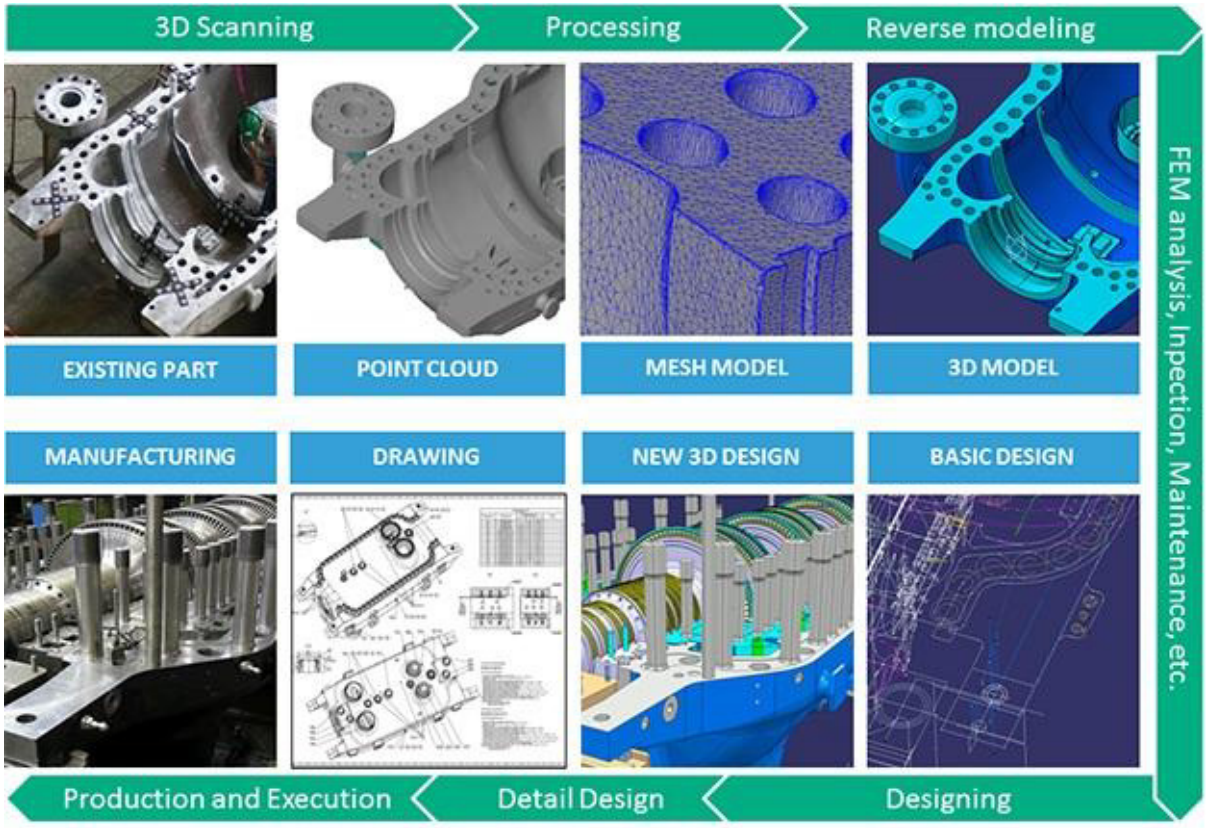
Základem je si uvědomit, pro jaký účel získávaná data využíváme. Jde-li o oblast kontroly, zajímáme se například pouze o určitou oblast a postačí nám sběr dat kontaktně. Pokud se jedná o reverzní inženýrství a je třeba vytvoření 3D modelu, pak je v závislosti na komplikovanosti tvaru vhodné využít metod bezkontaktního měření s patřičnou přesností. Skenery tedy mohou dle výše zmíněného rozděleny následovně:

- **Dotykové skenery (CMM)**
  Vhodné pro kontrolu či zachycení geometrických prvků. Pomocí tohoto zařízení lze i bodově kontrolovat náročnější tvary. Nezachycuje tvar celé součásti. Obsluha proměřuje / zachycuje pouze určená místa.
- **Bezkontaktní laserové skenery**
  Ideální zařízení pro komplexní kontrolu součástí s vysokou přesností. Pomocí těchto zařízení lze snímat celé tvary i pro reverzní inženýrství.
- **Optické skenery**
  Velmi rychlé skenování s texturou. Skenery nedosahují stejně vysoké přesnosti jako laserové, ale při nižších nárocích na přesnost ušetří mnoho času a urychlí celý proces. [32] [33]

Hlavní oblasti využití laserového 3D skenování

- Digitalizace dílů a jejich převod do CAD - získáte 3D data v jednom z podporovaných formátů, jako je *.STL, *.OBJ nebo *.WRL.
- Jednoduchá kontrola rozměrů a tvarů reálných dílů oproti CAD modelům - zjistíte jak přesný je 3D výtisk nebo odlitek oproti originálnímu CAD modelu. Laserové skenování je ideální pro komplexní kontrolu součástí s vysokou přesností.
- Reverzní inženýrství součástí - umožní získat věrnou kopii dílu, ke kterému není dokumentace nebo CAD model. Pomocí těchto zařízení lze snímat celé tvary pro reverzní inženýrství.

- Vstupní data pro 3D tisk, nebo podklad pro další modelování designu. [32] [33]



Obrázek 21: Rekonstrukce objektů pomocí 3D skenování [34]

Princip 3D laserového skenování

3D laserové skenování je technologie, při níž je fyzický tvar objektu převeden na digitální pomocí triangulace. Obecně existují dva základní typy laserových skenerů: ruční skenery a skenery používající referenci.

Laserová triangulace je stereoskopická technika, kde je vzdálenost objektu vypočtena pomocí rozkmitávaného laserového paprsku a kamer. Laserový paprsek je promítán na povrch snímaného tělesa, kde jej snímají kamery. Kamery jsou umístěny ve známé poloze vůči skeneru a lze pomocí trigonometrie vypočítat 3D prostorové (XYZ) souřadnice bodů povrchu. Kamery zaznamenávají průměty laseru na povrch a digitalizují všechny body z laserové čáry.

2.8.2 Fotogrametrie

Fotogrammetrie (někdy též **SFM** – Structure From Motion) je proces, který vypočítává umístění bodu v trojrozměrném prostoru použitím fotografií objektu zachyceného z více úhlů pomocí fotoaparátu či videokamery. V podstatě jde o to, že ze všech možných úhlů je pořízena sada fotografií konkrétního objektu, které jsou následně nahrány do specializovaného programu. Ten pak hledá společné prvky na všech fotografiích a snaží se s pomocí nich vypočítat, z jakého úhlu byl na dané fotografii předmět pořízen. S informací o pozici a úhlu kamery pak dokáže software vytvořit bod ve 3D prostoru, který odpovídá prvku na 2D fotografii. V ideálním případě by měl být výsledkem bezchybný trojrozměrný model. Aby bylo možné dosáhnout co nejlepších výsledků, je potřeba vše ručně doladit. [35]

2.8.3. Princip srovnání 3D naskenovaných objektů

Pokud chceme zajistit relevantní srovnání dvou skenů, popř. skenu a 3D modelu, je nutné založit správně koordinátní systém, pomocí nějž dojde k uložení obou přes sebe. Princip se samozřejmě liší v závislosti na daném softwaru. Většinou je nutné vybrat plochy, které nepodléhají opotřebení, jež by způsobily nepřesnost v měření. Koordinátní systém musí být definován tak, aby byly modelu/skenu odebrány všechny stupně volnosti, tzn. pohyby v osách X,Y,Z a rotace. Další možnost je pomocí funkce best fit, popř. local best fit.

3. Návrh experimentu a jeho realizace

Jak bylo popsáno výše, prvním krokem je zjištění, které strojní zařízení je schopno nanést prášek na kritické plochy. Pokud by se jednalo pouze o válcovou plochu, bylo možné nástroj upnout do přípravku mezi hroty, do sklíčidla nebo jiným způsobem. Dále by musel být zajištěn pohyb nástroje vůči přesně ustavenému hořáku nebo jiné hlavě, pomocí nichž by byl prášek aplikován. Vzhledem k malé sériovosti by stavba takového jednoúčelového zařízení nebyla ekonomicky výhodná. Po uvážení všech faktorů, především však komplikovanosti plochy, která by měla být nástřikem opatřena, je ideálním zařízením pro tuto aplikaci robotická ruka.

Jednou z možných technologií, jak zlepšit odolnost proti opotřebení, je depozice tvrdých vrstev za pomoci laseru. Použití laserů s vysokým výkonem pro navařování (tzv. laserové obložení=laser cladding) v posledním desetiletí zaznamenalo velký progres a tím pádem si zajistilo velkou pozornost jako alternativa k jiným standardnějším metodám žárových nástřiků nebo navařování, které byly popsány výše.

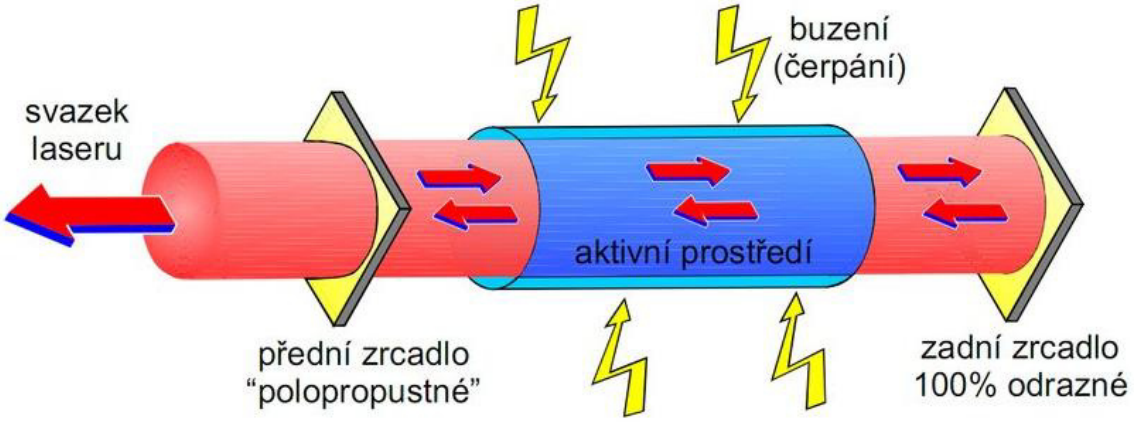
Po průzkumu trhu a konzultaci s vedoucím DP bylo doporučeno NTC při ZČU, které se mimo jiné zabývá podobnými aplikacemi.

