

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2023

**LUKÁŠ
NOVOTNÝ**



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ
A METROLOGIE**

Mechanické zpevňování povrchu

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Lukáš Novotný

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novotný** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **502627**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Mechanické zpevňování povrchu

Název bakalářské práce anglicky:

Mechanical surface strenghtening

Pokyny pro vypracování:

1. Literární rešerše o technologiích dokončování a zpevňování povrchu.
2. Integrita povrchu zpevňovaných povrchů.
3. Způsoby procesní kontroly při řízeném tryskání.
4. Návrh experimentu pro zjištění intenzity zpevnění při ručním tlakovzdušném tryskání.

Seznam doporučené literatury:

Wagner, L. (2006). Shot Peening. John Wiley & Sons.
Prezentační materiály firmy Curtis and Wright, normy

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

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

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto děkuji svému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Zdeňku Pitrmuci, Ph.D., za odborné rady, konzultace a jeho veškerý čas, který mi věnoval při tvorbě bakalářské práce. Jeho cenné rady a návrhy mi byly velkým zdrojem inspirace.

Anotace

Tato bakalářská práce s názvem „Mechanické zpevňování povrchu“ pojednává o technologii tryskání, metod tryskání a zpevňování materiálu pomocí technologie tryskání. V další části se práce zaměřuje na charakteristiky povrchu po tryskání. V praktické části jsou nerezové pásky AISI 304L podrobeny testu, kdy je využívána technologie tlakovzdušného ručního tryskání ke zpevnění, jsou měněny parametry a je zjišťován jejich vliv. Výsledný test intenzity zpevnění je vyhodnocen na základě průhybu kontrolních pásků a na základě měření zbytkových napětí. Výsledkem je představa, jakého zpevnění povrchu lze dosáhnout při ručním tlakovzdušném tryskání a jak výrazný vliv mají volené parametry.

Název bakalářské práce: Mechanické zpevňování povrchu

Autor práce: Lukáš Novotný

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D.

Konzultant: –

Akademický rok: 2022/2023

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: 12134 – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Vedoucí ústavu: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Rozsah práce: 67 stránek, 12 tabulek, 35 obrázků, 6 grafů

Klíčová slova: Mechanické zpevňování, Tryskání, Zbytková napětí, Zpevňovací technologie, Shot peening, Procesní kontrola shot peeningu, Intenzita zpevnění, Integrita povrchu

Annotation

This bachelor's thesis entitled "Mechanical surface strengthening" discusses the technology of blasting, methods of blasting and the strengthening of material using blasting technology. In the next part, the thesis focuses on the characteristics of the surface after blasting. In the practical part, AISI 304L stainless steel tapes are subjected to testing, where the technology of manual air blasting is used for strengthening. Parameters are being altered, and their influence is being determined. The resulting strengthening intensity test is evaluated based on the deflection of the control strips and also on the measurement of residual stresses. The result provides an idea of how much surface strengthening can be achieved with manual air blasting and the significant effect the selected parameters have.

Title of the final thesis:	Mechanical surface strenghtening
Author:	Lukáš Novotný
Supervisor:	Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D.
Consultant:	–
Academic year:	2022/2023
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12134 – Department of Machining, Process Planning and Metrology
Head of department:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Extent:	67 pages, 12 tables, 41 pictures, 6 graphs
Keywords:	Mechanical strengthening, Blasting, Residual stress, Surface strengthening technologies, Shot peening, Shot peening control, Intensity of strengthening, Surface integrity

Obsah

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE	11
2. POČÁTKY TECHNOLOGIE TRYSKÁNÍ	12
3. TRYSKÁNÍ	14
3.1 Technologický postup.....	15
4. TRYSKACÍ METODY	16
4.1 Pneumatické tryskání	16
4.1.1 Injektorové tryskání.....	18
4.1.2 Tlakové tryskání	19
4.2 Mechanické tryskání.....	20
5. TYPY TRYSKACÍCH ZAŘÍZENÍ	22
6. VÝROBCI TRYSKACÍCH ZAŘÍZENÍ.....	25
7. TRYSKACÍ MÉDIA	27
7.1 Vlastnosti abraziv.....	27
8. SHOT PEENING.....	29
8.1 Procesní kontrola shot peeningu	30
8.2 Stanovení pokrytí povrchu – intenzita tryskání	31
9. CHARAKTERISTIKY KVALITY POVRCHU PO TRYSKÁNÍ	32
9.1 Plastická deformace tryskaného materiálu	32
9.2 Zpevnění materiálu tryskáním	33
9.3 Tepelný účinek tryskání.....	34
9.4 Strukturální změny po tryskání.....	34
9.5 Změny mechanických a technologických vlastností	34
9.6 Zbytková napětí.....	35
10. PRAKTICKÁ ČÁST	38
10.1 Zkušební materiál.....	38

11. NÁVRH METODIKY EXPERIMENTU	40
12. PROVEDENÍ EXPERIMENTU	41
12.1 Vliv parametrů	42
12.1.1 Tlak	43
12.1.2 Vzdálenost	45
12.2 Měření zbytkových napětí	47
12.2.1 Postup měření.....	49
12.2.2 Měření vybraných vzorků	49
12.2.3 Záznam z měření.....	50
13. VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU	52
14. ZÁVĚR.....	56
Bibliografie	59
Seznam tabulek	64
Seznam obrázků	65
Seznam grafů.....	67

Seznam použité symboliky a zkratek

Rz	[μm]	Hloubka drsnosti
Ra	[μm]	Průměrná aritmetická hodnota drsnosti
Sa	[–]	Stupeň čistoty
SG	[–]	Steel grit – ocelová drť
IT	[–]	Stupeň přesnosti
HB	[–]	Tvrдост dle Brinella
HRC	[–]	Tvrдост dle Rockwella
σ	[MPa]	Zbytkové napětí
H	[mm]	Hloubka
v	[m/s]	Rychlost abraziva
α	[$^\circ$]	Úhel dopadu abrazivního média
t	[mm]	Tloušťka vzorku
h	[μm]	Výška průhybu
m_1	[g]	Počáteční hmotnost
m_2	[g]	Konečná hmotnost
a	[mm]	Délka vetknutí
t_1	[min]	Čas sepnutí proudu
t_2	[min]	Čas vypnutí proudu
b	[mm]	Šířka leptané plochy
l	[mm]	Výška plochy
U	[V]	Napětí na zdroji
S	[mm^2]	Odleptaná plocha
ρ	[A/ dm^2]	Proudová hustota
R	[mm/min]	Minutový úběr

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

Tryskání se běžně využívá k odstranění starých nátěrů, čištění materiálů, odstranění koroze, ke zmatnění nebo odstranění různých nečistot na povrchu součástí pomocí různých typů abraziv. Nejčastěji se tedy využívá v předúpravě povrchů před následnou povrchovou úpravou. Nicméně vedle toho se tryskáním dají součásti i zpevňovat. To nachází využití zejména v leteckém průmyslu, kde můžeme například využitím technologie shot peening zvýšit odolnost proti opotřebení lopatek turbín. V nepříznivých podmínkách, například v oblastech s možným výskytem abrazivních částic v ovzduší, je pak životnost kuličkovaných součástí daleko vyšší i přes vliv těchto částic.

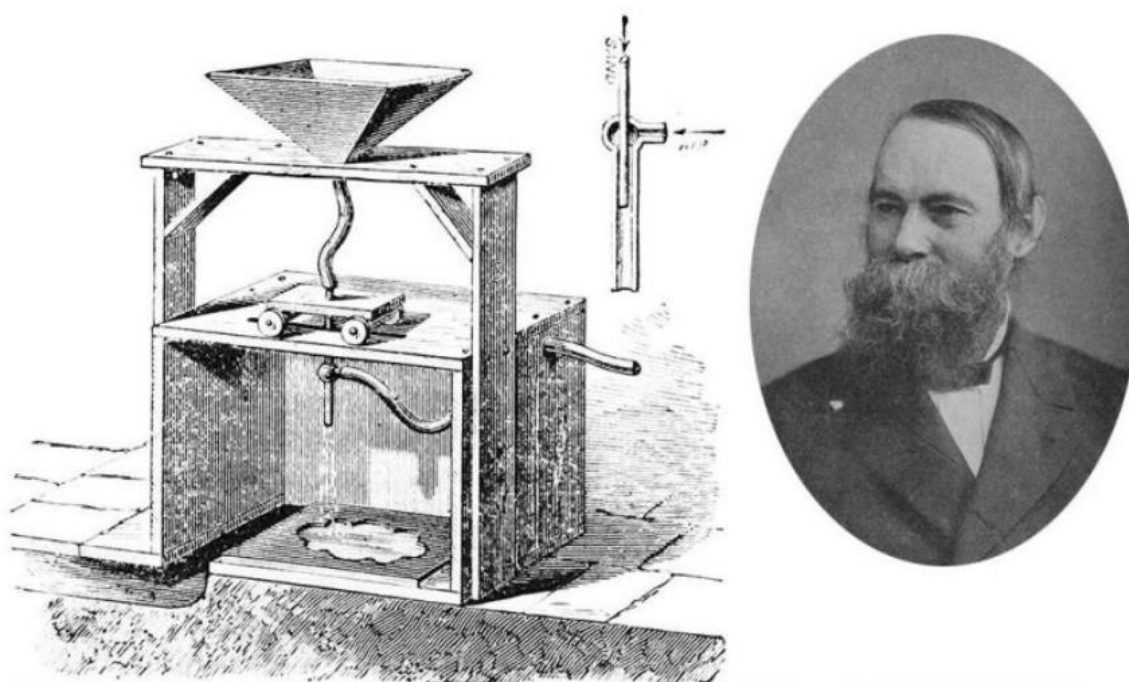
Shot peening se využívá i u dalších vysoce namáhaných konstrukčních součástí, typicky ozubená kola, klikové hřídele, železniční nápravy, podvozky letadel. Všechny tyto součásti jsou vystaveny mnoha zatěžovacím cyklům. Vinou toho může docházet k rychlému šíření trhlin a únavový lom může nastat během krátké doby. Z těchto důvodů je potřeba zajistit vysokou strukturální integritu. Únavová pevnost je zajišťována právě metodou shot peening. [1]

Vliv na zpevnění mají především volené parametry, a to vzdálenost trysky od povrchu součásti, úhel natočení, čas, tlak unášeného média a také druh média. Médium v podobě malých kuliček funguje jako malá kladívka, co dopadají na vzorek a tím materiál zpevňují. Čas je rozhodující do bodu saturace, tj. bod, kdy už nadále nedochází k výrazným změnám.

První část práce se zabývá technologií tryskání. Experimentální část pojednává o zjištění intenzity zpevnění materiálu pomocí technologie ručního tlakovzdušného tryskání při zvolení různých parametrů. Pro experiment byly navrženy a zhotoveny zkušební pásky, které se upínaly do navrženého přípravku. Na základě několika různých vzorků byl proveden experiment, kdy se vyhodnocovala míra zpevnění na základě průhybu a také na základě měření zbytkových napětí.

2. POČÁTKY TECHNOLOGIE TRYSKÁNÍ

První zmínky o technologii tryskání pochází z konce 19. století, kdy bylo zaznamenáno první využití. Pomocí této technologie se začínaly povrchově čistit především odlitky. V roce 1871 byla patentována metoda tryskání pískem za použití stlačeného vzduchu, páry nebo vody. Sám autor patentu, Benjamin Chew Tilghman (1821–1901), americký vynálezce, ve svém patentu také zmiňuje, že lze zrychlit tryskací média pomocí odstředivé síly či rotačními koly s lopatkami – mechanické tryskání. Vynálezce se inspiroval efektem navátého písku z pouště, kde pobýval jako armádní generál. Zabýval se i zrychlením s využitím jiných abrazivních prostředků. Snažil se aplikovat strusku, sklo a kovové částice jako tryskací média.



Obrázek 1: Vynálezce Benjamin Chew Tilghman spolu s prvním tryskacím zařízením [37]

K dalšímu rozvoji tryskání došlo mezi 1. a 2. světovou válkou. V té době se jako tryskací médium nejvíce využíval křemičitý písek. Později se však ukázalo, že se nejedná o úplně vhodné abrazivo, z důvodu jeho nízké životnosti. Křemičitý písek se totiž po několika cyklech v tryskacím zařízení rozpadá na prach, který je navíc i zdraví nebezpečný. Hrozí zde totiž inhalace materiálu v podobě částic

prachu, která vede k silikóze (poškození plic). Z těchto důvodů bylo potřeba hledat vhodnější materiál.

Ukázalo se, že vhodnější jsou kovové abraziva vyrobené přímo pro tryskání. V roce 1938 několik amerických firem provádělo experimenty s tryskacím médiem vyrobeným z temperované litiny. O 5 let později byly poprvé použity abrazivní částice ve formě řezaného drátu. V roce 1954 byla v USA zahájena sériová výroba ocelových broků. V té době se toto tryskací médium označovalo jako ocelový písek.

Od 60. let 20. století probíhaly pokusy s tryskacími abrazivy na bázi plastů a také se vyvíjela nekovová tryskací média – na bázi skla, drti a korundu. V 70. letech převládalo především využití řezaných drátů, ocelových broků nebo litinové drti. V závěru 20. století se začaly používat tryskací technologie s využitím mokrého média. S postupem času se zavádí nové technologie, například tryskání suchým ledem. [2] [3]

3. TRYSKÁNÍ

Tryskání je technologický proces opracování povrchu materiálu vlivem proudu natlakovaných abrazivních částic. Působením tryskacích prostředků se z povrchu odstraňují okuje či jiné nečistoty a zároveň se mění i drsnost povrchu. Tryskání spočívá v dopadu abrazivních částic velkou rychlostí na povrch materiálu. Účinek tryskání je závislý na zvoleném tryskacím abrazivu. Velkou roli hraje i jeho kinetická energie, velikost zrn, tvar zrn i způsob tryskání. Mimo jiné tryskáním lze materiál i zpevňovat, jelikož dochází k plastické deformaci na povrchu (shot peening). Tím lze výrazně zlepšit mechanické vlastnosti, a prodloužit tak i životnost materiálu. [4]

Tryskání se využívá pro členité součásti s nepravidelnými tvary a těžko přístupnými plochy. V praxi lze využití rozdělit do několika skupin podle základních aplikací.

a) Čištění

Tryskání se využívá k čištění materiálu. Odstraňuje nečistoty z povrchu, může se jednat například o zbytky formovací hmoty (u odlitků), povlaky, povrchovou korozi, okuje, staré nátěry, mastnoty. Lze čistit i vnitřní povrchy potrubí.

b) Předúprava povrchu

Využívá se před aplikací nátěru, zajišťuje vhodnou povrchovou morfologii a následnou dobrou přilnavost povrchové úpravy.

c) Zpevnění – deformační technika

Tryskáním lze docílit zpevnění materiálu díky plastické deformaci (tváření za studena – shot peening). Výsledkem je zpevněný povrch, zvýšená únavová pevnost a trvanlivost.

d) Povrchová úprava

Využívá se při úpravě svaru a jejich okolí, pro dekorativní účely – zdrsnění nebo vyhlazení povrchu, či na výrobu matných kovů.

e) Získání deformace

Speciální technologie při tváření plechů.

f) Dočasná ochrana

Technologie studeného zinkování tryskáním. [2] [5]

Po tryskání se dosahuje stupňů přesnosti IT7 až IT9. Drsnost je velmi ovlivněna parametry provádění a zvoleného abraziva. Obecně při zvolení většího abraziva dochází obvykle k nižší drsnosti. Dosahuje se hodnot od $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ až $6,3 \mu\text{m}$. [5]

3.1 Technologický postup

Před tryskáním je nutné povrch materiálu nejprve připravit. Je potřeba ho odmastit, popřípadě odstranit hrubé nečistoty (zbytky písku u odlitků). Připravená součást se upevní do tryskače. Následuje tryskání vhodně zvoleným abrazivem. Po procesu tryskání se součást očistí stlačeným vzduchem nebo mechanicky kartáčem. Následuje aplikace protikorozní ochrany, buď ochranný povlak nebo dočasná ochrana. Druh abraziva se odvíjí od druhu povrchu, tloušťky materiálu nebo stupně znečištění. Součásti z měkčích materiálů se tryskají menším tlakem a jemnějšími zrny.