3.1. Laser-princip rozdělení a oblast využití

Slovo LASER je zkratka složená z počátečních písmen anglických slov: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Z překladu prvního slova je zřejmé, že laser produkuje světlo. Jedná se tedy o světlo zesílené stimulovanou (vynucenou) emisí záření. První funkční LASER sestrojil americký vědec Theodore Maiman v roce 1960, k představení došlo v červenci téhož roku. Objev laseru tedy řadíme k vynálezům 20. století. Laser je velmi hojně využíván v řadě odvětví díky svým významným vlastnostem. Paprsek laseru je:

1. Kolimovaný (= nerozbíhá se)
2. Monochromatický (= generované fotony mají stejnou vlnovou délku, světlo je jednobarevné)
3. Koherentní (generované fotony jsou tzv. ve fázi jak časové tak prostorové)

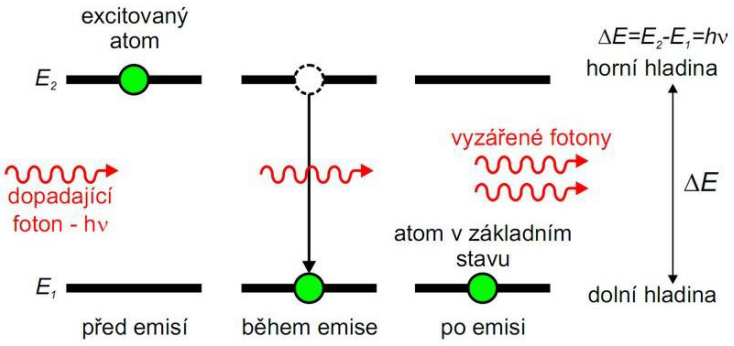
Základem laseru je aktivní prostředí, které je nějakým způsobem buzeno (opticky, elektricky apod.). Buzením dodáváme do laseru energii, která je potom právě pomocí procesu stimulované emise vyzářena v podobě laserového svazku. K tomu je zapotřebí ještě vytvořit tzv. optický rezonátor, který je nejčastěji tvořen odraznými zrcadly. [36] [37]



Obrázek 22: Laser [36]

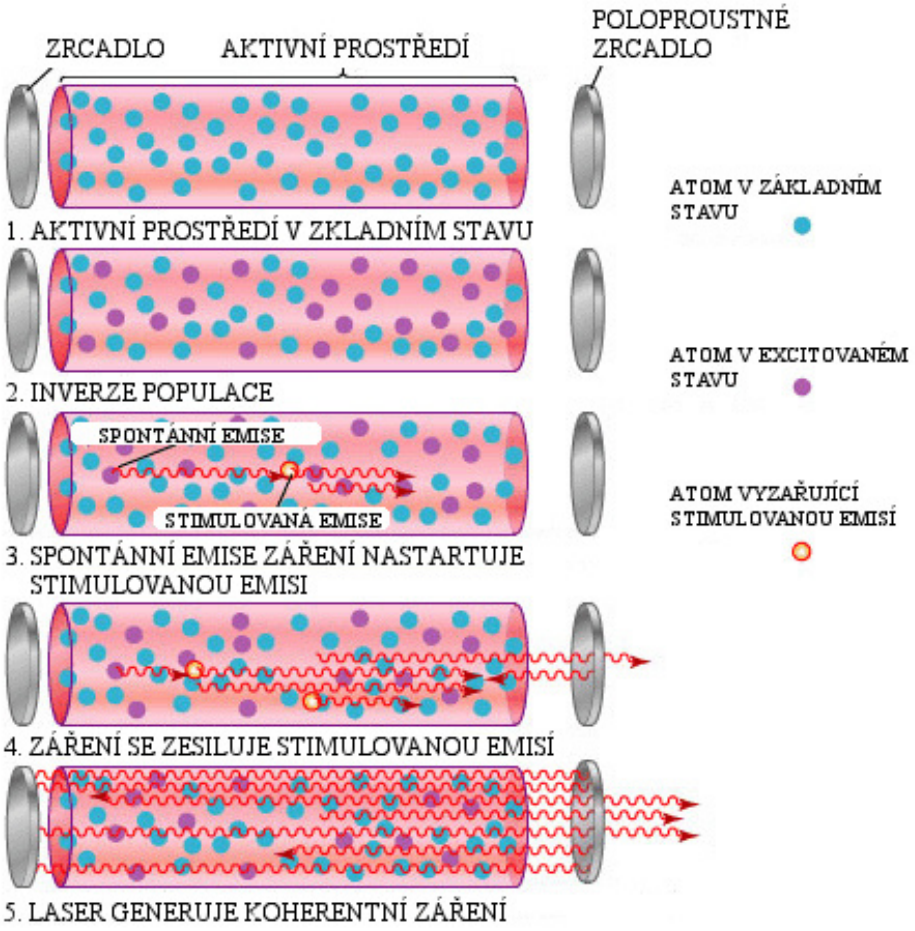
Aktivní prostředí vždy obsahuje element, který se může nacházet v základním stavu s nižší energií nebo v excitovaném (vybuzeném) stavu s vyšší energií. Tímto elementem je nejčastěji atom. Důležité je, že při přechodu z vyššího do nižšího energetického stavu tento element vyzáří foton (kvantum elektromagnetického záření). Tento zářivý přechod se děje spontánně sám od sebe a prostředí má vždy snahu být ve stavu termodynamické rovnováhy - tedy stavu s co nejnižší energií. Právě díky buzení tento stav porušíme a převedeme aktivní prostředí do excitovaného stavu, kdy je většina našich elementů ve stavu s vyšší energií (tento stav se nazývá inverze populace).

Teprve nyní lze energii dodanou aktivnímu prostředí přeměnit na laserový svazek (proud fotonů) pomocí procesu stimulované emise, který je zobrazen na obrázku níže. Jedná se v podstatě o lavinovitý efekt, kdy nám foton dopadající na excitovaný atom způsobí (stimuluje) jeho přechod z horní na dolní energetickou hladinu a při tom dojde k emisi dalšího fotonu. [36] [37]



Obrázek 23: Vznik energie pomocí emise [36]

Při pohybu fotonů rezonátorem mezi zrcadly narůstá strmě jejich počet, dochází k lavinovému efektu a následnému uvolnění energie proudem fotonů v podobě laserového svazku.



Obrázek 24: Vznik paprsku [36]

Základní dělení laserů dle aktivního prostředí.

Plynové lasery - aktivním prostředím je plyn buzený elektricky, radio-frekvenčními vlnami, opticky
- nejčastěji HeNe (helium neonový) a CO_2 laser

Pevnolátkové lasery - aktivním prostředím je pevná látka (monokrystal) buzená výbojkami nebo laserovými diodami
- představitelem je **Nd:YAG** (monokrystal ytrium aluminium granátu dopovaného atomy neodymu)

Vláknové lasery - Speciální typ pevnolátkových laserů, kde aktivní prostředí tvoří optické vlákno dopované nejčastěji atomy erbia (Er) nebo yterbia (Yr). Buzení je pomocí laserových diod, jejich záření je do aktivního vlákna přivedeno opět optickým vláknem. Jedná se o tzv. vlákno-vlákno architekturu a laser díky tomu neobsahuje žádné opto-mechanické prvky jako zrcadla apod. Výkony dnes dosahují až 40kW. V dnešní době se jedná o nejmodernější technologii pro průmyslové řezání, svařování a značení a podíl vláknových laseru na trhu neustále stoupá.

Ostatní - polovodičové, chemické a excimer lasery

3.2. Princip laserového povlakování LASER CLADDING

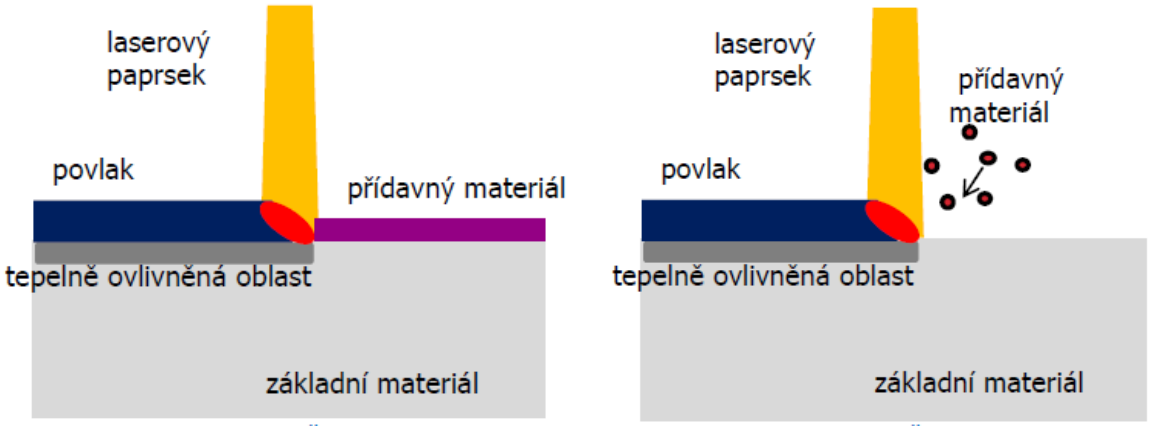
Laserové povlakování (=laser cladding) je technika, která umožňuje nanesení ochranných vrstev na plochy součástí, které jsou vystaveny opotřebení. Tento proces lze popsat jako přidání materiálu daného složení a vlastností na povrch dílu (substrátu) pomocí laserového paprsku, který je zde zdrojem tepla. Jeho působením je částečně nataven základní i přídavný materiál, jehož ztuhnutím vzniká návar na povrchu. Výsledná tloušťka vrstvy se může pohybovat od 0.050 mm do 2 mm. Pokud je zapotřebí silnější vrstvy, lze celý proces opakovat. Laserové povlakování může být plně automatizováno, a jakmile jsou parametry odladěny pro určitou součást, je dosaženo stejných výsledků i pro ostatní díly v případě opakující se výroby. Metoda se vyznačuje malou přechodovou vrstvou s nízkým stupněm promísení (<5%). [40]

Výhody procesu

- Přídavný materiál lze umístit přesně tam, kde je to žádoucí.
- Existuje velmi široký výběr různých materiálů.
- Minimální tepelný příkon způsobí pouze úzkou TOO.
- Snadná automatizace a integrace do prostředí CAD/CAM a CNC.
- Depozity jsou plně roztaveny na substrát s malou nebo žádnou pórovitostí.
- Relativní přesnost metody snižuje potřebu dodatečného obrábění.

Možnosti přivedení přídavného materiálu:

- **nátěrem nebo pastou** (časově náročné, méně využívané)
- **přidáním drátu do lázně** (obtížné, velký poměr ředění se základním materiálem)
- **vstřikováním prášku k laserovému paprsku** (hustá vrstva, minimální příprava povrchu a možnost aplikace i na tvarově složité součásti) [38][39]

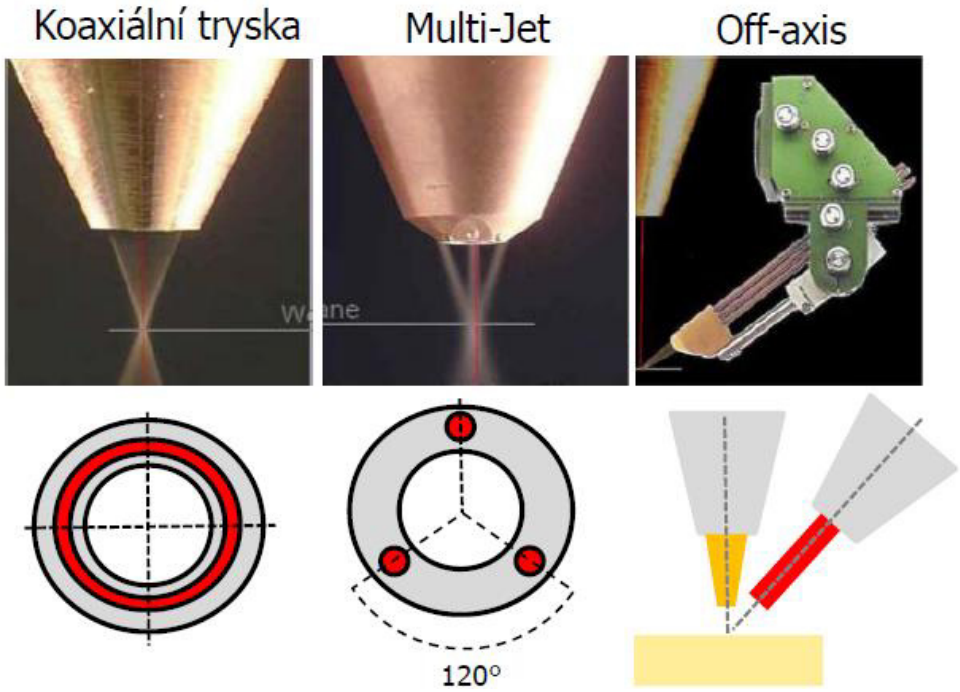


Obrázek 25: Laserové obložení[39]

Vzhledem vlastnostem k jednotlivých druhů technologie laserového povlakování, zejména aplikaci na tvarově složité součásti, byla vybrána varianta vstřikování prášku k laserovému paprsku.

Vstřikování prášku k laserovému paprsku

U této metody je využito plynu jako nosného média přídavného materiálu ve formě prášku. Ten je foukán pod laserový paprsek, který na povrchu substrátu vytváří tavnou lázeň. V zásadě existují tři různé konstrukce nanášecích trysek: **koaxiální, multi-jet a off axis**



Obrázek 26:Druhy trysek [39]

Pokud je přiveden prášek pomocí koaxiální trysky, leží nanesený substrát v rovině kolmé na laserový paprsek. Proces obložení tedy není závislý na směru pohybu součásti. Tato výhoda koaxiálního laserového obložení se používá při vytváření kovových prototypů z 3D modelů.

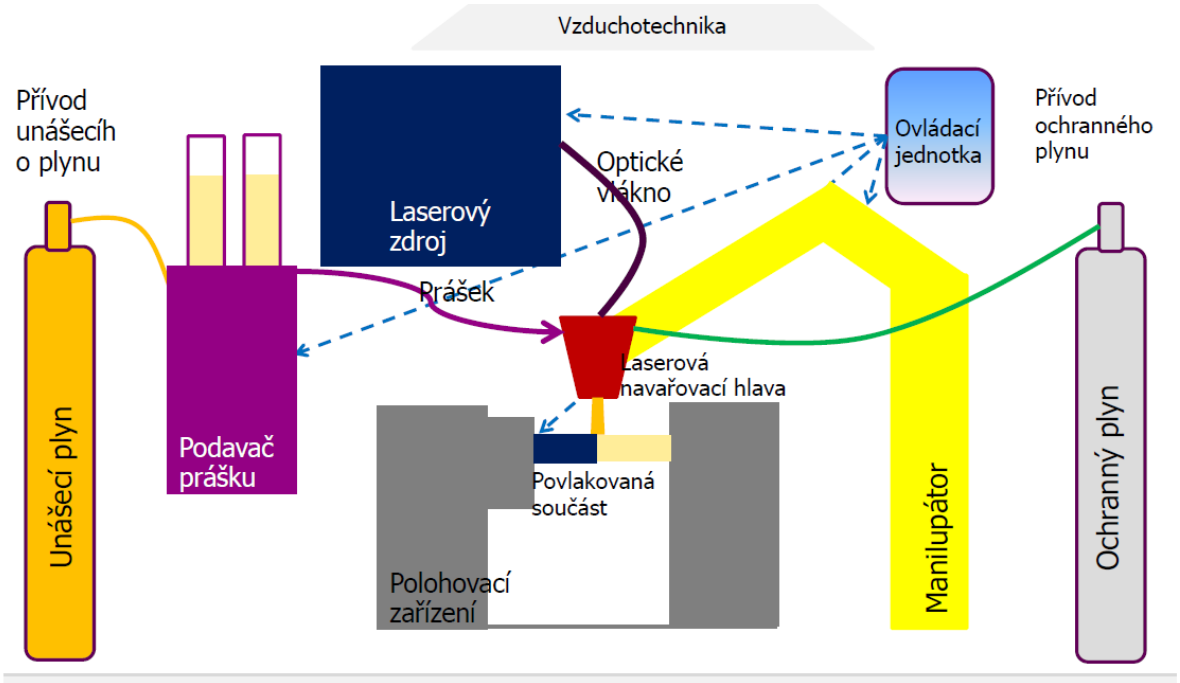
Obecně se při operaci definují parametry jako je výkon laseru **P[W]**, rychlost skenování **S [cm/s]** a rychlost podávání prášku **F[g/min]** a průměr laserového svazku **D [mm]**. Existuje však více procesních parametrů jako je distribuce energie laserového paprsku, množství a druh ochranného nosného plynu, velikost, rychlost a směr podávání práškových částic atd. Kompletní popis technologie laserového povlakování se vstřikováním prášku do laserové taveniny je poměrně složitý, protože existuje mnoho interakcí (paprsek / prášek; paprsek / substrát; proud prášku / tavenina atd.) a fyzikální jevů (přenos hmoty, proudění tekutiny, fáze transformace atd.).

Z praktického hlediska je vhodné zavést dva základní parametry:

- **parametr P / S** , který charakterizuje - množství dodané energie na jednotku délky laserové dráhy
- **parametr F / S** ,který odpovídá množství nového materiál dodaného na jednotku délky laserové dráhy

Popis zařízení pro laserové navařování

Schematicky je zařízení pro povlakování laserem popsáno na obrázku 27. Jak je vidět, je za potřebí zdroje laserového paprsku. Ten je pomocí optického vlákna přiváděn do laserové navařovací hlavy. Dále je nutné zajistit pohyb součásti. Existuje více variant polohovacích zařízení pro určité aplikace. Může se jednat o křížový stůl, který slouží pro rovinné obložení. Pokud je nutné opatřit plochy rotační, využívá se sklíčidla a koníku, resp. soustruhu. V kombinaci s manipulátorem v podobě robotické ruky je pak zařízení schopno aplikace prášku na obecné tvarové plochy. Dále je za potřebí zásobník obsahující prášek, který je unášen plynem. Rovněž je nutné chránit svarovou lázeň. K tomu slouží inertní plyn. Celé zařízení je pak řídící jednotkou robota.



Obrázek 27: Schéma zařízení laserového povlakování [39]

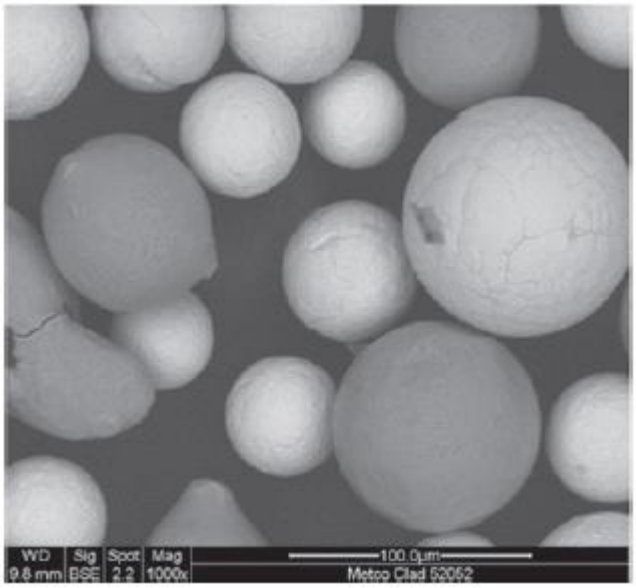
3.2. Volba prášku a podmínek

Na základě zkušeností pracovníků NTC ZČU, odborných článků a průzkumu trhu byl pro opláštění použit práškový materiál od firmy Oerlicon Metco, označený jako MetcoClad 52052. Prášek se skládá z 60 hm. % sférických částic karbidu wolframu WC smíchaných se 40 hm. % matrice. Matrice je slitina na bázi niklu. Přesné složení udává tabulka parametrů na obr. 28 od firmy Oerlikon uvedená níže.