Výkon tryskání se reguluje tlakem vzduchu, popřípadě otáčkami metacích kol. Lze ho také změnit velikostí trysky, úhlem dopadu abrazivních částic a vzdáleností součásti od trysky, popřípadě metacích kol v případě mechanického tryskání. [6]

4. TRYSKACÍ METODY

Technologii tryskání lze provádět pneumatickým způsobem (tlakovzdušným) nebo mechanickým (metacími koly). Cílem těchto metod je především čištění, zpevňování nebo leštění povrchu kovů. Výběr technologie může být klíčovým faktorem k dosažení konečných výsledků. [7] [8]

Pneumatické tryskání

Mechanické tryskání



Obrázek 2: Tryskací metody [38]

4.1 Pneumatické tryskání

Pneumatické tryskání spočívá v tryskání abraziva z trysky proudem stlačeného vzduchu. Pomocí stlačeného vzduchu dojde ke zrychlení abrazivního média přes trysku na povrch součásti. S libovolným tryskacím médiem, velikostí částic a druhem tryskací trysky a dalšími volitelnými parametry, například změnou tlaku, můžeme kontrolovatelně upravit povrch. [9]

Pneumatické tryskací stroje mají ve většině případů formu tryskací kabiny. Pro speciální aplikace lze využít směsi média a vody – mokré tryskání. Při tlakovzdušném tryskání mohou být trysky instalovány do pevných poloh nebo mohou být manuálně ovládané nebo automatizované (roboty). [7]

Mezi výhody pneumatického tryskání lze zařadit zejména to, že se nejedná o chemický proces. Další výhodou je přívětivost pro obsluhu. Také poměrně velké

množství materiálů lze recyklovat a tím dochází k úsporám. Využití této technologie je převážně ve všech průmyslových odvětvích. [9]

Pneumatické tryskání se dělí na injektorové a tlakovzdušné. Každá metoda je vhodná pro jiné aplikace, stejně tak jako každý abrazivní materiál (viz. tabulka 1).

Tabulka 1: Přehled abraziv pro pneumatické tryskání [10]

abrazivum	použití	vhodnost pro systém	
		injektorový	tlakový
ocelová drť	tryskání oceli a litiny - úprava pro lakování a galvaniku, odstranění starých barev, okují a rzi, čištění a dezénování ocelových forem	vhodná	vhodná
ocelový granulát	mechanické zpevňování součástí, odstraňování okují	použitelný	vhodný
neruzová drť	pro tryskání nerezů a barevných kovů	použitelná	vhodná
syntetický korund	pro ocel, barevné kovy, matování skla, dřevo, kámen	vhodný	použitelný
granát	pro ocel, barevné kovy, matování skla, dřevo, kámen	vhodný	použitelný
skleněné kuličky	pro saténování ("leštění") kovů jako druhý stupeň po tryskání korundem - pro galvaniku, kovolijectví, auto-moto, muzejnictví, plastikářský prům. a pod.	vhodné	použitelné
keramické kuličky	jako skleněné kuličky	vhodné	použitelné
plastový granulát	pro čištění a odkarbonování - formy, hlavy motorů, muzejnictví	vhodný	vhodný
mleté pecky	odkarbonování	vhodné	použitelné

Pracovní trysky

Trysky jsou vyrobeny z karbidu wolframu a díky tomu jsou vysoce odolné vůči otěru. Přesto k opotřebení dochází. Rychleji je to u ostrohranných minerálních abraziv, jako je například korund nebo granát. Pomaleji pak dochází k opotřebení při tryskání ocelové drti. Velikost (průměr) trysky má vliv na spotřebu tlakového vzduchu. Přibližná spotřeba je znázorněna v následující tabulce. [10]

Tabulka 2: Přibližná spotřeba tlakového vzduchu v závislosti na průměru trysky [10]

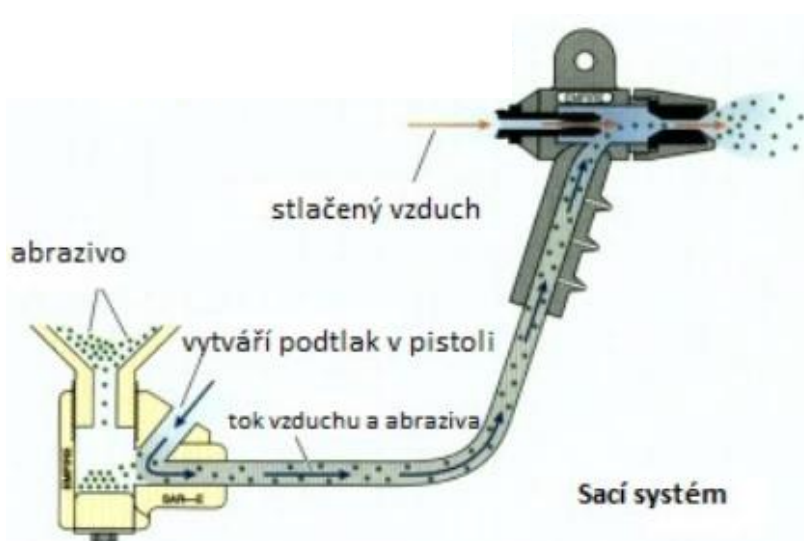
Ø trysky [mm]	0,2 MPa	0,3 MPa	0,4 MPa	0,5 MPa
2	0,11	0,15	0,19	0,23
3	0,25	0,33	0,42	0,51
4	0,44	0,59	0,75	0,90
5	0,69	0,94	1,16	1,42
6	0,99	1,33	1,68	2,04
7	1,35	1,81	2,28	2,77
8	1,75	2,36	2,97	3,62
9	2,23 m ³ /min	2,99 m ³ /min	3,75 m ³ /min	4,58 m ³ /min

4.1.1 Injektorové tryskání

Injektorové tryskání je konkrétní technika pneumatického tryskání. Abrazivní médium je do pistole dodáváno pomocí podtlaku. Směs je přes trysku tryskána na požadovaný povrch. Používá se široké spektrum abraziva, převážně lehčí typy, například korund. [9]

Díky snadné regulaci výkonu a rozsáhlému použití tryskacích médií je variabilní. Pracovní cyklus je navíc kontinuální (není potřeba přerušovat provoz). Abrazivum po odražení z povrchu materiálu padá na dno kabiny, kde se nachází směšovač, ze kterého je abrazivum neustále přisáváno do pistole. Směs je následně zrychlována v pracovní trysce.

Injektorové tryskání má vhodnou aplikaci při povrchovém zušlechťování či matování skla. [10]



Obrázek 3: Princip injektorového tryskání [11]

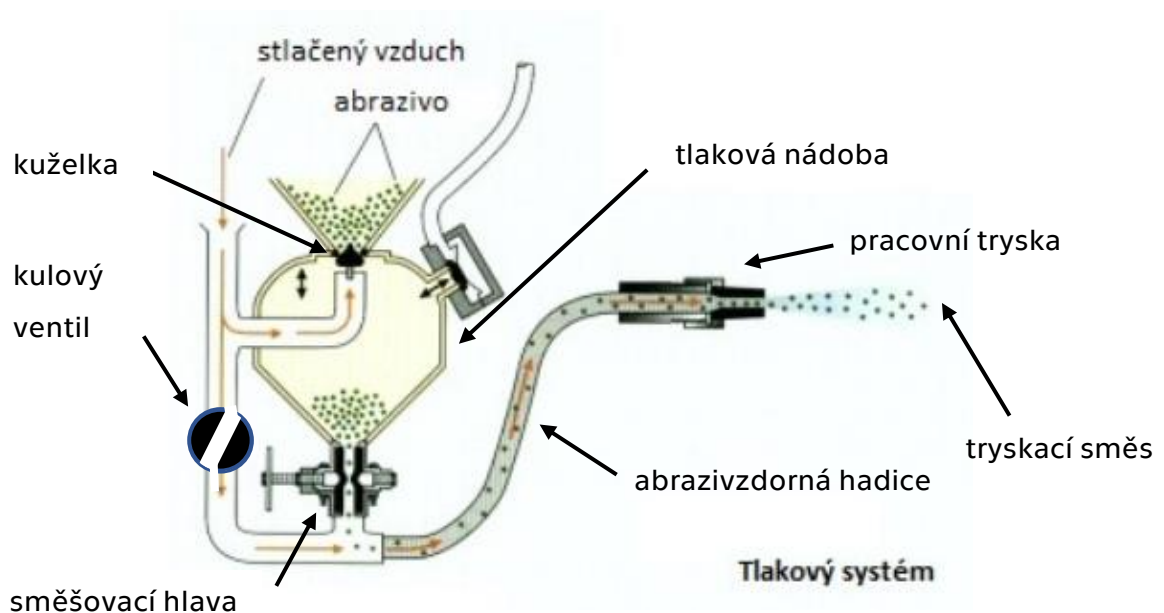
4.1.2 Tlakové tryskání

Při tlakovém tryskání se stlačený vzduch s abrazivním médiem mísí v tlakové nádobě předtím, než proudí do trysky. Z tlakové nádoby je abrazivum přetlačováno přepouštěcí tryskou ve směšovací hlavě do hadice. Tam dochází k mísení se vzduchem. Poměr mezi unášecím vzduchem a tlakovou nádobou je dán nastavením kulového ventilu. Z tohoto důvodu má abrazivum již vysokou rychlost v abrazivzdorné hadici. Metoda je díky tomu velice efektivní, protože abrazivum má již vysokou rychlost a tryska umožní ještě větší tlak (cca 3x intenzivnější než injektorový systém). [9] [11] [10]

Pracovní cyklus tlakového tryskání je diskontinuální neboli přerušovaný. To z toho důvodu, protože po vytryskání tlakové nádoby vystupuje z trysky pouze vzduch. Je potřeba tedy proces přerušit a dodat do tlakové nádoby (po odtlakování nádoby) nashromážděvané abrazivum z násypky kabiny.

Tlakovzdušné tryskání lze využít pro odstranění starých barev, čištění kovů, povrchové zpevňování (součásti s vysokým namáháním), hloubkový úběr skla nebo kamene. [10]

Techniku lze použít i při bezprašném tryskání, kde se tryskací médium a prach nedostávají do atmosféry. Při velmi citlivém povrchu se aplikuje mokré tryskání nebo tryskání sodou, popřípadě suchým ledem. [9]



Obrázek 4: Princip tlakovzdušného tryskání [11] [10]

4.2 Mechanické tryskání

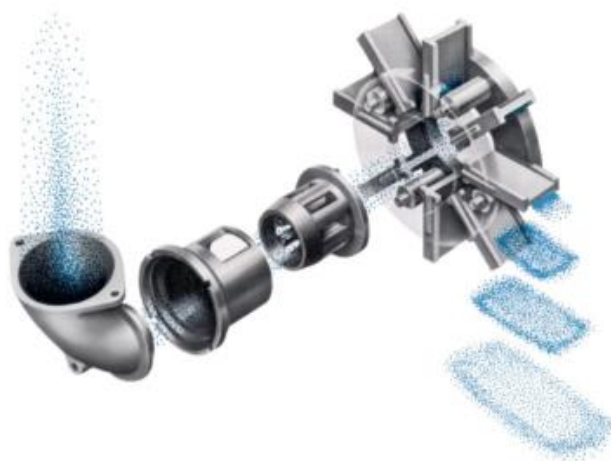
Technika mechanického tryskání využívá odstředivé tryskací kolo, které přímo přeměňuje energii elektromotorů na kinetickou energii abraziva otáčením turbínového kola. Kapacita při této technologii se pohybuje od 60 kg za minutu až po 1200 kg za minutu.

S tímto velkým množstvím abraziva nachází využití při zpevňování (shot peening), leptání nebo čištění povrchu. Používá se i tam, kde je potřeba součásti zbavit rzi, okují, popřípadě otřepů a vyčistit tak povrch velkých součástí a velkých ploch dílů. Stroje mohou být stolní, menších rozměrů až po plně automatizované stroje pro velkosériovou výrobu. [7] [8]

Ideálně se tato technologie hodí pro součásti automobilových převodovek. Konkrétní příklady využití mechanického tryskání: hřídele, ozubená kola, listové pružiny, nosníky náprav, ojnice.

Nejvhodnější jsou kovová abraziva, jako jsou ocelové broky nebo drť, řezaný drát (zinkový, hliníkový) či nerezové broky nebo drť.

Mezi největší výhody mechanického tryskání oproti pneumatickému patří rychlost, účinnost a schopnost tryskání větších součástí. [8]

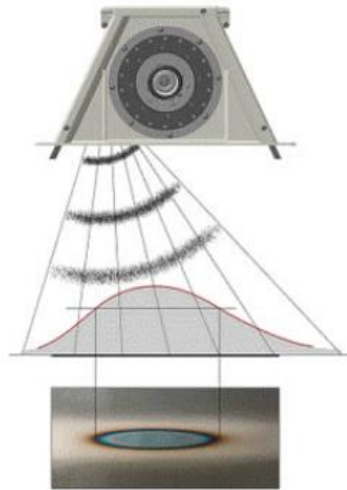


Obrázek 5: Princip mechanického tryskání [12]

Důležitou roli má metací kolo, které je unášeno pomocí elektromotoru o konkrétním výkonu. Kolo je tvořeno metacími lopatkami, které aplikují abrazivum na povrch součásti pod určitým úhlem. Proces probíhá v uzavřené

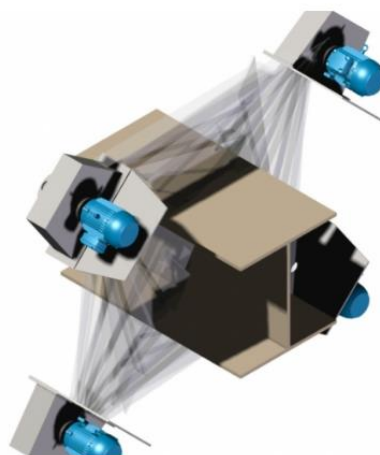
komoře, odkud se materiál odsává, recykluje a znovu doplňuje do rozdělovače (metací skříně).

Pokud je potřeba tryskat díly, které jsou náchylné na deformace, je možno vybavit stroj frekvenčním měničem. Volený abrazivní materiál je nejčastěji ocelový nebo litinový granulát, popřípadě ocelová drť. [12]



Obrázek 6: Dopad abrazivního média [12]

Pro maximální plošný záběr je možno využít hned několik metacích kol, které jsou přizpůsobena k otryskání součásti ze všech stran a úhlů. Výsledkem je požadovaná čistota nebo drsnost povrchu. [12]



Obrázek 7: Tryskač se 4 metacími koly [12]

5. TYPY TRYSKACÍCH ZAŘÍZENÍ

Typů tryskacích zařízení může být opravdu velké množství. Vyrábí se jak v sérii, tak i na zakázku pro konkrétní využití. V dnešní době převládá výroba individuálních zařízení, která jsou navržena přímo pro konkrétní aplikaci. Výrobci se zaměřují na vlastní výrobu, konstrukci i vývoj a tím dochází ke snaze najít optimální řešení (výkon tryskání, ekonomika, bezpečnost atd.).

Zařízení se vyrábí od malých ručních kabin přes tryskací boxy, stroje s metacími koly až po kompletní výrobní linky. [13]

Zařízení pro tlakovzdušné tryskání:

- Mobilní tlakové tryskací jednotky
- Injektorové tryskací kabiny
- Tlakové tryskací kabiny
- Tryskací boxy [14]

Zařízení s metacími koly: [15]

- Závěsné tryskací stroje průběžné

Umožňují kontinuální tryskání – výrobky jsou zavěšeny na dopravníku, který je možné automatizovat. Délka a typ závěsu se mohou měnit. Díky tomu je možné tryskání i rozměrných výrobků. Součást je při pohybu po dopravníku tryskána pomocí optimálně rozmístěných metacích kol ze všech stran a úhlů. Požadovaným parametrům, jako je čistota nebo drsnost povrchu docílíme provedením a nastavením metacích kol. Závěsné tryskací stroje jsou často využívány ve slévárnách. [16]

- Průběžné tryskače s válečkovým dopravníkem

Používají se nejčastěji k tryskání vstupních hutních materiálů – tryskání plechů a profilů různých tvarů a velikostí. Větší stroje umožňují tryskat i složitější svařence, ale je potřeba, aby byly schopny přepravy po válečkovém dopravníku. Délka a nosnost dopravníku je navrhována dle požadavků zákazníka.

Součásti projíždí kabinou tryskače, kde dochází k otryskání povrchu. Pokud tryskáme materiál, který je náchylný na deformaci – například plech

tloušťky menší než 4 mm, je nezbytné použít frekvenční měnič, který snižuje razanci a tím nedojde k deformaci. [17]

- Bubnové tryskače

Bubnové tryskače jsou určeny pro drobné i větší součásti, které umísťujeme na nekonečný pás bubnového dopravníku. Vyrábí se v různých velikostech, roli hraje především maximální hmotnost a objem vsázky.

Když je potřeba tryskat větší množství součástí, například odlitků, je vhodné tryskací zařízení vybavit pneumatickým nebo hydraulickým nakladačem a vibračním či pásovým dopravníkem na výstupu pro zrychlení procesu. Při tryskání součástí náchylných na deformaci je potřeba vybavit zařízení frekvenčním měničem metacích kol, který zamezuje deformaci. [18]

- Stolové tryskače

Stolové tryskače jsou určeny pro menší součástky, které se volně umístí na otočný stůl. Nezbytné je provádět i druhotné tryskání, je potřeba díl otočit a znovu tryskat, aby došlo k úpravě ze všech stran. Pokud je potřeba instalovat stolový tryskač do slévárny, je nutné ho vybavit magnetickým separátorem, z důvodu výskytu slévárenského písku na odlitcích. Odstraní ho a tím se prodlužuje životnost metacích turbín i ostatních částí zařízení. Výhodou stroje je poměrně velký prostor na tryskání a zároveň malý zástavbový prostor. [19]

- Speciální tryskáč stroje

Tyto zařízení jsou vyráběny za účelem specifických aplikací. Například pro tryskání drátu, trubek, kulatin, propanbutanových lahví, roxorů nebo řetězů.

- Tryskací stroje na tryskání tyčí, roxorů a řetězů

Zařízení mají speciální usměrňovač paprsku abraziva, díky kterému se výrazně zvyšuje výkonnost a zároveň snižují provozní náklady. Tryskané předměty jsou fixované v dané poloze vodícími prvky v kabině => efektivnost. [20]

- Tryskací stroje na tryskání trubek, kulatin a propanbutanových lahví

Tyto zařízení mají speciální typ dopravníku, který materiál posouvá a zároveň otáčí. Z toho důvodu není potřeba instalovat do stroje větší počty metacích turbín, a i tak lze docílit lepších výsledků, co se týče čistoty povrchu. Tímto řešením dochází ke značné úspoře provozních nákladů, ve srovnání s tryskači s válečkovým dopravníkem. Pomocí speciálního usměrňovače z otěruvzdorného materiálu je možné optimalizovat paprsek s abrazivními částicemi přímo na dané místo. Tím dochází ke zrychlení celého procesu a k prodloužení životnosti kabiny. [21]

6. VÝROBCI TRYSKACÍCH ZAŘÍZENÍ

Jedna z předních světových výrobců tryskacích zařízení je společnost **Wheelabrator**, která přináší řešení v oblasti tryskání více než 100 let. Je dodavatelem kompletního tryskacího sortimentu. Zaměřuje se i na navrhování a realizaci individuálních úloh i inovativních řešení. [22]

Velmi známá je i firma **Rösler**, která působí po celém světě a v oblasti tryskací techniky je aktivní více než 80 let. Zabývá se vytvořením koncepčního návrhu systému pro konkrétní tryskací proces i výrobou kompletních výrobních linek. Společnost dodává tryskací zařízení i pro letecký průmysl, které jsou navrženy tak, aby dodržovaly minimální výrobní tolerance. Specializují se na komponenty turbín, podvozků letadel a strukturální díly. Právě tyto komponenty jsou vystaveny proměnlivě vysokému zatížení, a proto je shot peening z bezpečnostních důvodů nutný. Opracování povrchu těchto velmi důležitých leteckých komponentů je prováděno z důvodu předcházení únavě materiálu (prodloužení životnosti). Spočívá ve vytvoření specifické povrchové vrstvy. [23]

Z řad českých výrobců je známá dynamicky se rozvíjející společnost **Spolmont**, která se zabývá tlakovzdušným i mechanickým tryskáním. Navrhuje pracoviště od malých kabinových zařízení až po velké technologické celky. [24]

Dalším českým výrobcem je společnost **1.Toušeňská**, která je na trhu více než 20 let a vyrábí řadu výrobků od volného tryskání, ručních kabin přes tryskací komory až po specializované automatické zařízení. U základních strojů společnost klade důraz především na variabilitu stroje, pracnost čištění a jednoduchost obsluhy. [25]

Částečně se tryskáním zabývá i česká firma **SAF**, která od roku 1991 dodává kusové zařízení i kompletní technologické zařízení v podobě souboru strojů. Nabízí: mobilní tryskací jednotky, pneumatické tryskací boxy, tlakovzdušné tryskací komory, tryskací stroje s metacími koly a tryskací abraziva. [26]

Významná je i americká společnost **Metal Improvement Company**, která sice nedodává tryskací zařízení, ale umožňuje na svých strojích vyhotovení zakázek. Jedná se o společnost, která od roku 1968 patří pod společnost **Curtiss–Wright Surface Technologies (CWST)**, která se od roku 1946 zabývá plastickým zpracováním ocelových prvků. Tím umožňuje zvýšit pevnostní vlastnosti

materiálů (zpevnění, zvýšená únavová pevnost). Společnost nabízí vysoce propracovaná řešení, která pomáhají předcházet nežádoucím předčasným poruchám, které mohou vzniknout provozováním v drsných prostředích. Jedná se převážně o únavu, korozi, opotřebení, zadření a tření. Cílem je dosažení maximálního potenciálu materiálů. Mezi nabízené technologie společnosti patří shot peening, laser peening, povlakování a testování včetně analýzy materiálů.
[27] [28]

7. TRYSKACÍ MÉDIA









Při tryskání abrazivní médium plní funkci nástroje. Jedná se o volně tekoucí zrnitý nástroj z pevných částic. Mohou být kovová, nekovová anorganická nebo nekovová organická. Výběr abraziva ovlivňuje i čistotu Sa a drsnosti povrchu Ra, Rz. [2] [13]

7.1 Vlastnosti abraziv

Vlastnosti abrazivních materiálů mohou být rozděleny následovně:

- Základní
 - Druh materiálu
 - Tvar zrna
 - Velikost zrna
 - Odolnost zrna vůči opotřebení
- Mechanické:
 - Tvrdost
 - Pevnost v tahu (u řezaného drátu)
- Technologické:
 - Schopnost úběru materiálu
 - Efekt zdrsnění [2]

Tabulka 3: Základní vlastnosti tryskacích prostředků [2]

Materiál	Velikost zrna	Tvar	Hustota [kg*dm ⁻³]	Tvrdost [Mohs]	Křehkost	Trvanlivost	Původ
Křemičitý písek	6–270		1,66	5,0–6,0	vysoká	1	přírodní
Minerální struska	8–80		1,4–1,86	7,0–7,5	vysoká	1–2	vedlejší produkt
Ocelová drť	10–325		3,83	8,0	nízká	200+	vyrobený
Ocelové broky	8–200		4,6	8,0	nízká	200+	vyrobený
Korund	12–325		2,08	9,0	střední	6–8	vyrobený
Karbid křemíku	12–325		1,83	9,5	střední	5–6	vyrobený
Balotina	10–400		1,4–15	5,5–6,0	střední	8–10	vyrobený
Plast	12–80		3,0–4,0	3,0–4,0	nízká/střední	8–10	vyrobený

Nejvíce využívaná abraziva pro zpevnění povrchu

- Ocelové kuličky (broky)

Kulaté ocelové kuličky typu S jsou vyrobeny ze speciálně tepelně zpracované nadeutektoidní oceli. Struktura je tvořena temperovaným martenzitem, který je optimální z hlediska elasticity a odolnosti proti únavě. [2]

Chemické složení: $C - 0,75 - 1,20 \%$
 $Mn - 0,60 - 1,10 \%$
 $Si - 0,60 - 1,10 \%$
 $P - \text{max } 0,04 \%$
 $S - \text{max } 0,04 \%$
[2]



Obrázek 8: Ocelové broky [39]

- Balotina

Jedná se o skleněné mikrokuličky, které jsou inertním materiálem, proto při použití tohoto abraziva nedochází k reakci s otryskaným povrchem. Výhodou tohoto materiálu je jeho ekologická nezávadnost. [2]

Chemické složení: $SiO_2 - \text{min. } 65,0 \%$
 $Na_2O - \text{min. } 14,0 \%$
 $CaO - \text{min. } 8,0 \%$
 $MgO - \text{min. } 2,5 \%$
 $Al_2O_3 - \text{min. } 0,5 - 2,0 \%$
 $Fe_2O_3 - \text{max. } 0,15 \%$
 $Ostatní - \text{max. } 2,0 \%$
[2]

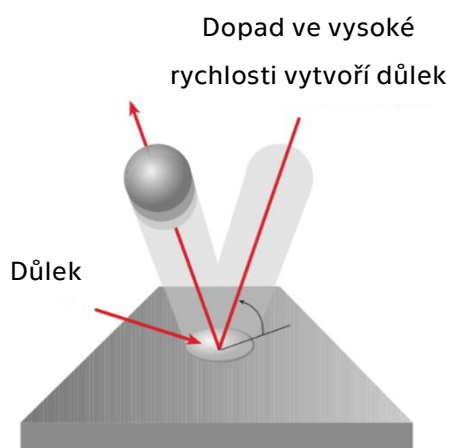


Obrázek 9: Skleněné kuličky [2]

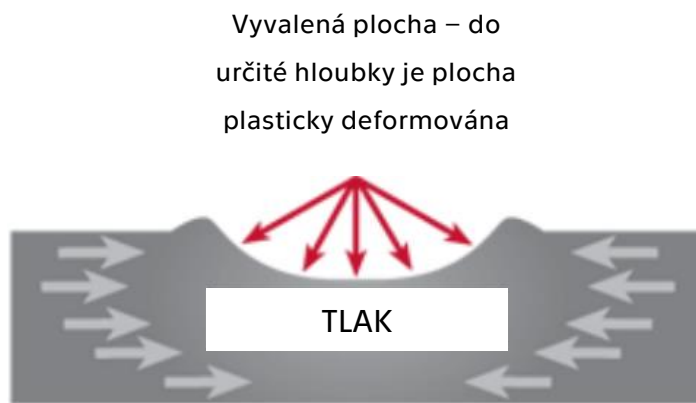
- Keramické kuličky
- Sekaný drát [2]

8. SHOT PEENING

S metodou shot peening se v češtině lze setkat jako s technologií kuličkování či brokování. Jedná se o metodu řízeného tryskání, při které dochází k tváření za studena. Princip metody spočívá v tryskání proudu zvoleného média na povrch součásti, kde při dopadu kuličky vytvoří důlek a tím povrchovou vrstvu plasticky deformují. Materiál má tendenci se vracet do předchozího stavu, a tím vznikají polokoule s vysokým napětím. Mezi nejčastěji volené médium patří ocelové, skleněné nebo keramické kuličky. Využití nachází nejvíce v leteckém či kosmickém průmyslu, protože součásti mají zvýšenou odolnost vůči opotřebení, korozi, i zvýšené únavové vlastnosti. Mimo to dokáže shot peening zlepšit texturu povrchu, narovnat zdeformované části nebo uzavřít pórovitost. Mezi konkrétní příklady využití metody shot peening patří listové a vinuté pružiny, kde dochází ke zvýšení životnosti až o 1000 %. Dále se využívá pro hřídele, ozubená kola nebo podvozky letadel. [29] [30] [31]

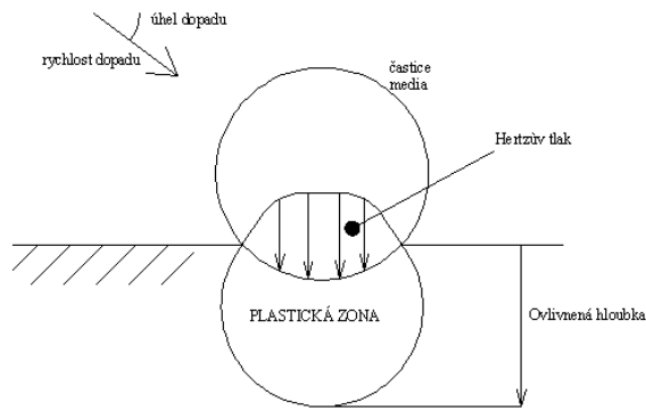


Obrázek 10: Dopad kuličky na povrch [31]



Obrázek 11: Vyvalená plocha po dopadu kuličky [30]