Product	Weight Percent (typical)								
	Hard Phase 60 %			Metal Matrix 40 %					
	W	C	Fe	Ni	Cr	Si	B	Fe	C
MetcoClad 52052	Balance	3.8	< 0.3	Balance	6.8 – 8.3	3.1 – 3.9	1.4 – 1.9	1.7 – 3.3	0.1 – 0.4

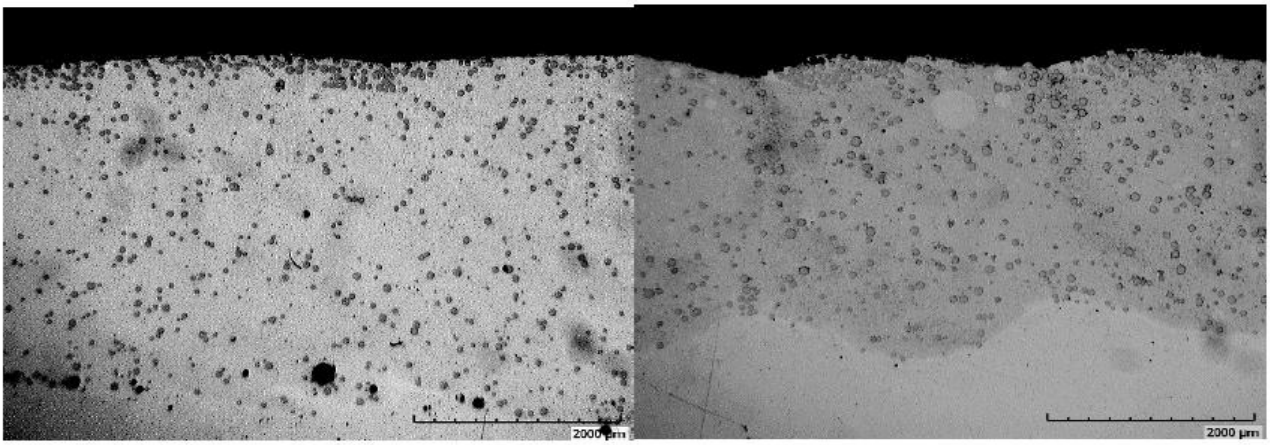
Obrázek 28: Složení prášku MetcoClad 52052 [40]

Rozmístění velikosti částic leží mezi 45-106 µm. WC bylo vyrobeny jedinečným způsobem, což má za následek nikoliv jehlicovitý, ale kulovitý tvar s vyšší tvrdostí než konvenčně tavené a rozdrcené WC. Laserové navaření bylo realizováno pevnolátkovým diskovým laserem TruDisc 8002 od firmy Trumpf a povlakovací hlavou YC520 od firmy Precitec vybavenou čtyřcestnou koaxiální tryskou.



Obrázek 29: Morfologie prášku MetcoClad 52052 [41]

Část povlaku byla aplikována na ocelovou desku stejného materiálu, aby bylo možné provést metalografický rozbor a vyhodnotit tak mikrostrukturu povlaku. Ta byla provedena na broušených a leštěných vzorcích optickým mikroskopem Nikon Epiphot 200 a digitálním optickým 3D mikroskopem.



Obrázek 30: Mikrostruktura rozhraní substrát-povlak [40]

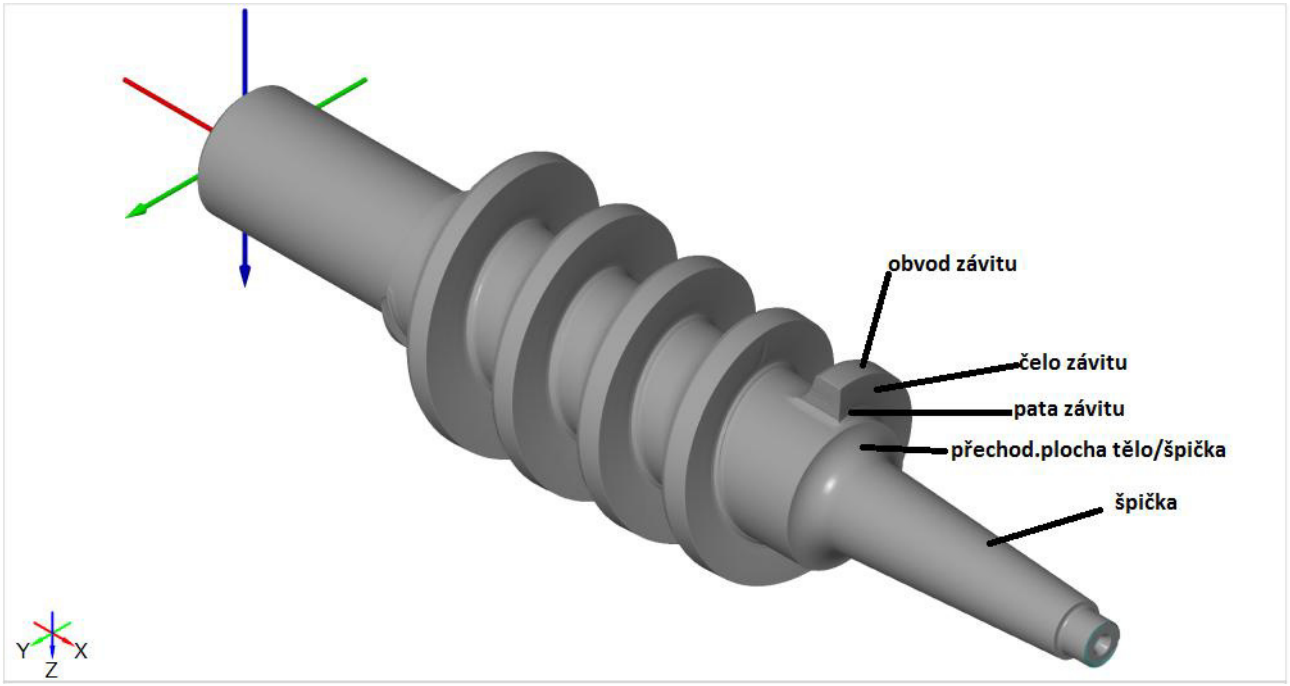
Mikrostrukura povlaku karbidu wolframu ve slitině NiCrBSi v podélném a příčném řezu je zobrazena na obr. 29. Z něj je patrné, že karbidy se nerozpouští, zůstávají v původní formě sférických částic a udržují si tak své unikátní vlastnosti. Množství rozpuštěných karbidů závisí na parametrech povlakování, především na vneseném teple. [40]

3.4. Podmínky experimentu

Veškeré níže uvedené testy probíhaly na briketovacím lise dnes již neexistující firmy Pini&Kay FG 500 za stacionárních podmínek, mezi které se řadí lisovací tlak a otáčky. Lisovací tlak je zajištěn novými součástmi, které se přímo podílejí na lisovacím procesu. Jedná se o soustavu matric a zkoumaného šneku. Samozřejmostí je rovněž správné ustavení těchto dílů, bez něhož k lisovacímu procesu ani nedojde. Otáčky hlavní centrální hřídele, do níž je nástroj upnut, jsou rovněž konstantní a mají hodnotu 885 min^{-1} . Rotaci zajišťuje řemenový převod od motoru s výkonem 55 kW a otáčkami 1400 min^{-1}. Za nestacionární podmínky lze označit teplotu a vlhkost pilin. Teplota předehřevu matric je nastavena na 175°C a může se pohybovat vzhledem k hysterezi termostatu +- 5°C. Teplota rovněž úzce souvisí s vlhkostí vstupujících pilin, která se pohybuje v rozmezí 6–10 %.

4. Zhodnocení výsledků

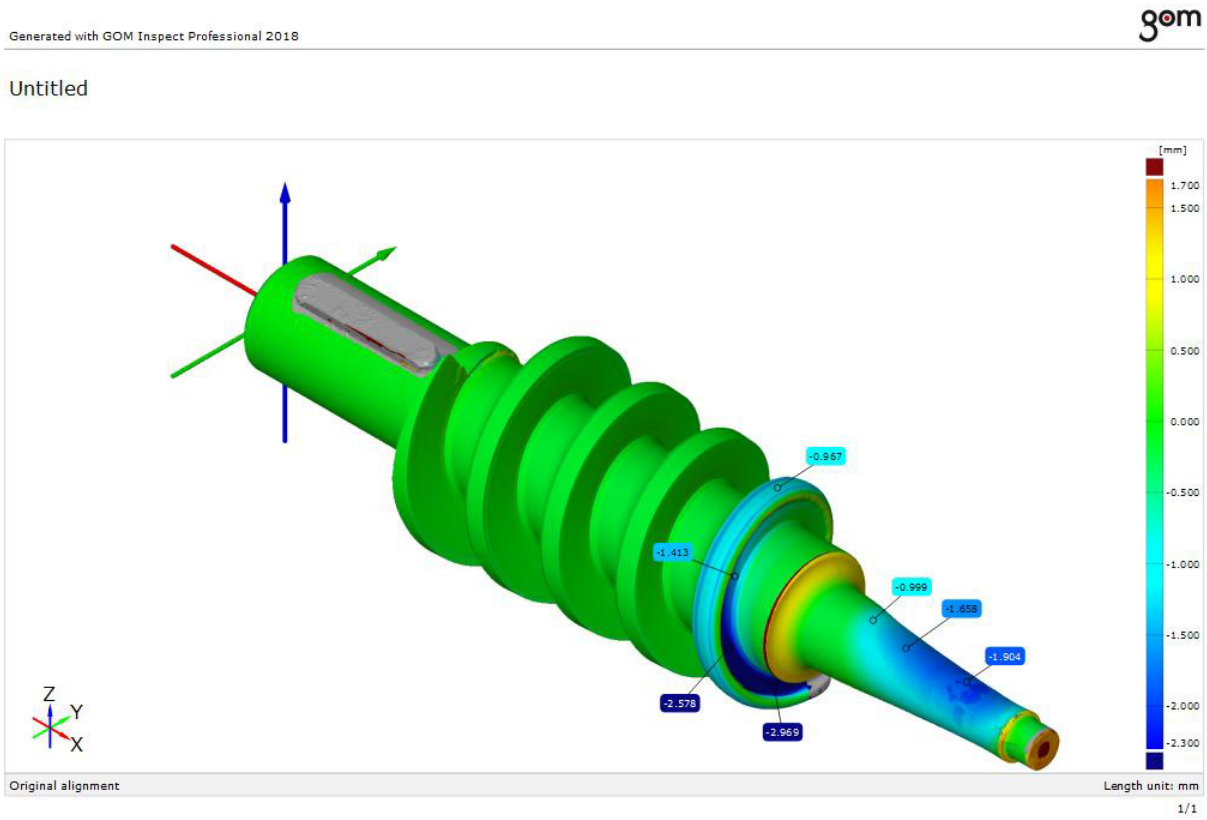
V následující části práce bude popsán postup aplikace otěruvzdorného povlaku na místa podléhající největšímu opotřebení. Dle testů výsledků testů opotřebení prováděných přímo na stroji budou zaváděna opatření za účelem dosažení co možná nejlepšího výsledku experimentu. Za účelem vyjasnění terminologie ploch byl vytvořen obrázek č. 31. Na něm jsou definovány pojmy odvod závitu, čelo závitu, pata závitu, špička a přechodová plocha mezi tělem šneku a špičkou.