Po shot peeningu se neprovádí žádné další operace, které by měly za následek uvolnění napětí vytvořeného právě touto metodou. [30]

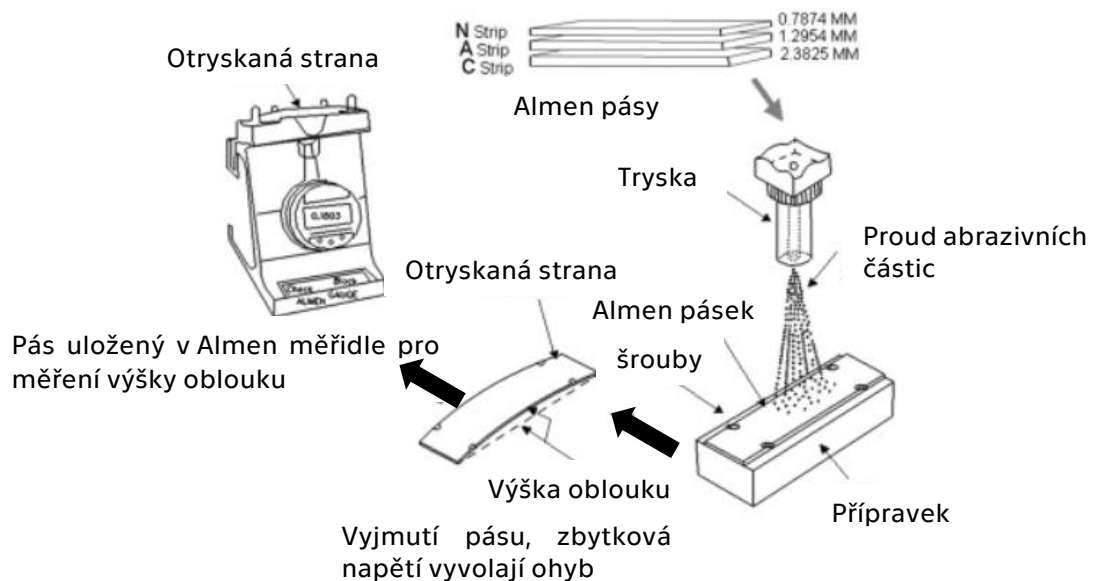


Obrázek 12: Ovlivnění hloubky materiálu [30]

8.1 Procesní kontrola shot peeningu

U tlakovzdušného tryskání se pojem intenzita tryskání, která má vliv na míru zpevnění, úzce pojí s termínem úplného pokrytí povrchu. Intenzita je mírou energie tryskacího paprsku, která souvisí s tlakovým napětím vnášeného do povrchu.

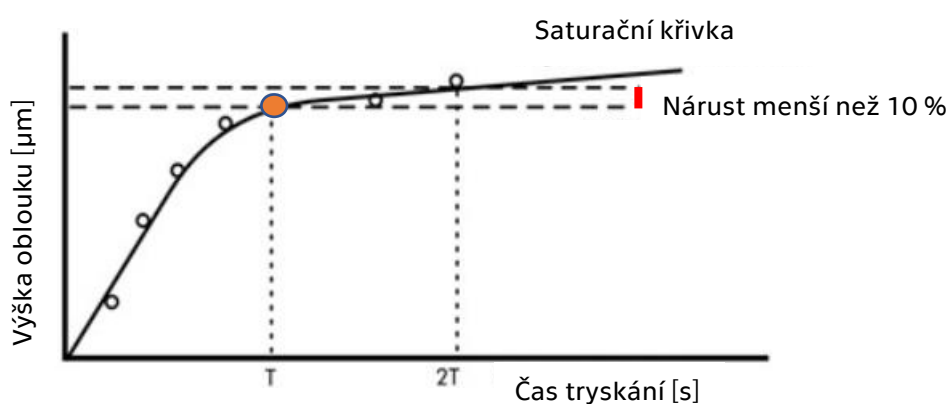
K intenzitě tryskání se pojí Almen pásy, které se využívají k měření podle metody J. O. Almena. Jsou vyrobeny z oceli SAE 1370, válcované za studena, kalené a popuštěné na tvrdost 44–50 HRC. Rozměry pásu jsou 76,2 x 19,05 mm (normalizované). Pro pás typu N je normalizovaná tloušťka 0,787 mm, pro pás A 1,29 mm a pro pás C 2,38 mm.



Obrázek 13: Procesní kontrola shot peeningu – Almen test [41]

Almen pásy jsou vystaveny otryskání z jedné strany. Tryskací médium po dopadu na povrch způsobuje deformaci ohybem. Výška průhybu je úměrná intenzitě tryskacího abraziva. S větší tloušťkou pásu klesá výška oblouku, proto se doporučuje využívat Almen pás typu N.

Při dlouhodobém vystavení proudu abrazivních částic se výška oblouku zvyšuje do bodu saturace (stabilizace). **Bod saturace** je definován jako bod, kdy zdvojnásobení času tryskání má za následek zvýšení výšky oblouku Almen pásu do 10 %. Bod má nutně dvě souřadnice, jedna udává dobu tryskání a druhá výšku oblouku, o které víme, že se při zdvojnásobení času zvýší o 10 %. [2] [32]



Obrázek 14: Saturační křivka [40]

8.2 Stanovení pokrytí povrchu – intenzita tryskání

Kontrola pokrytí povrchu se v praxi provádí s využitím fluorescenčních kapalin, které se nanosou na povrch základního materiálu. Po otryskání probíhá kontrola pomocí ultrafialového světla. Na nedostatečně otryskaném povrchu je vidět pozůstatek fluorescenční kapaliny. Pokrytí povrchu tryskáním je dáno stupněm odstranění indikátoru. Obecně lze říci, že pokrytí povrchu se lineárně zvětšuje s časem. [2]

9. CHARAKTERISTIKY KVALITY POVRCHU PO TRYSKÁNÍ

Povrch vytvořený tryskáním při opakovaném zatěžování nabývá plastické deformace, vlivem toho se mění vlastnosti povrchové vrstvy. Především geometrické charakteristiky, strukturní vlastnosti, stav napjatosti, a dochází i k tepelnému ovlivnění materiálu. Tryskáním lze docílit určitých modifikovaných technologických a mechanických vlastností. Jedná se především o houževnatost, odolnost proti únavě a otěru. Proces tryskání je třeba chápat jako proces povrchové deformace nebo elasticko-plastické deformace materiálu v jeho plném objemu.

Kvalita povrchu po otryskání je charakterizována těmito vlastnostmi:

- a) Geometrický tvar tryskaného povrchu – mikrogeometrie, objem povrchu, skutečná velikost povrchu
- b) Stav otryskaného povrchu – plastická deformace, zpevnění, tepelný účinek, strukturální změny, změny mechanických a technologických vlastností, zbytková napětí
- c) Čistota povrchu [2]

9.1 Plastická deformace tryskaného materiálu

Tryskací médium dopadá na povrch materiálu a v místě dopadu je materiál plasticky deformován. Část energie abraziva se při dopadu přemění v teplo, které je odvedeno povrchem materiálu. Následky plastické deformace jsou v oblasti změn povrchového mikroreliéfu, struktury, zpevnění a vzniku napětí.

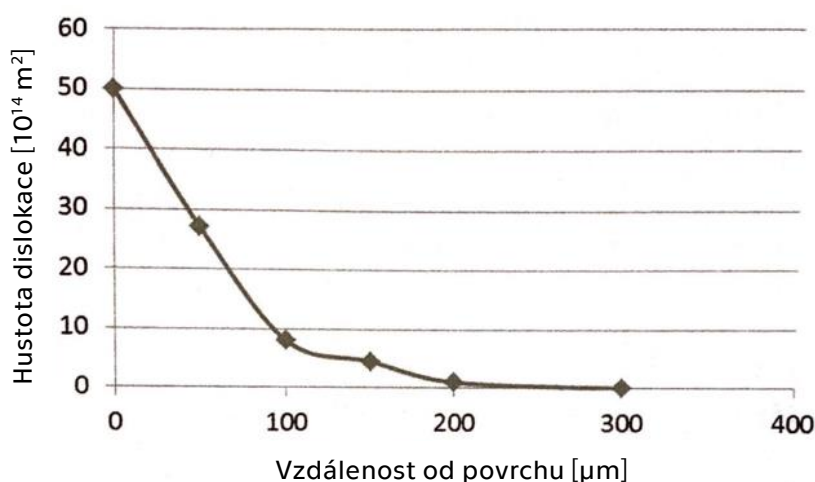
Hodnocení plastické deformace probíhá pomocí mikroskopie, kdy se měří tloušťka plasticky deformované vrstvy, popřípadě měřením mikrotvrdosti, které je důležitým ukazatelem vzájemného vlivu správné plastické deformace, zpevnění materiálu, zbytkového napětí a tepelného účinku.

K plastické deformaci dochází pohybem dislokací jedním ze dvou mechanismů – skluz nebo dvojčatění. Mechanismus se odvíjí od krystalografické struktury kovů a stavu plastické deformace. Tloušťka plasticky deformované vrstvy je ovlivněna vlastnostmi základního materiálu, dopadovou rychlostí tryskacího prostředku, velikostí zrna, tvrdostí základního materiálu a abraziva. [2]

9.2 Zpevnění materiálu tryskáním

Zpevnění je výsledek plastické deformace a představuje změnu materiálových vlastností. Souvisí s tím obtížnější vytváření dislokací anebo omezený pohyb dislokací. To se projevuje na pevnosti materiálu, v povrchové vrstvě dochází ke zvýšení pevnosti.

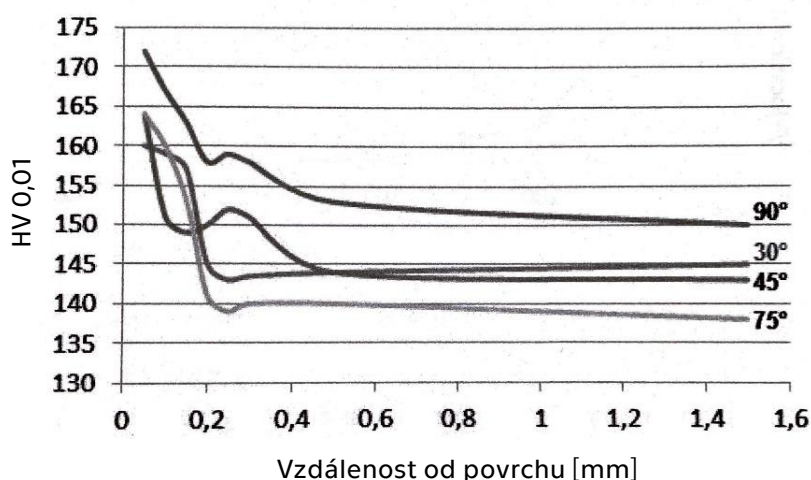
Povrch po otryskání je charakteristický zbytkovým tlakovým napětím a extrémně vysokou hustotou dislokací. [2]



Obrázek 15: Hustota dislokací v povrchové vrstvě po otryskání – Materiál SAE 1045 [2]

Vliv procesních parametrů na zpevnění:

Stejně tryskací médium vytváří různé výsledky při použití odlišných volených parametrů – velký vliv má rychlost abraziva a úhel dopadu. [2]



Obrázek 16: Vliv úhlu dopadu na mikrotvrdost tryskaného materiálu, abrazivo SG (0,71 mm) [2]

9.3 Tepelný účinek tryskání

Část energie se při dopadu na povrch součásti podílí na vývoji tepla (až 90 %). To vzniká v místě dopadu tryskacího materiálu přeměnou deformační energie v plastickou deformaci a vlivem tření. Rozhodující vliv na tepelný účinek má rychlost deformace, respektive velikost. Při tryskání dochází k vysoké rychlosti tryskacího abraziva (100 m/s). Teplota základního materiálu klesá se zvyšující se vzdáleností od povrchu. [2]

9.4 Strukturální změny po tryskání

Strukturální změny závisí na době tryskání. Plastická deformace a napětí v povrchových vrstvách vytváří vhodné podmínky pro fázové přeměny oceli a částečně i pro přeměnu zbytkového austenitu. S rostoucí dobou tryskání klesá obsah zbytkového austenitu ve zpevňovací vrstvě. [2]

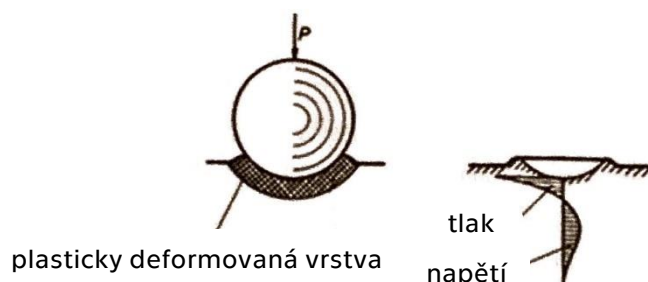
9.5 Změny mechanických a technologických vlastností

Každý proces, kde dochází k plastické deformaci, má za následek změnu mechanických a technologických vlastností. Na základě již realizovaných experimentů lze konstatovat, že procesem tryskání lineárně roste pevnost v tahu a mez kluzu. Snižuje se tažnost. Co se týče rázové houževnatosti, ta zůstává téměř beze změny. Dochází ke zvýšení únavové pevnosti.

Při zvýšení velikosti zrna tryskacího média a zároveň snížení tloušťky plechu dochází ke snížení tažnosti. Proces tryskání má vliv na růst únavových trhlin. Kromě již zmíněných primárních dopadů tryskání na základní materiál se vyskytují i druhotné účinky. Mezi ně lze zařadit zbytková napětí, která vznikají v závislosti na plastické deformaci, změny mikrogeometrie povrchu a čistotu povrchu. Všechny důsledky závisí na kinetické energii tryskaného abraziva. [2]

9.6 Zbytková napětí

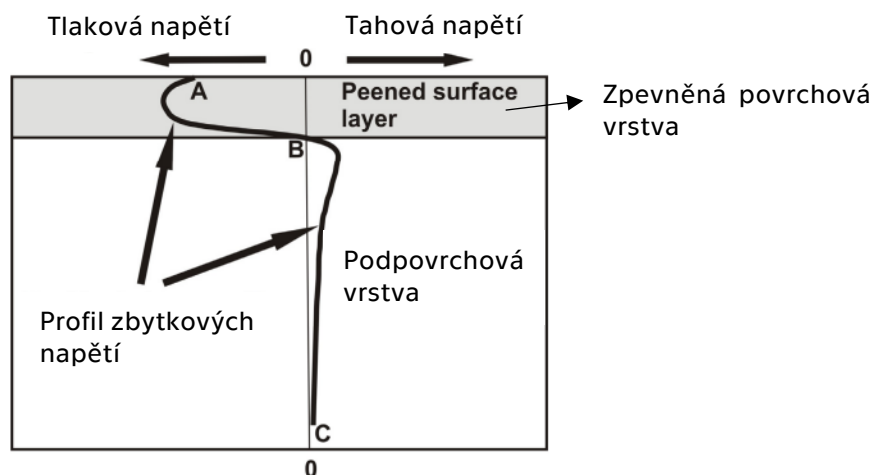
Zbytková napětí mají velký vliv i na vlastnosti tryskaných materiálů. Jedná se o napětí, která se vyskytují bez působení vnějších sil. Rozhodující je jejich velikost a rozložení, kvůli dalšímu zpracování a zatěžování materiálu. Zbytková napětí jsou výsledkem narušení rovnovážných sil na povrchu – způsobených vnějšími silami. [2]



Obrázek 17: Model zbytkových napětí po otryskání [2]

V určité hloubce napětí v materiálu nepřesáhne mez kluzu a po uvolnění se pružně deformovaná oblast vrátí zpět do původního stavu. Po dosažení určité úrovně deformace, která vede k vytvoření maximálních zbytkových napětí v plasticky deformované povrchové vrstvě, dochází k postupnému snižování těchto napětí na povrchu. Velikost zbytkového napětí je závislá na hloubce zesílené vrstvy, ve které působí, a u tvrdých materiálů může dosahovat hodnot 60–80 MPa. [2]

Na obrázku 18 lze vidět křivku zbytkových napětí. Křivka (AB) znázorňuje průběh tlakových napětí. Je patrné, že maximální tlaková zbytková napětí se nachází v plasticky deformované povrchové vrstvě. Minimální, nulové je v oblasti

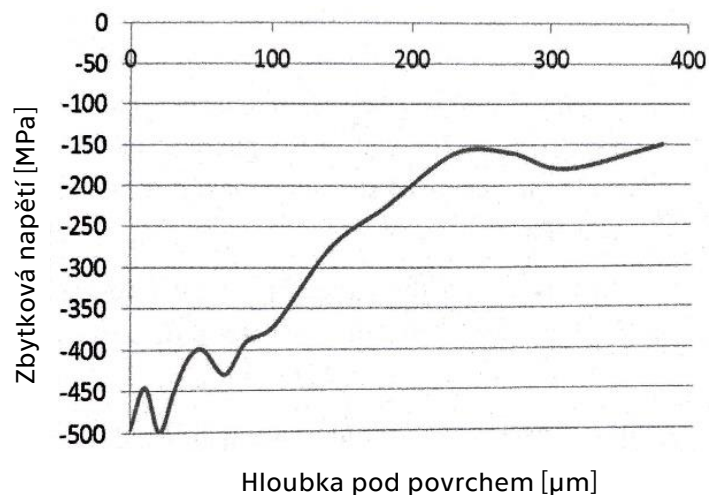


Obrázek 18: Profil zbytkových napětí [33]

maximální hloubky plastické deformace. [33]

Zbytková napětí se rozdělují podle velikosti oblasti působení do tří typů.

- 1) Zbytková napětí I. typu – makroskopická
Jsou přibližně homogenní na makroskopické úrovni – ve velké oblasti.
- 2) Zbytková napětí II. typu – mikroskopická
Jsou homogenní v oblastech srovnatelných s velikostí jednotlivých krystalků.
- 3) Zbytková napětí III. typu
Jsou nehomogenní i v nejmenších oblastech materiálu (meziatomové vzdálenosti). [2]



Obrázek 19: Zbytková napětí tryskané oceli SAE 1045 v závislosti na hloubce povrchové vrstvy [2]

Pro stanovení zbytkových napětí lze využít přímou experimentálně–výpočtovou metodu, avšak tato metoda je použitelná pouze při uvážení určitých zjednodušení a nezahrnuje všechny efekty související s materiálovými změnami během procesu tryskání. Byly také provedeny experimentální práce zaměřené na detekci vnitřních napětí pomocí Almenovy zkoušky, zkoušky mikrotvrdoti a mechanických tahových zkoušek. [2]

Metody měření zbytkových napětí jsou založené na principu měření deformace:

- Metoda založená na změně napětí tryskaného materiálu měřené před a po odstranění povrchové vrstvy chemickým leptáním
- Tenzometrická metoda výpočtů
- Almenova zkouška
- Rentgenová tenzometrie
- Ultrazvuková metoda

Při Almen testu měříme zbytkové napětí z průhybu vzorků. [2]

10. PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části se bakalářská práce zaměřuje na intenzitu zpevnění povrchu pomocí ručního tlakovzdušného tryskacího zařízení. K provedení experimentu bylo využito injektorové tryskacího zařízení PEENMATIC 620 S od Švýcarské firmy IEPCO AG a vzduchový kompresor Mattei Blade SE 5L. Pro měření průhybu tryskaného vzorku byl využit digitální mikroskop Keyence VHX 6000.

Pro experiment se využívá tryskací abrazivum SDK 0,4 B, 400 μm , konkávní, ocel. Cílem experimentu je zjistit vliv vzdálenosti a použitého tlaku na výsledné zpevnění nerezového plechu AISI 304L. Velikost zpevnění je hodnocena podle měření uvolněné deformace po elektrolytickém leštění tryskaného místa.

10.1 Zkušební materiál

Jako zkušební vzorky byly vyrobeny pásy z nerezové oceli AISI 304L o rozměrech 76x19 mm a o tloušťkách 1 a 2 mm. Materiál AISI 304L, někdy označován jako W.Nr. 1.4307 nebo X2CrNi 18-9, je austenitická nerezová ocel, která se oproti materiálu AISI 304 liší pouze nižším obsahem uhlíku. Typ 304 je nejrozšířenější a nejvíce univerzální druh nerezové oceli. Je vhodný pro tváření za studena, například pro hluboké tažení a také pro leštění. Typ 304L s nižším obsahem uhlíku nachází využití především ve výrobě náročných součástí, protože vyniká lepší svařitelností. Vyniká i dobrou obrobiteľnosť, ale je potřeba mít řezné hrany stále ostré, aby nedocházelo k nadměrnému mechanickému zpevňování. [34] [35]

Tabulka 4: Chemické složení nerezové oceli AISI 304L [34] [35]

Chemický prvek	Hmotnostní podíl
Uhlík (C)	≤ 0,03 %
Chrom (Cr)	17,5–19,5 %
Mangan (Mn)	≤ 2,00 %
Křemík (Si)	≤ 1,00 %
Fosfor (P)	≤ 0,045 %
Síra (S)	≤ 0,03 %
Nikl (Ni)	8,0–10,5 %
Dusík (N)	≤ 0,10 %
Železo (Fe)	zbytek

Hustota materiálu je 8000 kg/m³. K tání dochází při teplotě 1450 °C. Modul pružnosti má hodnotu 193 000 Pa. Pevnost v tahu se pohybuje v rozmezí 500–700 MPa. Tvrdost je maximálně 215 HB. [35] [36]

Materiál AISI 304L má vynikající odolnost proti korozi v mnoha prostředích a při kontaktu s různými druhy korozivních látek. V prostředích, kde se nerezová ocel dostane do kontaktu s chloridy, může dojít k důlkové a štěrbinové korozi. Při teplotách vyšších než 60 °C může dojít k praskání korozi pod napětím. [35]

Využití nachází v automobilovém průmyslu, chemickém průmyslu, potravinářském průmyslu, leteckém a kosmickém průmyslu, ve strojírenství a v neposlední řadě v architektuře. [34]

11. NÁVRH METODIKY EXPERIMENTU

Pro provedení experimentu bylo nejprve nutné zajistit požadovanou vzdálenost od povrchu. K tomu bylo potřeba navrhnout přípravek na trysku, který umožní variabilní nastavení vzdálenosti trysky od povrchu. K výrobě přípravku byl využit plech o tloušťce 2 mm, závitová tyč M8, 4x matice M8 a 4x příslušná podložka jmenovité velikosti 8 mm.



Obrázek 20: Přípravek na trysku

Pro trvalé značení vzorků byl využit elektrický popisovač na kovy, který umožňuje gravírovat v různých tloušťkách požadovaný povrch.

Všechny vzorky jsou před tryskáním připevněny do přípravku na uchycení vzorků. Přípravek je navržen pro rychlé upnutí a vyjmutí s předem definovanou oblastí pro tryskání.



Obrázek 21: Přípravek na uchycení vzorků

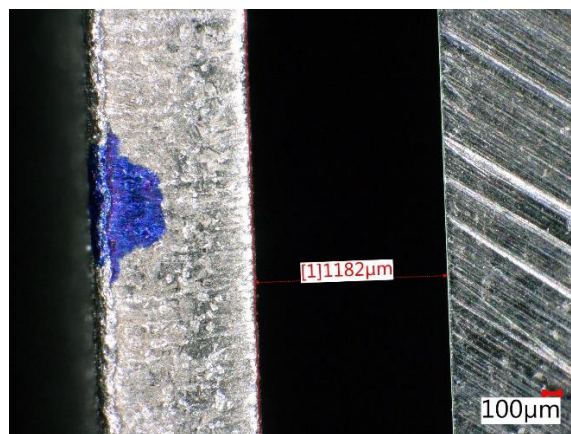
12. PROVEDENÍ EXPERIMENTU

Začátek experimentu spočívá ve zjištění doby tryskání pro maximální efekt zpevnění. Abychom zjistily tento parametr, je potřeba zjistit saturační křivku. K testu je zvoleno 6 vzorků o tloušťce 1 mm, což je dostatečný počet pro vyhodnocení. Dále jsou zvoleny parametry – vzdálenost 50 mm, tlak 7 baru.

První vzorek je vystaven proudu abrazivních částic po dobu 5 sekund, aby došlo k plnému pokrytí. U dalších vzorků je následně čas prodlužován. Vyhodnocení průhybu provádíme na digitálním mikroskopu Keyence VHX 6000.



Obrázek 22: Vyhodnocování průhybu

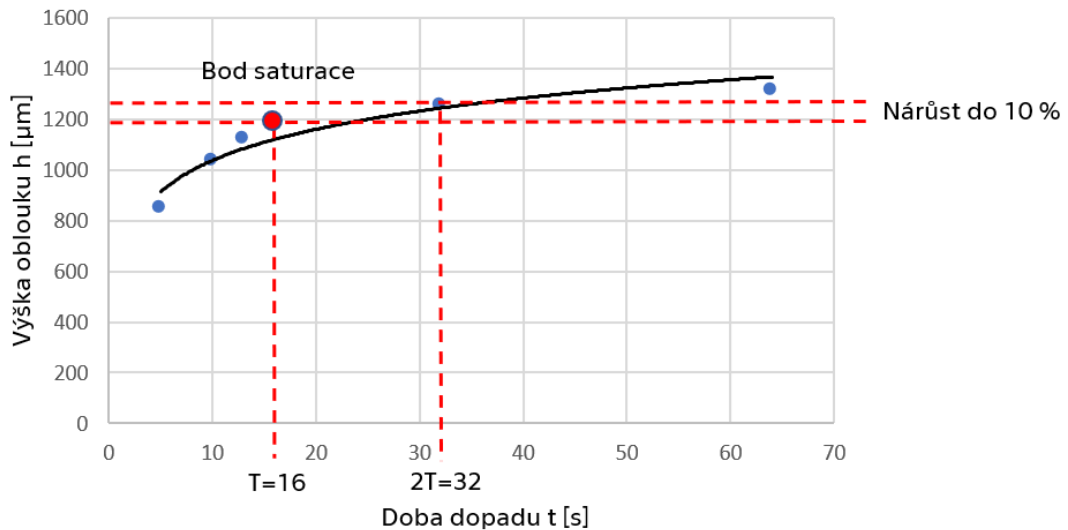


Obrázek 23: Měření vzorku

Tabulka 5: Naměřené hodnoty průhybů v závislosti na čase

Tryskání č.	Čas [s]	Výška h [μm]
1	5	850
2	10	1039
3	13	1124
4	16	1182
5	32	1256
6	64	1314

Z experimentu nám plyne, jak je vidět na následující saturační křivce, že k bodu saturace dochází při čase 16 sekund. Z těchto zkušeností volíme pro další pokračování experimentu dobu tryskání 30 sekund, aby došlo k maximálnímu efektu zpevnění.



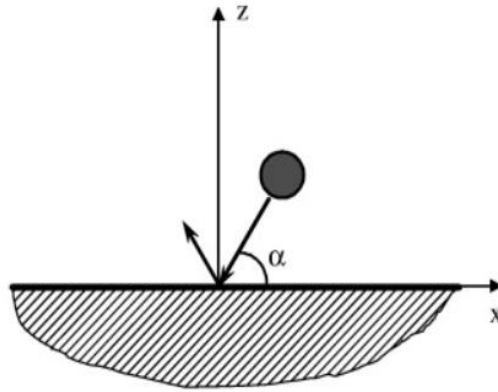
Graf 1: Saturační křivka pro materiál AISI 304L

12.1 Vliv parametrů

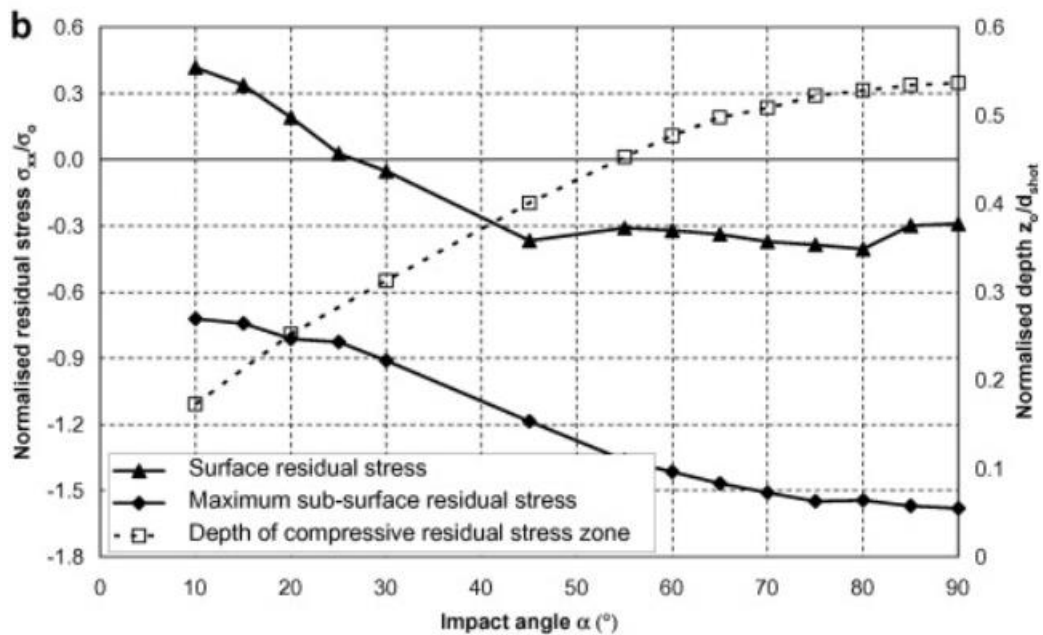
Další část experimentu spočívá ve zjištění vlivu tlaku a vzdálenosti na výsledné zpevnění a navržení optimálních tryskových parametrů.