Obrázek 31: Terminologie ploch [41]

4.1. První generace

V první fázi byla ošetřena návarem oblast obvodu prvního závitu, kterou bylo nutné před jeho aplikací obrobit tak, aby byly zachovány geometrické rozměry po navaření. Dále bylo potřeba zjistit, zda bude mít vrstva dostatečnou mechanickou odolnost a soudržnost se základním materiálem. Parametry pro laserové povlakování obvodu závitu byly odvozeny z předchozích experimentů a zkušeností: výkonu laseru P = 2800 W, rychlost procesu S = 30 cm / min, rychlost přivádění prášku F = 42 g / min, průměr laserového svazku D = 3,4 mm a šířka jedné housenky w = 5mm. Překryv housenek je 50 % jejich šířky. [40]



Obrázek 32: Porovnání opotřebení 1. generace [42]

Poté byla provedena zkouška přímo na briketovacím lisu za reálných podmínek. Po ustavení šneku do správné polohy vůči matrici byl lis uveden bezproblémově do chodu. Po 4 hodinách provozu byl šnek demontován za účelem kontroly opotřebení. Ihned po demontáži bylo zjištěno, že závit je extrémně opotřeben na svém čele. Proto bylo rozhodnuto o aplikaci návaru i na tuto plochu. Až poté bylo provedeno porovnání skenů reference, tedy pouze obrobeného šneku, a opotřebeného šneku pomocí sofwaru GOM Inspect, které je zachyceno na obrázku č. 31. Oběma skenům byl nejprve založen koordinátní systém za pomoci definování řídících ploch - válcová upínací část, čelo upínací části a střed drážky pro pero. Poté mohly být skeny porovnány. Výsledek potvrdil dramatický úbytek na čele prvního závitu (tmavě modrá barva). Dále je vidět nepatrný úbytek na obvodu závitu (světle modrá barva), který je však způsoben obrobením závitu popsaným výše a následným navařením vrstvy s mírně odlišnou tloušťkou. Posledním významným místem, které vizuální kontrola neodhalila, je špička závitu. I zde je zaznamenán úbytek materiálu. Na základě těchto zjištění bylo nutné opatřit povlakem i další plochy.

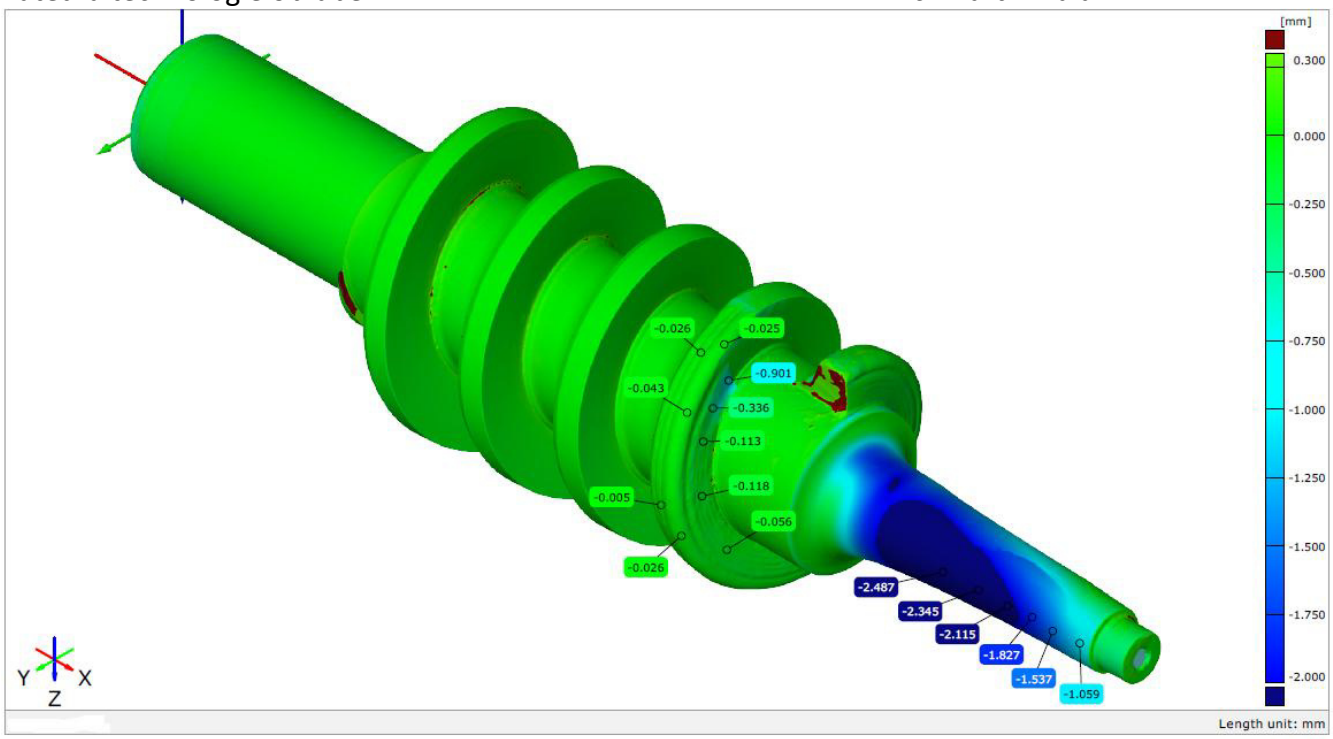
4.2. Druhá generace

Vzhledem k absenci znalosti úbytku materiálu na špičce byla tedy vytvořena druhá generace, u které byl povlak vytvořen jak na obvodu, tak čele prvního závitu. Parametry laserového zařízení pro plochu obvodu byly použité stejné jako u první generace. Pro plochu čela bylo nutné parametry pozměnit. Ty byly stanoveny následovně: výkonu laseru P = 1000 W, rychlost procesu S = 30 cm / min, rychlost přivádění prášku F = 23 g / min, průměr laserového svazku D = 2 mm a šířka jedné housenky w = 3,2 mm. Překryv housenek je 50 % jejich šířky. [40]

Takto opatřený šnek byl naskenován pomocí 3D skeneru za účelem zjištění geometrie výchozího stavu. Po ustavení šneku a matrice do předepsané pozice bylo přistoupeno ke zkoušce v reálném provozu. Briketovací lis se však nepodařilo uvést do provozu. Tento fakt lze vysvětlit tím, že šroubovice závitu vykazovala geometrickou anomálii (= „schod “) znázorněnou na obrázku č. 31 v oblasti přechodu na návar. Byl tedy pomocí ruční úhlové brusky vyrovnán a došlo opět ke zkoušce. I další pokus o zprovoznění stroje však skončil neúspěšně. Poslední možnou variantou, která nefunkčnost způsobuje, tak mohla být už jen vysoká drsnost a pórovitost návaru v oblasti čela závitu. To může mít za následek, že materiál (piliny/tvořící se briketa) vlivem vysokého součinitele tření „neklouzne“ po závitu a dojde k jevu podobnému zadření. Proto byl šnek dodatečně opracován v omílacím stroji Otec DF3 substrátem HS 300. Po tomto zásahu bylo opětovně přistoupeno ke zkoušce na lisovacím zařízení. Tentokrát již s pozitivním výsledkem. Šnek byl ve stroji 8 hodin, což odpovídá vyrobenému množství přibližně 3000kg. Následně byl šnek podroben opět 3D skenování za účelem zjištění velikosti opotřebení. Při zakládání koordinátního systému nutného pro srovnání šneků byly vybrány plochy na upínací části trnu, které nepodléhají rychlému opotřebení. Jedná se o válcovou plochu a plochu čela upínacího válce, které zajistí fixaci v osách. Rotace je odebrána pomocí drážky pro pero. Takto definované koordinátní systémy pak slouží k porovnání jednotlivých skenů.

Obrázek 33: Přechod na návar na čele závitu[43]

Na obrázku č. 33 je vidět srovnání této generace nástroje před opotřebením v provozu a po něm. Z něj je patrné, že k úbytku materiálu návaru takřka nedochází. Bohužel špička nástroje, která vrstvou není opatřena, vykazuje známky úbytku materiálu. Proto bude nutné opatřit povlakem i ji. Zajímavé zjištění je, že maximum opotřebení špičky se nenachází vždy na jednom konkrétním místě. V první generaci bylo na protilehlé straně konce čela závitu. V tomto případě se však nachází v rovině rovnoběžné k ukončení obvodu závitu. Pokud se zaměříme úbytek návaru, lze v obrázku najít maximální hodnotu opotřebení na čele závitu 0,118 mm. Na obvodu pak ještě hodnotu ještě nižší, konkrétně 0,043 mm. Hodnota úbytku 0,901 mm na čele je způsobena odstraněním přechodu na návar popsaného výše.

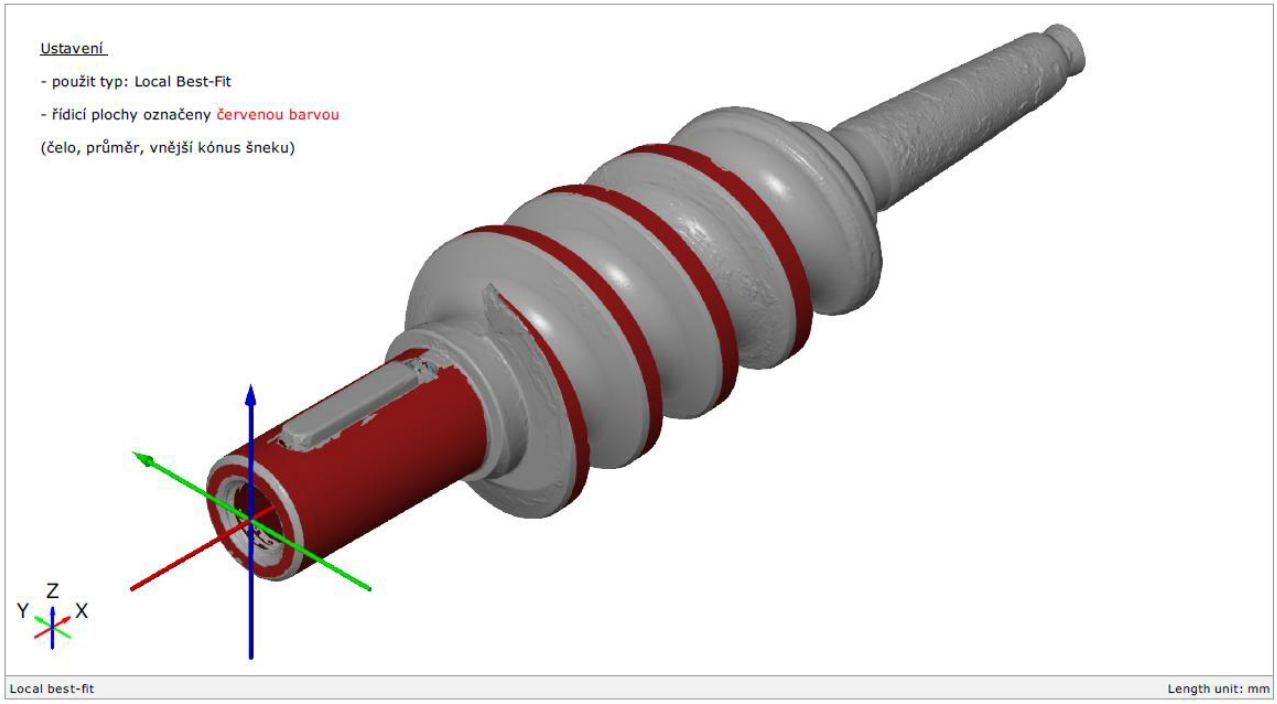


Obrázek 34: Porovnání opotřebení 2. generace [44]