Vliv na výsledné zpevnění má i úhel dopadu. Studie uvádí, že právě povrchové zbytkové napětí, maximální podpovrchové zbytkové napětí a hloubka oblasti tlakového zbytkového napětí se mění s úhlem dopadu abrazivních částic. Pro experiment, který uvádí studie, byla stanovena dopadová rychlost abraziva $v = 75 \text{ m/s}$. Na základě testu došlo ke zjištění, že pro nejprospěšnější tlaková zbytková napětí je nejprůzračnější dopad pod úhlem $\alpha = 90^\circ$. Pro úhel dopadu $\alpha = 75\text{--}90^\circ$ hodnota tlakového zbytkového napětí a hloubka oblasti zbytkového napětí zůstala téměř konstantní. [1]

Pokles úhlu dopadu α ze 75° na 10° způsobil snížení maximálního podpovrchového zbytkového napětí z $1,5\sigma_0$ na $0,7\sigma_0$ a současně se snížila i hloubka zóny tlakového zbytkového napětí z $0,52d$ na $0,17d$ dopadající abrazivní kuličky. Na základě výsledků studie je zvolen pro náš experiment úhel dopadu $\alpha = 90^\circ$. [1]



Obrázek 24: Dopad abrazivního média pod úhlem α [1]



Obrázek 25: Vliv úhlu dopadu α [1]

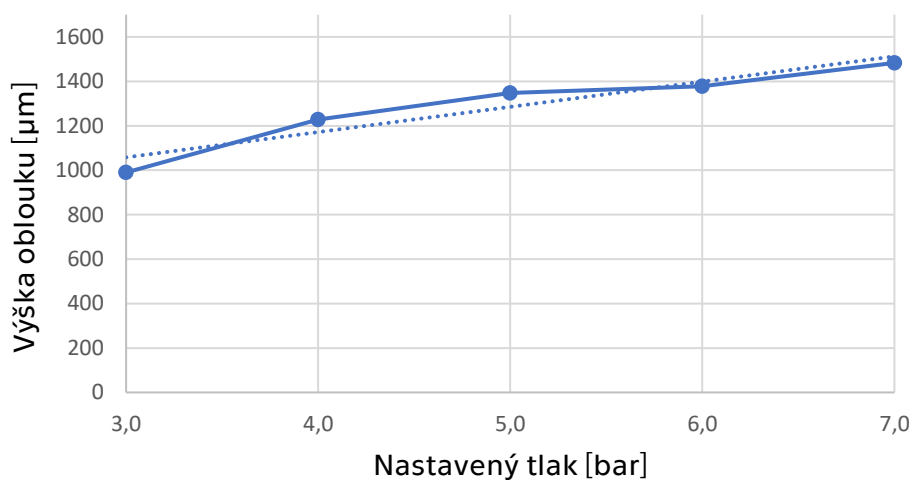
Na obrázku je zaznamenaný průběh povrchového zbytkového napětí, průběh maximálního podpovrchového zbytkového napětí a hloubka oblasti tlakového zbytkového napětí v závislosti na úhlu dopadu α .

12.1.1 Tlak

Tlak proudu abrazivních částic má vliv na míru zpevnění. Pro měření vlivu tlaku je využito 5 zkušebních vzorků o tloušťce 1 mm. Pro první vzorek je tlak nastaven na 3 bary. Ostatní parametry jsou shodné pro všechny vzorky – čas tryskání 30 s, vzdálenost trysky 50 mm. Pro další vzorky se tlak zvyšuje po jednom baru. Poslední pátý vzorek je tryskán maximálně možným tlakem, což umožňuje tryskací zařízení, a to 7 bary. Výsledná výška průhybu je následně vyhodnocována na digitálním mikroskopu.

Tabulka 6: Naměřené hodnoty průhybů v závislosti na použitém tlaku

Vliv tlaku (zkušební vzorky o t = 1 mm)				
č. měření	Doba expozice [s]	Vzdálenost trysky [mm]	Nastavený tlak [bar]	Výsledná výška oblouku [μm]
1	30	50	3,0	990
2	30	50	4,0	1228
3	30	50	5,0	1347
4	30	50	6,0	1378
5	30	50	7,0	1483

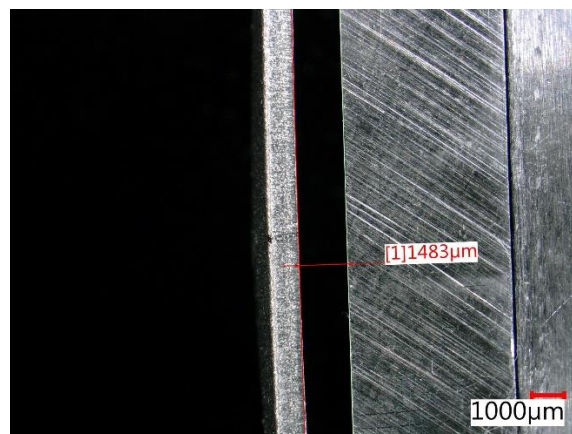


Graf 2: Vliv tlaku tryskacího abraziva na míru zpevnění

Míra zpevnění lineárně roste se zvyšujícím se tlakem. K největšímu zpevnění dochází při tlaku 7 baru. Naměřená výška průhybu dosahuje 1483 μm. Jak velkého zpevnění se dosáhlo je následně vyhodnocováno měřením uvolněné deformace po elektrolytickém leštění. Projevuje se zde i významně peen forming, jak je možno vidět na obrázcích.



Obrázek 26: Tryskání při 3 barech



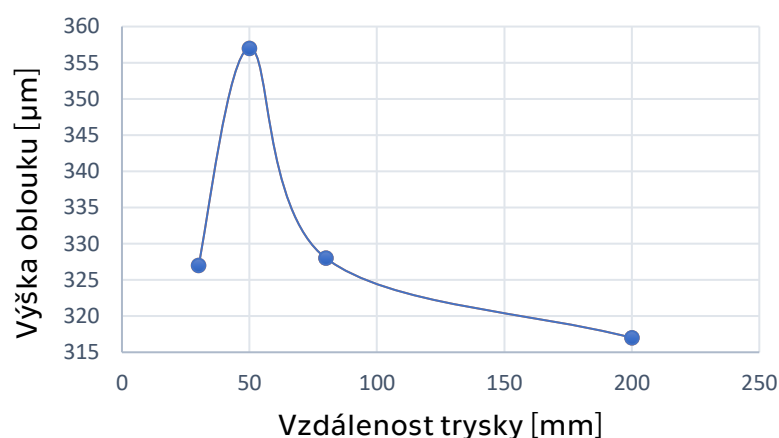
Obrázek 27: Tryskání při 7 barech

12.1.2 Vzdálenost

Vzdálenost trysky od povrchu má vliv na míru zpevnění. Pro měření vlivu vzdálenosti trysky jsou využity 4 zkušební vzorky o tloušťce 2 mm. Pro první vzorek je nastavena 30 mm vzdálenost trysky od povrchu. Ostatní parametry jsou shodné pro všechny vzorky – čas tryskání 30 s, tlak o velikosti 7 baru. Pro další vzorky je volena vzdálenost 50, 80 a 200 mm. Výsledná výška průhybu vzorku je vyhodnocována na digitálním mikroskopu.

Tabulka 7: Naměřené hodnoty průhybů v závislosti na vzdálenosti pro vzorky o $t = 2$ mm

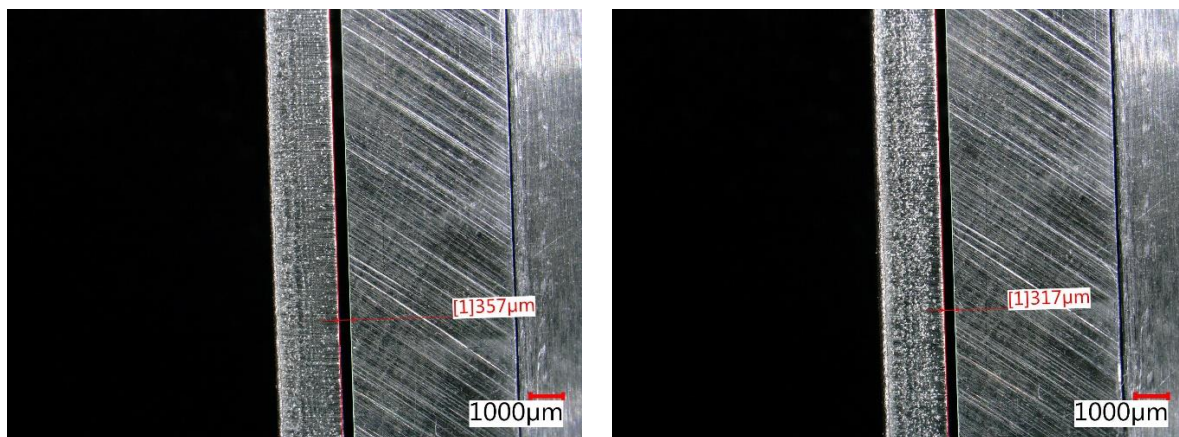
Vliv vzdálenosti trysky (zkušební vzorky o $t = 2$ mm)				
č. měření	Doba expozice [s]	Nastavený tlak [bar]	Vzdálenost trysky [mm]	Výsledná výška oblouku [μm]
1	30	7,0	30	327
2	30	7,0	50	357
3	30	7,0	80	328
4	30	7,0	200	317



Graf 3: Vliv vzdálenosti trysky od povrchu na míru zpevnění (vzorky o $t = 2$ mm)

K největší míře zpevnění dochází při tryskání ze vzdálenosti 50 mm. Při zvětšující se vzdálenosti intenzita zpevnění klesá. K nižšímu průhybu došlo i u měření číslo 1, kdy byl vzorek tryskán ze vzdálenosti 30 mm. Je to pravděpodobně způsobeno vlivem malé vzdálenosti od povrchu a odrazem abraziva.

Porovnání tryskaných vzorků pod digitálním mikroskopem:



Obrázek 28: Vzdálenost 50 mm

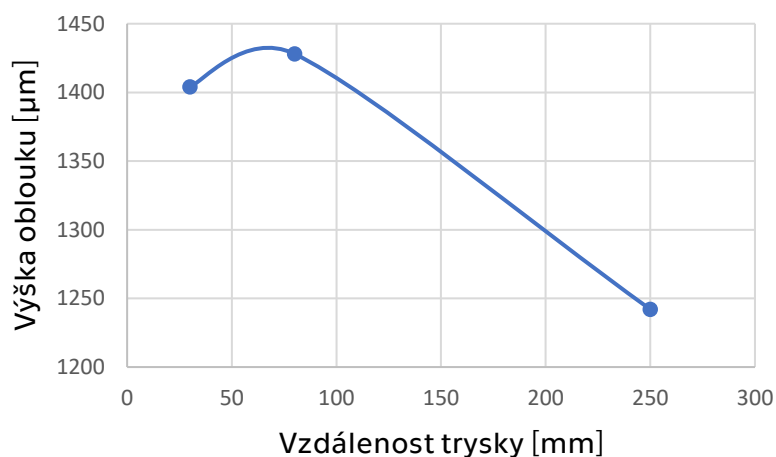
Obrázek 29: Vzdálenost 200 mm

Jelikož nedošlo při zkoumání vlivu vzdálenosti se vzorky o tloušťce 2 mm k výrazným změnám v průhybu, bylo potřeba pro ověření měření opakovat s tenčími vzorky.

Pro ověření byly použity tři zkušební vzorky o tloušťce 1 mm. Pro první vzorek je nastavena 30 mm vzdálenost trysky od povrchu. Ostatní parametry jsou shodné pro všechny vzorky – čas tryskání 30 s, tlak o velikosti 7 baru. Druhý vzorek je tryskán ze vzdálenosti 80 mm. U posledního vzorku je vzdálenost nastavena na 250 mm.

Tabulka 8: Naměřené hodnoty průhybů v závislosti na vzdálenosti pro vzorky o $t = 1$ mm

Vliv vzdálenosti trysky (zkušební vzorky o $t = 1$ mm)				
č. měření	Doba expozice [s]	Nastavený tlak [bar]	Vzdálenost trysky [mm]	Výsledná výška oblouku [μm]
1	30	7,0	30	1404
2	30	7,0	80	1428
3	30	7,0	250	1242

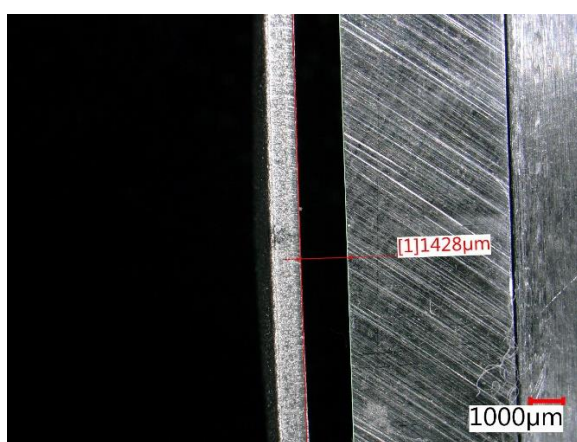


Graf 4: Vliv vzdálenosti trysky od povrchu na míru zpevnění (vzorky o $t = 1$ mm)

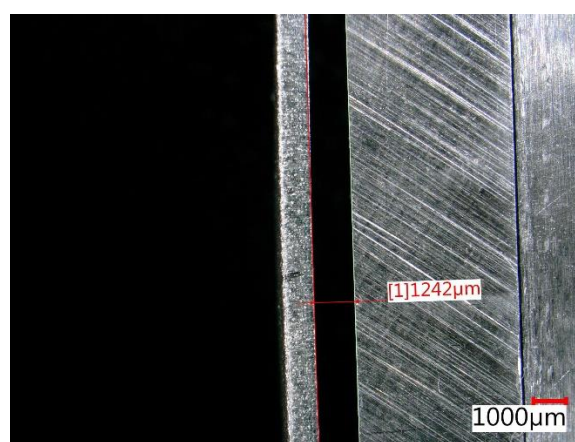
Při opakování této části experimentu došlo k ověření již zjištěného trendu. U tohoto testu došlo k největší míře zpevnění při tryskání ze vzdálenosti 80 mm, kdy výška průhybu zkušební vzorku byla 1428 μm . Při zvětšující se vzdálenosti intenzita zpevnění výrazně klesá. K nižšímu průhybu došlo opět i u vzorku tryskaného ze vzdálenosti 30 mm.

I po ověření nám z experimentu vychází jako nejlepší parametr pro maximální efekt zpevnění vzdálenost 50 mm.

Porovnání tryskaných vzorků pod digitálním mikroskopem:



Obrázek 30: Vzdálenost 80 mm



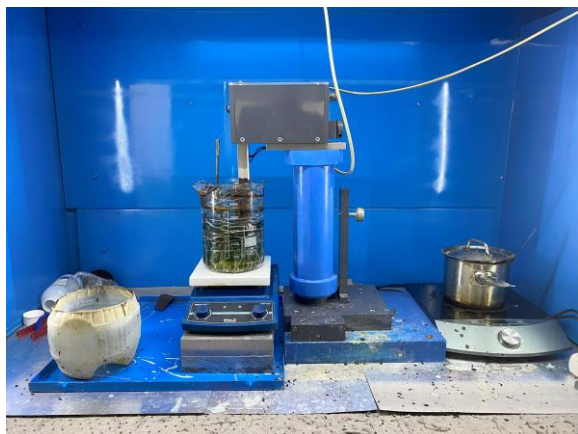
Obrázek 31: Vzdálenost 250 mm

12.2 Měření zbytkových napětí

Několik vybraných vzorků bylo podrobeno testu v laboratoři zbytkových napětí na Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie na Fakultě strojní Českého vysokého učení technického v Praze ke zjištění zbytkových napětí. Konkrétně se jedná o metodu elektrolytického odleptávání vzorku. Zbytková napětí se vyhodnocují z uvolněné deformace z vymezené oblasti vzorku. Při celém procesu je nutné dbát na odvětrávání, jelikož se při procesu vypařují nebezpečné látky, z toho důvodu je nutné mít neustále zapnutou ventilaci a je nutné využívat ochranné prostředky (štit, rukavice).