4.3. Třetí generace

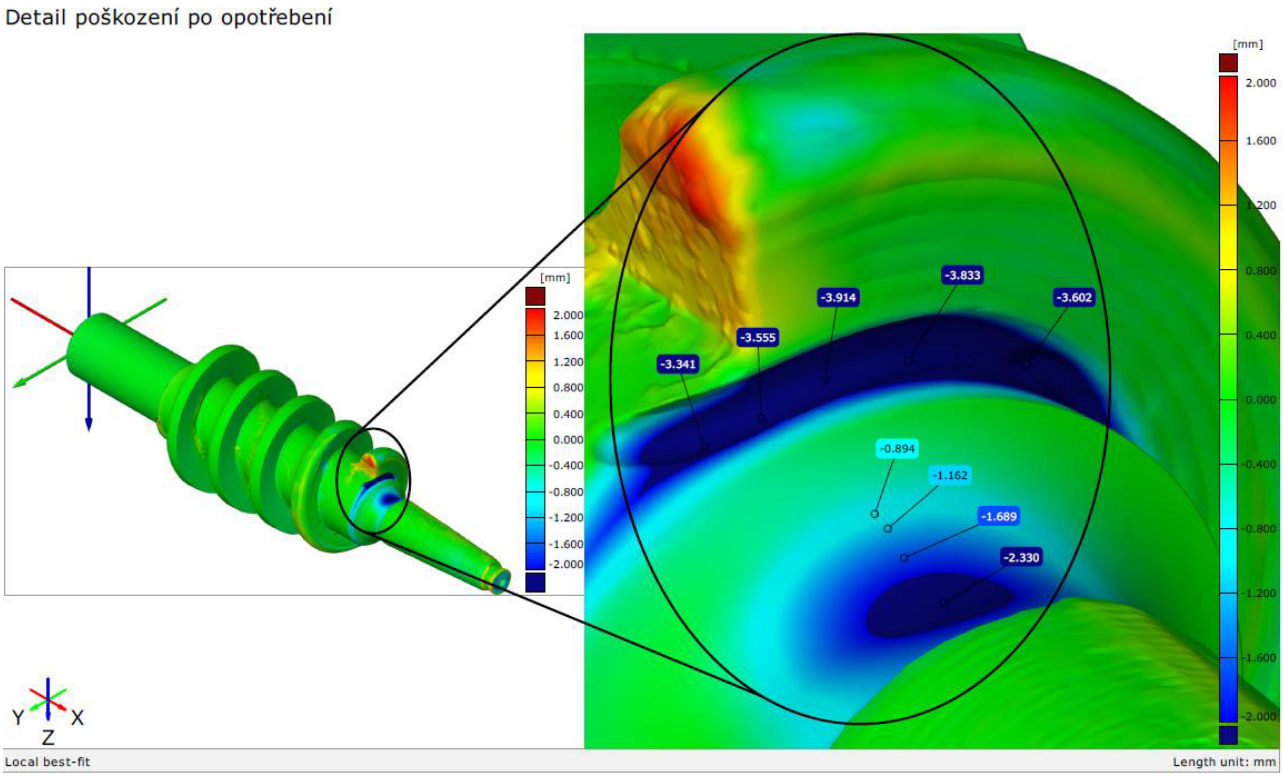
Na základě výsledků měření druhé generace byl tedy povlak aplikován i na plochu špičky. Parametry pro plochy obvodu a čela závitu byly použity z předchozích generací. Pro špičku byly stanoveny následovně: výkonu laseru P = 900 W, rychlost procesu S = 50 cm / min, rychlost přivádění prášku F = 23 g / min, průměr laserového svazku D = 2 mm a šířka jedné housenky w = 2,4 mm. Překryv housenek je 50 % jejich šířky. [40]

Vzhledem ke zkušenosti s drsností a pórovitostí z druhé generace bylo omílání provedeno před samotnou zkoušou ve stroji. Rovněž přechod na šroubovici byl odstraněn. Poté bylo přistoupeno ke zkoušce v reálných podmínkách. Po správném ustavení se stroj bezproblémově rozběhl a nástroj byl v provozu opět 8 hodin. Po demontáži byl šnek znovu podroben skenování za účelem zjištění velikosti opotřebení. Tentokrát nebyl skenům založen koordinátní systém, ale byly zarovnány pomocí funkce local best fit. To v překladu znamená, že skenům je vybraná určitá oblast, tzv. řídící plocha, ve které systém automaticky vyhledá největší množství společných bodů obou skenů a ty pak podle nich zarovná. Ustavení pomocí funkce local best fit je znázorněno na obrázku č. 34. Řídící plochy jsou označeny červenou barvou. Jedná se o upínací průměr, jeho čelo a vnější kónus závitu.



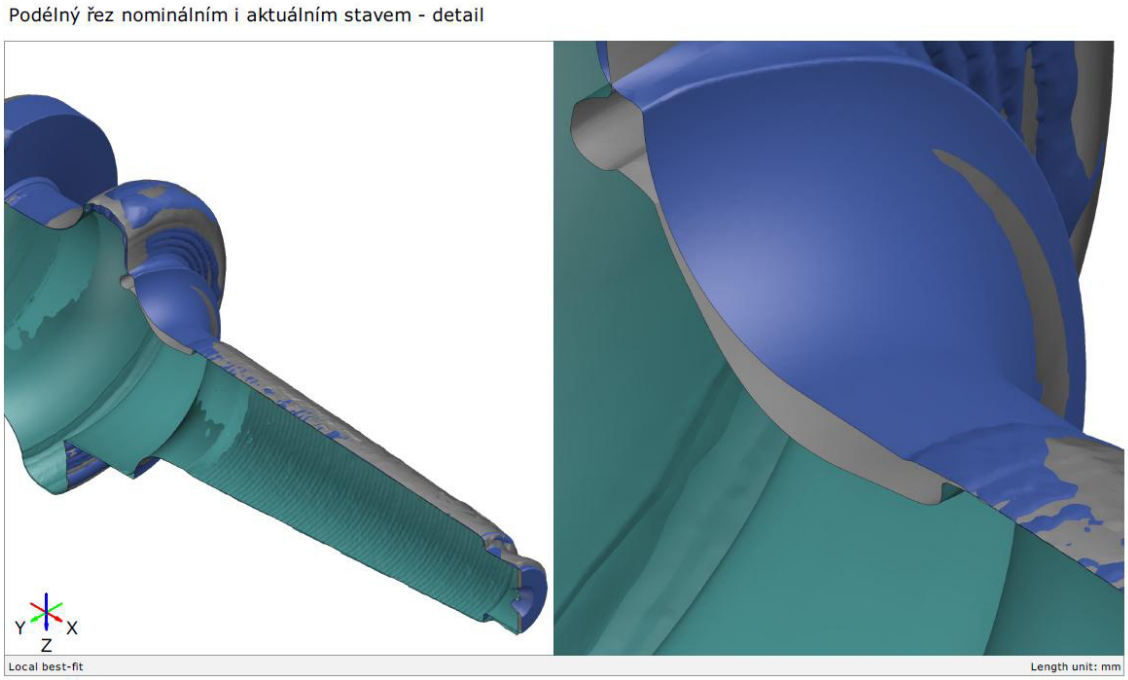
Obrázek 35: Ustavení III. generace pomocí funkce local best fit [45]

Velikost opotřebení třetí generace ukazuje obrázek č. 35. Červená barva zobrazuje plochy aktuálního stavu nad nominálním stavem (přídavek), modrá pak pod nominálním stavem (opotřebení). Přídavek vznikl důsledkem nedokonalého očištění šneku před skenováním. Podstatnější je však pro výsledek barva modrá, tedy opotřebení. To se projevuje pod patou závitu a na přechodové ploše mezi závitem a špičkou. Tato plocha vzhledem k aktuálním možnostem zařízení realizujícího laserový návar nebyla opatřena. Je však evidentní, že bude nezbytné aplikovat vrstvu i na tuto zbývající plochu. Pokud se zaměříme na velikost opotřebení v oblastech, které jsou povlakem opatřeny, je vrstva návaru takřka neměnná. To potvrzuje správnost použité technologie i zvoleného prášku.

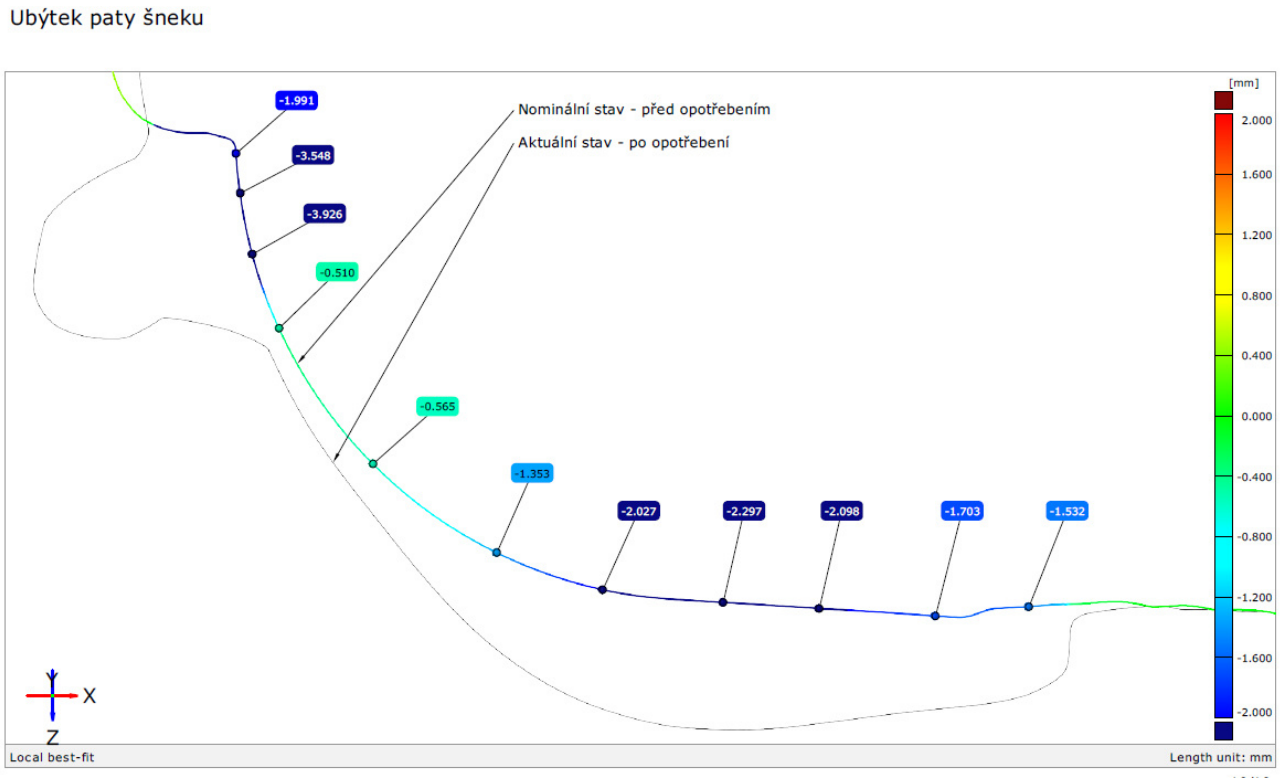


Obrázek 36: Detail opotřebení III. generace[46]