Samotné zařízení se skládá ze základního stojanu, na kterém je umístěn držák s upínacím třmenem pro zkušební vzorek. Na zkušební vzorek se upíná třmen s ramenem, který je v těsné blízkosti čidla, které snímá vzdálenost. Celý

proces probíhá v elektrolytu, kde je zkušební vzorek jako anoda, v našem případě to je nerezový plech AISI 304L, katoda z olova je umístěná na držáku. Pod elektrolytem se nachází magnetické míchadlo, které při měření neustále promíchává elektrolyt. Do zařízení je přiveden regulovaný zdroj napětí.

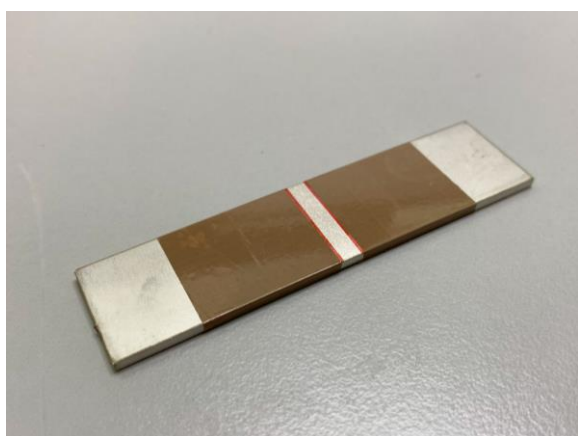


Obrázek 32: Zařízení na měření zbytkových napětí

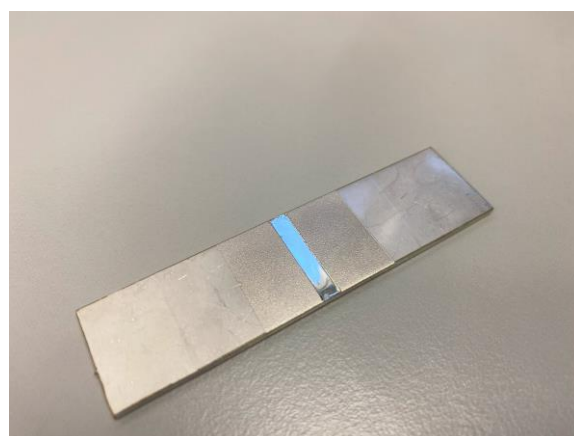


Obrázek 33: Upevněný vzorek po elektrolytickém leštění

Před ponořením do elektrolytu je nutné dbát na zaizolování všech ostatních komponentů voskem. Jediné odkryté místo je vymezená oblast na zkušebním vzorku. Aby docházelo k přesnému vymezení oblasti, je potřeba oblast vymežit lepící páskou, která zabrání stejně jako vosk odleptávání v nežádoucích oblastech. Aplikace vosku má za následek i prodloužení životnosti komponentů měřícího zařízení.



Obrázek 34: Vyhraničená oblast lepící páskou



Obrázek 35: Očištěný vzorek po elektrolytickém leštění

12.2.1 Postup měření

U zkušební vzorku, který je označen elektrickým popisovačem na kovy, se nejprve zjistí počáteční hmotnost. Předtím je potřeba vzorek řádně očistit a odmastit. Následuje vymezení oblasti lepící páskou, zaizolování ostatních ploch a upnutí do třmenu zařízení, kde se změří vetknutí. A to od horní hrany vymezené oblasti po střed čidla. Po zaizolování voskem třmenů a šroubů lze již vzorek ponořit do elektrolytu.

Následně se čeká na ustálení teplot, jelikož vosk je při nanášení ohřátý na 80 °C. Po ustálení lze začít s měřením. To spočívá ve spuštění programu a následném spuštění proudu. Je potřeba zaznamenat čas sepnutí a vypnutí pro následné výpočty. Po měření se vyjme zkušební vzorek z elektrolytu, řádně očistí od vosku a pásky. Následuje zvážení konečné hmotnosti a zjištění přesné šířky a výšky leptané plochy.

12.2.2 Měření vybraných vzorků

Několik vzorků je podrobena měření zbytkových napětí ke zjištění zpevnění při použití různých tryskacích parametrů. Nejprve se měří vzorky tryskané s rostoucím tlakem od 3 do 7 baru. Při měření dochází ke zjištění, že už při tlaku 3 bary je povrchová vrstva velmi dobře zpevněná. Rozdíl tlaku od 3 do 7 baru potom při vzdálenosti 50 mm nehraje až tak významnou roli. Z těchto zjištění je potřeba zhotovit další vzorky a použít při tom podstatně menší tlak pro porovnání. Zároveň je potřeba použít zkušební vzorky o tloušťce 2 mm, kde dochází k přesnějšímu měření díky menšímu průhybu tryskaného vzorku.

Podrobena měření jsou další 3 zhotovené vzorky o tloušťce 2 mm s použitým tlakem 1; 3 a 7 baru, kde se očekává již výrazný vliv tlaku. Pro zjištění vlivu vzdálenosti na výsledné zpevnění je prováděno měření na dvou vzorcích se vzdálenostmi 50 a 200 mm.

Na základě měření lze zjistit, jakého zpevnění lze vůbec dosáhnout při použití ručního tlakovzdušného tryskacího zařízení a jak lze toto zpevnění ovlivnit volenými parametry.

12.2.3 Záznam z měření

Tabulka 9: Záznamový list

ZÁZNAM Z MĚŘENÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ												
Datum měření:		13.,14. a 15.6.2023			Materiál:		AISI304L					
pořad. číslo měření	označení vzorku	tloušťka vzorku	hmotnost počáteční	vetknutí	čas sepnutí proudu	čas vypnutí proudu	hmotnost konečná	šířka leptané plochy	výška plochy	napětí na zdroji	proud po 1.minutě	měření provedl
		h [mm]	m1 [g]	a [mm]	t1 [min:s]	t2 [min:s]	m2 [g]	b [mm]	l [mm]	U [V]	I [A]	
1	VZ. 2	2,00	22,715	276	3,25	54,25	22,645	19,07	3,60	25,00	0,10	Novotný L.
2	VZ. 4	2,00	22,717	276	7,5	45,5	22,652	19,10	3,79	25,00	0,10	Novotný L.
3	VZ. 12	1,00	11,274	276	3,0	64,5	11,202	19,14	3,18	25,10	0,10	Novotný L.
4	VZ. 13	1,00	11,285	276	3,0	53,0	11,214	19,02	2,78	25,00	0,10	Novotný L.
5	VZ. 15	2,00	22,708	276	3,3	54,3	22,648	18,92	3,81	25,30	0,10	Novotný L.
6	VZ. 16	2,00	22,701	276	3,0	78,0	22,581	18,94	4,21	25,00	0,10	Novotný L.
7	VZ. 17	2,00	22,724	276	4,3	84,3	22,595	19,00	4,21	25,00	0,10	Novotný L.

Z naměřených hodnot byly vypočteny následující parametry, a to odleptaná hloubka, čas leptání, odleptaná plocha, minutový úběr a proudová hustota.

Vztahy pro výpočet:

Odleptaná hloubka
$$H = (m_1 - m_2) \cdot \frac{1000}{S \cdot \rho} [mm]$$

Čas leptání
$$t = t_2 - t_1 [min]$$

Odleptaná plocha
$$S = b \cdot l [mm^2]$$

Minutový úběr
$$R = \frac{H}{t} [mm/min]$$

Proudová hustota
$$\rho = \frac{l}{10000} [A/dm^2]$$

Tabulka 10: Vypočtené hodnoty

	Hustota [g/cm ³] 8,000				
	Vypočtené hodnoty				
pořad. číslo měření	odleptaná hloubka	čas leptání	odleptaná plocha	minutový úběr	proudová hustota
	H [mm]	t [min]	S [mm ²]	R [mm/min]	ρ [A/dm ²]
1	0,127	51,0	68,65	0,0025	14,6
2	0,112	38,0	72,39	0,0030	13,8
3	0,148	61,5	60,87	0,0024	16,4
4	0,168	50,0	52,88	0,0034	18,9
5	0,104	51,0	72,09	0,0020	13,9
6	0,188	75,0	79,74	0,0025	12,5
7	0,202	80,0	79,99	0,0025	12,5

Vypočtené hodnoty sloužily jako vstupní data pro Microsoft Excel, ve kterém došlo k sestavení křivky zbytkových napětí.

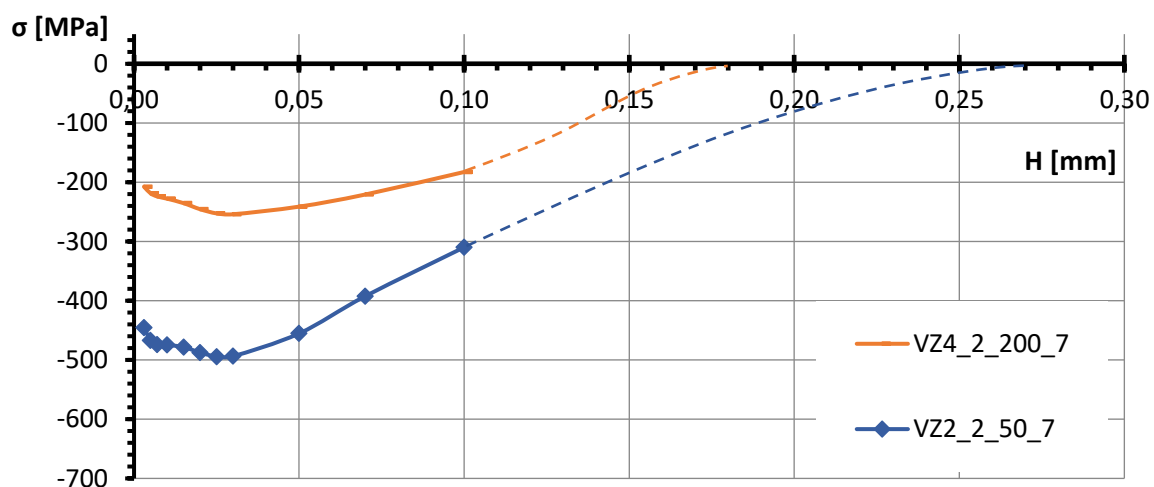
13. VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Vliv vzdálenosti na zpevnění:

Z měření zbytkových napětí u vzorků VZ2 a VZ4 je patrné, že vzdálenost má významný vliv na zpevnění povrchu. Pro experiment jsou zvoleny nerezové pásky o tloušťce 2 mm. Vzorek s označením VZ2 je tryskán ze vzdálenosti 50 mm při použitém tlaku 7 baru. Vzorek s označením VZ4 z 200 mm vzdálenosti při stejném tlaku.

Tabulka 11: Srovnání skutečného zbytkového napětí – vliv vzdálenosti

	VZ4_2_200_7	VZ2_2_50_7
hloubka H [mm]	skutečné ZN [N.mm ⁻²]	skutečné ZN [N.mm ⁻²]
0,003	-207	-445
0,005	-219	-467
0,007	-224	-474
0,010	-228	-475
0,015	-235	-478
0,020	-245	-488
0,025	-253	-494
0,030	-254	-494
0,050	-241	-455
0,070	-221	-393
0,100	-183	-310



Graf 5: Srovnání – vliv vzdálenosti na zbytková napětí

U tryskaného nerezového pásku s označením VZ4 (200 mm) dosahují v těsné blízkosti povrchu v hloubce 0,003 mm tlaková napětí hodnot -207 MPa.

V hloubce 0,005 mm dosahují hodnot -219 MPa. Tlaková špička byla u vzorku pozorována v hloubce 0,03 mm, kde bylo naměřeno -254 MPa. S rostoucí hloubkou zbytková napětí klesají v hloubce 0,1 mm na hodnoty -183 MPa. Na základě provedeného kvalifikovaného odhadu se očekává, že do nízkých vyrovnávacích tahových napětí přechází přibližně v hloubce 0,18 mm pod povrchem. Pro přesné zjištění hloubky přechodu by bylo potřeba měření na základě uvolněné deformace výrazně prodloužit.

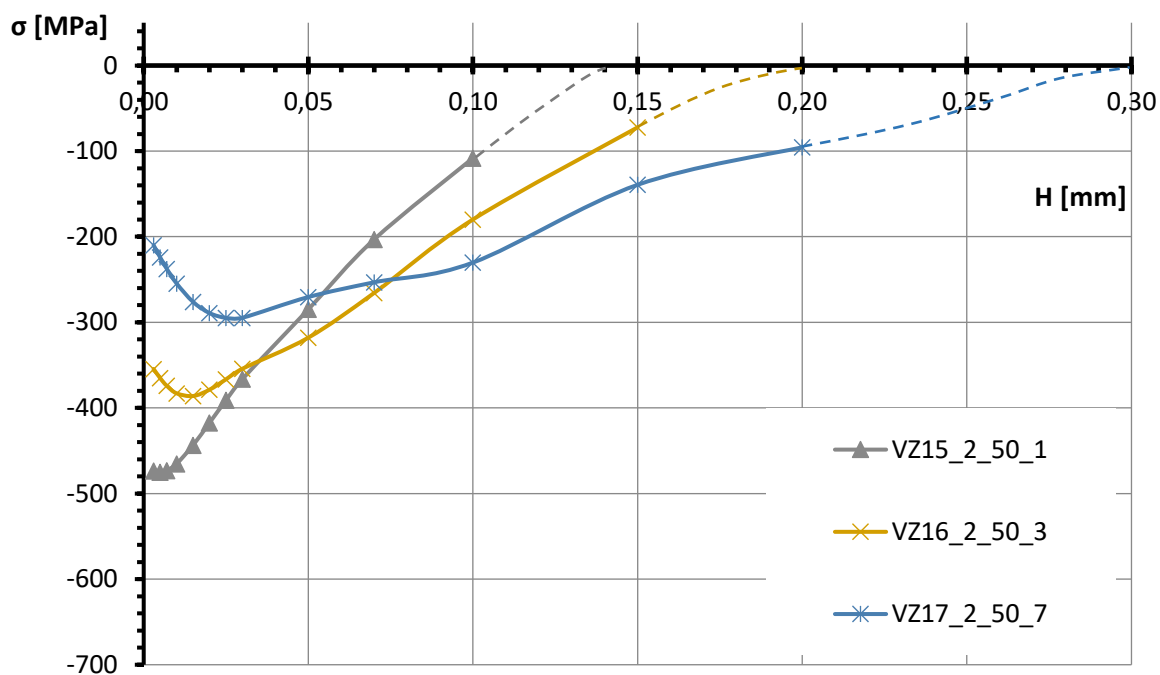
U tryskaného zkušebního vzorku s označením VZ2 (50 mm) dosahují v těsné blízkosti povrchu v hloubce 0,003 mm tlaková napětí hodnot -445 MPa. V hloubce 0,005 mm dosahují hodnot -467 MPa. Tlaková špička byla u vzorku pozorována v hloubce 0,025 mm a 0,03 mm, kde tlaková napětí dosahují hodnot -494 MPa. S rostoucí hloubkou zbytková napětí klesají v hloubce 0,1 mm na hodnoty -310 MPa. Na základě provedeného kvalifikovaného odhadu se očekává, že do nízkých vyrovnávacích tahových napětí přechází přibližně v hloubce 0,27 mm pod povrchem. Pro přesné zjištění hloubky přechodu by bylo potřeba měření výrazně prodloužit.