Dále byl mimo barevnou mapu opotřebení pořízen ze softwaru GOM Inspect i podélný řez nominálním a aktuálním stavem, který je zobrazen na obr. 35. Na jeho detailu je dobře vidět úbytek materiálu na přechodové ploše mezi tělem šneku a špičkou.



Obrázek 37: Podélný řez nominálním a aktuálním stavem III. Generace [47]

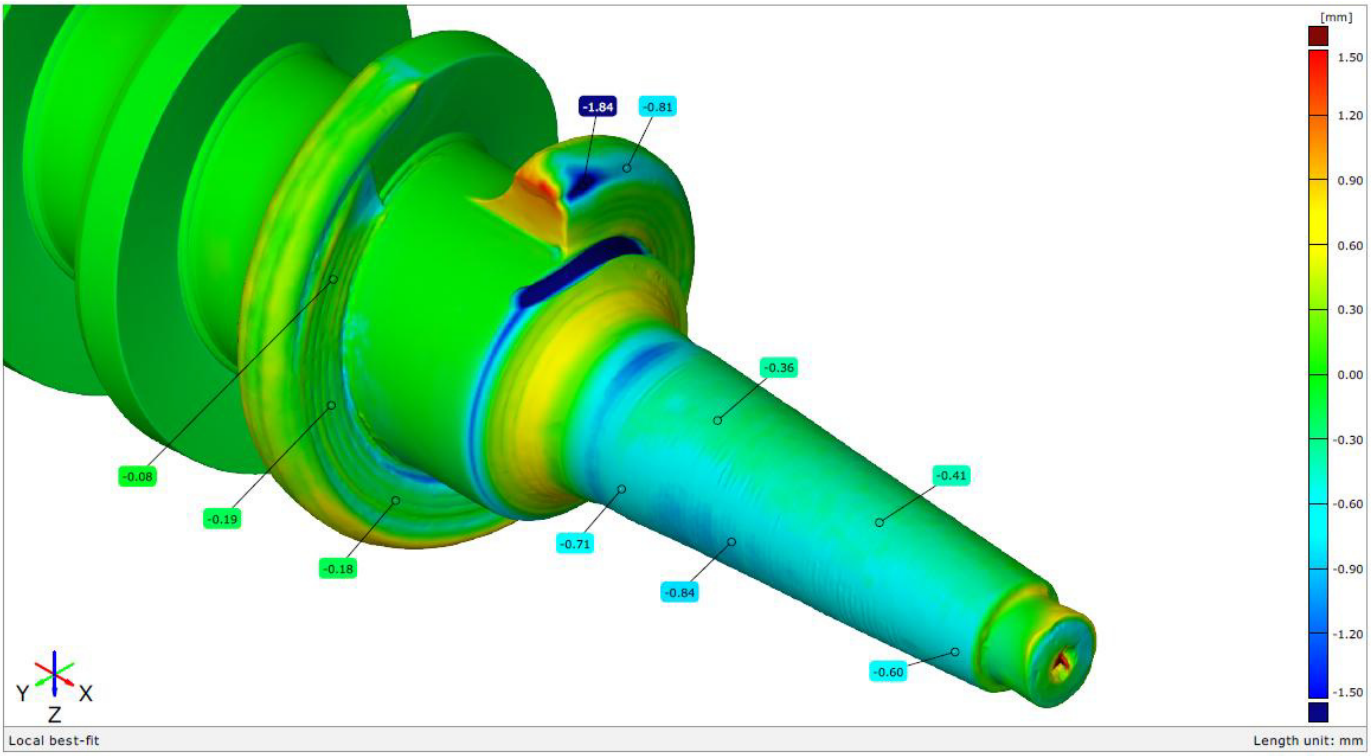


Obrázek 38: Detail úbytku materiálu [48]

4.4. Čtvrtá generace

Na základě výsledků testů předchozích generací byl návar aplikován ještě na chybějící přechodovou plochu mezi tělem šneku a špičkou. Parametry pro povlakovací zařízení byly shodné jako u třetí generace. Nástroj byl rovněž opracován ve výše zmíněném omílacím stroji a i přechod na závitu byl odstraněn. Poté bylo přistoupeno k testování nástroje. Šnek byl ustaven do správné pozice vůči nástroji a briketovací proces byl úspěšně zahájen. Po odpracování 8 hodin došlo k demontáži a následné vizuální kontrole. Ta nevykázala žádné významné prvky opotřebení a tak byl nástroj ve stroji ponechán 3 dny a dle informací od obsluhy vyrobil přibližně 10 tun briket. Po demontáži se objevila drážka pod patou šroubovice prvního závitu, která je vyobrazena na fotografii č. 39. Ostatní návarem opatřené plochy se jeví jako minimálně opotřebené. Za účelem přesného vyhodnocení byl pořízen 3d sken.

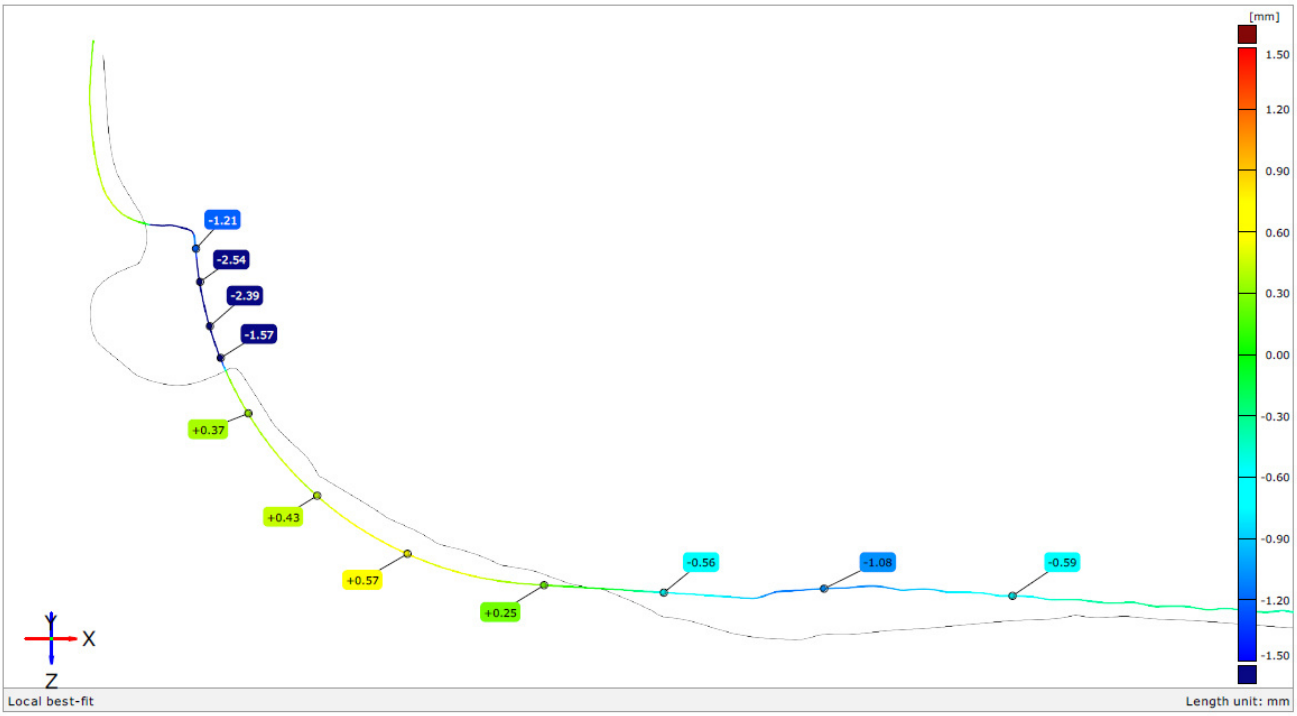
Obrázek 39: Fotografie drážky šneku GEN_4 [49]



Obrázek 40: Porovnání opotřebení 4. generace [50]

Barevná mapa opotřebení na obrázku č. 40 potvrzuje domněnky z vizuální kontroly o minimálním opotřebení na plochách návaru. Konkrétně na čele a obvodu v desetinách milimetru, na špičce je opotřebení vyšší, řádově do 1 mm. Pro upřesnění informací z obrázku je nutné říci, že pro srovnání nebyl k dispozici výchozí stav 4. generace a proto byl použit výchozí stav 3. generace, tedy kompletní návar na závitu a špičce bez přechodové plochy tělo/špička. Proto v těchto místech vystupuje žlutá barva, tedy přídavek. Ostatní plochy mající shodnou barvu, popř. i červenou lze vysvětlit rozdílnou tloušťkou návaru nebo nedokonalým očištěním.

Pro opotřebení pod patou a tvořící se drážku byl pořízen řez (obr. 41) vycházející ze stejných parametrů srovnání jako barevná mapa výše (obr. 40). Úbytek materiálu pod patou závitu dosahuje hodnoty až 2,54 mm. Dále lze v tomto řezu pozorovat i opotřebení na počátku špičky.

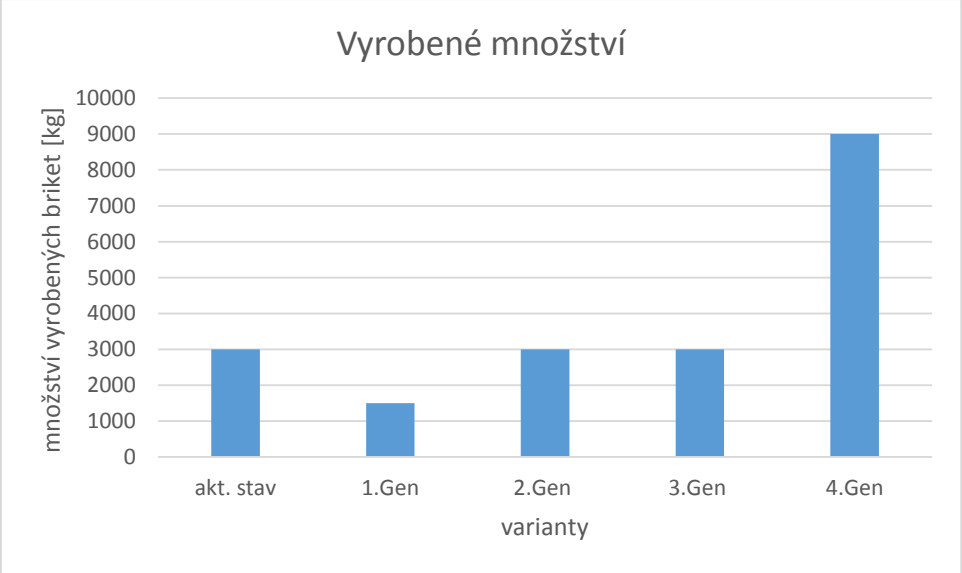


Obrázek 41: Detail řezu 4. generace [51]

4.5. Shrnutí výsledků

Pro shrnutí výsledků bylo třeba zjistit hodnoty vyrobeného množství briket jak u variant experimentu, tak i současné metody využívané v praxi firmou. Z těchto hodnot byl vytvořen jednoduchý graf (obr. 42). Z něj vyplývá, že vyrobené množství briket se zvyšuje, stejně tak jako

trvanlivost deponovaných ploch dle provedené generace šneků. V první generaci byl odladěn povlakovací proces a potvrzena správná volba prášku vč. nastavení procesních parametrů povlakování. To bylo potvrzeno materiálovým rozborem rozhraní substrát – vrstva. Při vlastním experimentu byla provedena kontrola stavu vrstvy a nástroje již v polovině standartní pracovní směny a z důvodu zamezení znehodnocení nástroje, byl experiment první generace ukončen. Proto je v grafu pokles vyrobeného množství vůči aktuálně využívané metodě. V druhé generaci byl návarem opatřen celý první závit, tedy odvod a čelo. Ve třetí pak i špička závitu. Obě generace nabývají shodných hodnot vyrobených briket, protože na rozdíl od první generace pracovaly dvojnásobnou dobu. Až čtvrtá generace opatřená povlakem na všech patřičných plochách zaznamenala radikální zvýšení trvanlivosti bez hrozící destrukce nástroje. Dále je třeba zdůraznit, že i čtvrtou generaci lze vylepšit a vytvořit tak další, která by nepochybně vykázala opět mnohem lepší trvanlivost



Tabulka 4: Vývoj vyrobeného množství [52]

Na základě výsledků provedeného experimentu je jasné, že použitím povlaku aplikovaného pomocí metody laserového navařování dochází ke zvýšení trvanlivosti lisovacího nástroje. Pro zhodnocení komplexního přínosu by bylo nutné vypracovat ekonomickou analýzu, která nebyla součástí zadání této diplomové práce. Okrajově lze však říci, že by do ní musely vstupovat různé parametry jako například cena laserového návaru, cena elektrod, časy potřebné na renovaci či montáž a demontáž. Dále nelze opomenout mzdy pracovníků, cenu nového nástroje a možnosti jeho renovace po vyrobení určitého množství tak, aby nedošlo k jeho úplnému znehodnocení.

5. Závěr

Cílem této práce bylo zajistit zvýšení trvanlivosti lisovacího nástroje pro výrobu dřevěných briket. Experiment prokázal, že metoda laserového povlakování je vhodná pro dosažení cíle. Trvanlivost se zvýšila přibližně třikrát, čímž došlo ke snížení ztrátových časů potřebných na demontáž. S tím samozřejmě souvisí i náklady na renovaci. V poslední generaci návaru se však projevilo ještě opotřebení pod patou závitu. Nabízí se několik řešení, jak vzniklý problém odstranit. Jedním z nich je aplikace vrstvy ještě na válcovou část těla šneku před přední závit. Dalším možným řešením je povrchové zakalení této části, neboť nepodléhá tak extrémnímu namáhání jako plochy, které byly postupně v rámci této práce návarem opatřeny. Bohužel se však z časových důvodů tato opatření nedostala do výsledků práce. Bude snahou je odstranit, nástroj podrobit dlouhodobé zkoušce trvanlivosti v reálných podmínkách a výsledky prezentovat u obhajoby diplomové práce.

Osobně jsem se při řešení diplomové práce seznámil s novými technologiemi, které pro mě do budoucna mohou být jen přínosné. Ať už se jedná o technologii laserového povlakování nebo měření pomocí 3D technologie. Nemohu rovněž opomenout systém na zpracování 3D skenu GOM Inspect.

Seznam zdrojů:

[1] STUPAVSKÝ, Vladimír, HOLÝ, Tomáš: Brikety z biomasy - dřevěné, rostlinné, směsné brikety. *Biom.cz* [online]. 2010-01-01 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z WWW: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/brikety-z-biomasy-drevene-rostlinne-smesne-brikety>. ISSN: 1801-2655

[2] Technologie briketování - co je potřeba znát. *Biom.cz* [online]. 2013 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: http://biom.cz/cz/zpravy-z-tisku/technologie-briketovani-co-je-potreba-znat

[3] PLÍŠTIL, David, HUTLA, Petr, ROY, Amitava: Briketování odpadů z dendromasy a zjištění mechanických parametrů briket. Biom.cz [online]. 2005-02-14 [cit. 2017-04-20]. Dostupné z WWW: <http://biom.cz/index.shtml?x=223025>. ISSN: 1801-2655

[4] Briketovací lisy. In: *Http://www.cronimo.cz/* [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: http://www.cronimo.cz/briketovaci-lisy

[5] ORGANISCHE MATERIALIEN. In: *Http://www.brikettieren.de/* [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: http://www.brikettieren.de/brikettiersysteme/holz-biomasse/

[6] *Šnekový lis* [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: http://www.shimada.co.uk/shimada-extrusion-press.html

[7] *Tření-druhy* [online].[cit. 2019-04-28].Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/T%C5%99en%C3%AD

[8]*Tření-průběh sil* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/T%C5%99en%C3%AD

[9]*Tření - definice,,rozdělení a popis* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/T%C5%99en%C3%AD

[10]*Součinitel tření* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: http://www.converter.cz/tabulky/smykove-treni.htm

[11] OPOTŘEBENÍ STROJNÍCH SOUSTAV A VZNIK PORUCH [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TU/TU/4kapitola.pdf

[12] *Opotřebení kovových materiálů* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12010/abrazivni-opotrebeni-kovovych-materialu.html

[13] *Opotřebení kovových materiálů* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/tribologie/charakteristiky/odolnost-proti-opotrebeni

[14] HOFFMANN, Martin. *NAVAŘOVÁNÍ OTĚRUVZDORNÝCH MATERIÁLŮ* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73089/F2-BP-2017-Hoffmann-Martin NAVAROVANI%20OTERUVZDORNYCH%20MATERIALU.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[25] Čada,Z *Strojírenská technologie II.* ,první vydání, Praha 2000, IBSN 80-86065-10-3

[26] Obloukové svařování obalenou elektrodou [online]. In: . [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: https://www.schinkmann.cz/mma-rucne-obalenou-elektrodou

[27] Obalená elektroda OK84.84 [online]. In: . [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: https://www.svarovaci-technika.cz/elektroda-ok-84-84-2-5x350mm--nove-oznaceni-ok-weartrode-62-2-5x350mm/

[28] Žárové nástřiky-porovnání technologií [online]. In: . [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: http://zarovenastriky.cz/porovnani-technologii/

[29] Svařování plamenem. *Http://mechmes.websnadno.cz/* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-t2-08_svarovaniplamenem.pdf

[30] Autogen - plamenové svařování, kyslíko-acetylénové svařování. In: *Http://www.schinkmann.cz/* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: http://www.schinkmann.cz/autogen-plamenove-svarovani

[31] *Technologie žárových nástřiků: Aplikace, kvalita povlaků a rizika při jejich výrobě* [online]. In: . [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: http://www.konstrukce.cz/clanek/technologie-zarovych-nastriku-aplikace-kvalita-povlaku-a-rizika-pri-jejich-vyrobe/

[32] *3D skenování* [online]. In: . [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: https://www.solidvision.cz/3d-skenovani/

[33] 3D skenování. In: *Https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2851-3d-skenovani.html* [online]. [cit. 2019-05-06].

[34] Reverzní inženýrství. Dostupné z:: *Http://www.doosanskodapower.com/cz/turbomachinery-services/3d-scanning-and-reverse-engineering/turbine-parts/* [online]. [cit. 2019-05-06].

[35] Fotogrammetrie – 3D skenování s použitím fotoaparátu či mobilu. In: *Https://josefprusa.cz/fotogrammetrie-3d-skenovani-s-pouzitim-fotoaparatu-ci-mobilu/* [online]. [cit. 2019-05-06].

[36] *ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127

[37]*PRINCIP LASERU* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Princip%20laseru.pdf

[38] R. Vilar, Journal of Laser Applications 11 (1999) 64.

[39] N.B. Dahotre, Advanced Materials and Processes 160 (2002) 35.

[40] Zdroj NTC

[41] *Nickel Alloy Powder Blends for Laser Cladding - Oerlikon* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_DSMW-0014.3_WC-NiCrBSi_LC.pdf&download=1

[15-24] + [41-51] vlastní dokumentace

Seznam zkratek a symbolů:

PLC = Programmable Logic Controller; relativně malý počítač v průmyslovém provedení řízený mikroprocesorem s vlastním operačním systémem, uzpůsobeným pro potřeby řešení automatizačních úloh v reálném čase, s co nejkratší dobou odezvy.

CMM = Coordinate Measuring Machines

HRc = tvrdost materiálu podle Rockwella

HV = tvrdost materiálu podle Vickerse

°C = stupeň Celsia

µm = mikrometr

WC = wolfram karbid

NTC = Centrum nových technologií

ZČU = Západočeská univerzita

kW = kilowatt

min^{-1} = otáčky za minutu