Vliv tlaku na zpevnění:

Z měření zbytkových napětí u vzorků VZ15, VZ16 a VZ17 je patrné, že tlak má významný vliv na zpevnění povrchu. Pro experiment jsou zvoleny nerezové pásky AISI 304L o tloušťce 2 mm. Na základě grafu je patrný odlišný průběh jednotlivých zkušebních vzorků. Zkušební pásek s označením VZ15 je tryskán s nastaveným tlakem 1 bar, VZ16 poté s tlakem 3 bary a VZ17 tlakem 7 baru.

Tabulka 12: Srovnání skutečného zbytkového napětí – vliv tlaku

	VZ15_2_50_1	VZ16_2_50_3	VZ17_2_50_7
hloubka H [mm]	skutečné ZN [N.mm ⁻²]	skutečné ZN [N.mm ⁻²]	skutečné ZN [N.mm ⁻²]
0,003	-474	-354	-210
0,005	-475	-365	-224
0,007	-473	-374	-237
0,010	-465	-383	-255
0,015	-444	-386	-276
0,020	-417	-379	-289
0,025	-391	-367	-295
0,030	-366	-354	-295
0,050	-285	-318	-270
0,070	-203	-266	-253
0,100	-108	-180	-230
0,150	#####	-72	-139
0,200	#####	#####	-95



Graf 6: Srovnání – vliv tlaku na zbytková napětí

U tryskaného nerezového pásku s označením VZ15 (1 bar) dosahují v těsné blízkosti povrchu v hloubce 0,003 mm tlaková napětí hodnot -474 MPa. Tlaková špička byla u vzorku pozorována v hloubce 0,005 mm, kde tlaková napětí dosahují hodnot -475 MPa. S rostoucí hloubkou zbytková napětí klesají v hloubce 0,1 mm na hodnoty -108 MPa. Na základě provedeného kvalifikovaného odhadu

se očekává, že do nízkých vyrovnávacích tahových napětí přechází přibližně v hloubce 0,14 mm pod povrchem. Pro přesné zjištění hloubky přechodu by bylo potřeba měření o nějaký čas prodloužit z dosavadních 51 minut.

U tryskaného vzorku s označením VZ16 (3 bary) dosahují v těsné blízkosti povrchu v hloubce 0,003 mm tlaková napětí hodnot -354 MPa. Tlaková špička byla u vzorku pozorována v hloubce 0,015 mm, kde tlaková napětí dosahují hodnot -386 MPa. S rostoucí hloubkou zbytková napětí klesají v hloubce 0,1 mm na hodnoty -180 MPa. Na základě provedeného kvalifikovaného odhadu se očekává, že do nízkých vyrovnávacích tahových napětí přechází přibližně v hloubce 0,20 mm pod povrchem. Pro přesné zjištění hloubky přechodu by bylo potřeba měření o nějaký čas prodloužit z dosavadních 75 minut.

U nerezového pásku s označením VZ17 (7 baru) dosahují v těsné blízkosti povrchu v hloubce 0,003 mm tlaková napětí hodnot -210 MPa. Tlaková špička byla u vzorku pozorována v hloubce 0,025 mm a 0,03 mm, kde tlaková napětí dosahují hodnot -295 MPa. S rostoucí hloubkou zbytková napětí klesají v hloubce 0,1 mm na hodnoty -230 MPa. Na základě provedeného kvalifikovaného odhadu se očekává, že do nízkých vyrovnávacích tahových napětí přechází přibližně v hloubce 0,30 mm pod povrchem. Pro přesné zjištění hloubky přechodu by bylo potřeba měření o nějaký čas prodloužit z dosavadních 80 minut.

Zajímavostí je zjištění, že při nízkém tlaku dochází k vysokému zpevnění v těsné blízkosti povrchu, zatímco povrchová vrstva je zpevněna jen do malé hloubky pod povrchem. Naopak při zvolení většího tlaku je trend opačný. Dochází k menšímu zpevnění v těsné blízkosti povrchu, ale naopak materiál je značně zpevněn i do větší hloubky, což je žádoucí u specifických dílů. Jsou to obvykle díly, u kterých v provozu dochází k nějaké abrazi, odnosu nebo rozpouštění povrchové vrstvy. Většina uživatelů to však neřeší a nevěnuje tomuto aspektu patřičnou pozornost.

14. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala tématem mechanického zpevnování povrchu. Teoretická část pojednávala o technologii tryskání, tryskacích metodách, způsobech procesní kontroly při řízeném tryskání a v neposlední řadě integritou povrchu po tryskání. Během práce byla provedena rozsáhlá rešerše literatury, která poskytla teoretické informace o dané problematice. Zkoumány byly také faktory ovlivňující zpevnování povrchu.

Cílem této bakalářské práce bylo zpracovat návrh a realizaci experimentu pro zjištění intenzity zpevnění při ručním tlakovzdušném tryskání. V rámci experimentální části byly provedeny laboratorní zkoušky na Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie na Fakultě strojní Českého vysokého učení technického v Praze ke zjištění zbytkových napětí na vzorcích materiálu, které byly podrobeny procesům tryskání při různých parametrech. Vzorky byly vyhodnocovány i na základě průhybů na digitálním mikroskopu Keyence VHX 6000, ze kterých se stanovila saturační křivka a zkoumal se vliv parametrů na průhyb vzorků a zároveň míru zpevnění.

Praktická část bakalářské práce se nejprve zabývala materiálem AISI 304L, který byl v podobě nerezových pásků využit pro zkušební vzorky, které se upínaly do přípravku a tryskaly kombinacemi parametrů. Pro ošetření vzdálenosti byl navržen a zhotoven přípravek na trysku, který umožní nastavení vzdálenosti v rozsahu od 0 do 220 mm od povrchu součásti.

Při zkoumání vlivu vzdálenosti se ověřil významný vliv tohoto parametru, u tryskaného vzorku ze vzdálenosti 200 mm byla naměřena maximální tlaková napětí -254 MPa v hloubce 0,03 mm. Tryskaný vzorek ze vzdálenosti 50 mm při měření dosáhl maximálních tlakových napětí v hloubce 0,025 mm a 0,03 mm, kde se dosáhlo hodnot -494 MPa. Pro srovnání se jedná o rozdíl 240 MPa. Došlo i k většímu zpevnění povrchové vrstvy do větší hloubky.

K zajímavému zjištění došlo při srovnání vlivu tlaku. U vzorku, který byl tryskán s nízkým tlakem o velikosti jednoho baru dosahují tlaková napětí v těsné blízkosti povrchu v hloubce 0,003 mm hodnot -474 MPa, v tlakové špičce v hloubce 0,005 mm hodnot -475 MPa. Ovšem už v hloubce 0,1 mm zbytková napětí klesají na hodnoty -108 MPa. U vzorku se středním tlakem o velikosti

3 bary jsou tlaková napětí v blízkosti povrchu v hloubce 0,003 mm nižší, a to na hodnotě -354 MPa. Tlaková špička byla pozorována v hloubce 0,015 mm, kde tlaková napětí dosahují hodnot -386 MPa. Pro porovnání je to o 120 MPa méně v případě hloubky 0,003 mm než v případě vzorku tryskaného s tlakem 1 bar. Ovšem v hloubce 0,1 mm zbytková napětí dosahují hodnot -180 MPa. U vzorku tedy dochází k většímu zpevnění do hloubky.

Vzorek tryskán tlakem o velikosti 7 baru dosahuje v hloubce 0,003 mm hodnot -210 MPa, což je nejméně ze všech vzorků. Tlaková špička u tohoto vzorku byla pozorována v hloubce 0,025 mm a 0,03 mm, kde tlaková napětí dosahují hodnot -295 MPa. V hloubce 0,1 mm dosahuje tlakové napětí hodnot -230 MPa. Pro porovnání dochází u tohoto vzorku ze všech k největšímu zpevnění v hloubce 0,1 mm. V těsné blízkosti povrchu došlo u tohoto vzorku naopak k naměření nejmenších tlakových napětí. Dochází tedy k optimálnímu zpevnění povrchu – povrchová vrstva je zpevněna výrazně do hloubky, a ne pouze na povrchu.

Pro zjištění hloubky přechodu by bylo nutné provádět měření podstatně delší čas, protože ani u vzorku s označením VZ17, který byl podroben měření nejdelší čas – po dobu 80 minut, nedošlo ke zjištění stavu nízkých vyrovnávacích tahových napětí. U vzorků tedy došlo k výraznému zpevnění i hluboko pod povrchem.

Na základě experimentu bylo zjištěno, že ručním tryskáním lze docílit velmi dobrých výsledků, co se týče zpevnění povrchové vrstvy. Samotné výsledky experimentu poskytly důkaz o intenzitě zpevnění materiálu AISI 304L a potvrdily přínosy ručního tlakového tryskacího zařízení při zlepšování odolnosti materiálů vůči únavě, odolnosti proti opotřebení a prodloužení životnosti. Na základě experimentálních měření se podařilo potvrdit schopnost ručního tryskání dosahovat obdobných úrovní zpevnění jako u průmyslových automatizovaných systémů. Zároveň se ukázala relativně nízká citlivost na změny parametrů, čímž lze i u ručního tryskání očekávat relativně opakovatelné výsledky.

Na základě provedeného experimentu lze konstatovat, že metoda ručního tlakovzdušného tryskání je efektivní a vhodná pro zlepšování mechanických vlastností materiálů. Tato přínosná technika nachází uplatnění v mnoha

průmyslových odvětvích. Její použití má potenciál přinést významné výhody v průmyslových aplikacích a otevírá cestu k dalšímu výzkumu a inovacím v této oblasti. Cíle bakalářské práce byly splněny v plném rozsahu.

Bibliografie

- [1] HONG, T., J.Y. OOI a B. SHAW. A numerical simulation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2008, 15(8), 1097-1110 [cit. 2023-02-28]. ISSN 13506307. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfailanal.2007.11.017
- [2] BREZINOVÁ, Janette, Anna GUZANOVÁ a Dagmar DRAGANOVSKÁ. *Abrasive Blast Cleaning and Its Application*. Switzerland: TTP, 2015. ISBN 978-3-03835-995-1.
- [3] Sandblasting history in brief. In: *MP BLAST* [online]. 2016 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: <https://mpblast.com.au/sandblasting-history/>
- [4] TAKÁČ, Karol. *TECHNOLÓGIA POVRCHOVÝCH ÚPRAV*. 1. Košice: Edičné stredisko VŠT v Košiciach, 1984. ISBN 850-607-84.
- [5] Otryskávání. In: *ELUC* [online]. [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1389>
- [6] RAUCH, Martin. *VLIV TRYSKÁNÍ NA KOROZNÍ ODOLNOST OCELI* [online]. Praha, 2018 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73864/F2-BP-2018-Rauch-Martin-Bakalarska%20prace%20Martin%20Rauch.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [7] *Co je tryskání?* [online]. In: . [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: <https://www.wheelabratorgroup.com/cs-cz/my-application/application-by-process/what-is-shot-blasting>
- [8] CENTRIFUGAL WHEELBLAST VS. AIR BLASTING: WHICH IS RIGHT FOR YOU?. In: *Finishing Systems* [online]. 2021 [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: <https://www.finishingsystems.com/blog/centrifugal-wheelblast-vs-air-blasting-which-is-right-for-you/>
- [9] Air Blasting Technology. In: *FerroEcoBlast* [online]. 2021 [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: <https://ferroecoblast.com/technology/air-blasting>
- [10] Návod k použití tryskacích kabin: Rozdělení pneumatických tryskacích systémů. In: *GDS Technology: GDS tryskání* [online]. 2009 [cit. 2023-01-24].

Dostupné z: http://tryskani-piskovani.gds.cz/public/default/userfiles/file/gds__profilboxy__navod.pdf

- [11] Co je pískování? čím se pískuje?. In: *Pískovačka.cz: Vše o pískování* [online]. 2016 [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: <https://www.piskovacka.cz/info-82-co-je-piskovani-cim-se-piskuje/>
- [12] Tryskání metacími koly. In: *TRYTECH* [online]. 2023 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.trytech.cz/o-tryskani/tryskani-metacimi-koly/>
- [13] TRYSKACÍ ZAŘÍZENÍ. In: *SPOLMONT: Technologie povrchových úprav* [online]. 2021 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://www.spolmont.cz/tryskani>
- [14] ZAŘÍZENÍ PRO TLAKOVZDUŠNÉ TRYSKÁNÍ / PÍSKOVÁNÍ. In: *SPOLMONT: Technologie povrchových úprav* [online]. 2021 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://www.spolmont.cz/tlakovzdusne-tryskani>
- [15] TRYSKACÍ STROJE S METACÍMI KOLY. In: *SPOLMONT: Technologie povrchových úprav* [online]. 2021 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://www.spolmont.cz/tryskaci-stroje-s-metacimi-koly>
- [16] PRŮBĚŽNÉ TRYSKACÍ ZAŘÍZENÍ A STROJE ZÁVĚSNÉ. In: *SPOLMONT: Technologie povrchových úprav* [online]. 2021 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.spolmont.cz/zavesne-tryskaci-stroje-vsech-typu-a-velikosti>
- [17] PRŮBĚŽNÉ TRAŤOVÉ TRYSKAČE S HORIZONTÁLNÍM VÁLEČKOVÝM DOPRAVNÍKEM. In: *SPOLMONT: Technologie povrchových úprav* [online]. 2021 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.spolmont.cz/prubezne-tratove-tryskace-s-horizontalnim-valeckovym-dopravnikiem>
- [18] BUBNOVÉ TRYSKAČE VČETNĚ NAKLADAČŮ A DOPRAVNÍKŮ. In: *SPOLMONT: Technologie povrchových úprav* [online]. 2021 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.spolmont.cz/bubnove-tryskace-vcetne-nakladacu-a-dopravniku>
- [19] STOLOVÉ TRYSKAČE. In: *SPOLMONT: Technologie povrchových úprav* [online]. 2021 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.spolmont.cz/stolove-tryskace>

- [20] TRYSKACÍ STROJE NA TRYSKÁNÍ TYČÍ, ROXORŮ A ŘETĚŽŮ. In: *SPOLMONT: Technologie povrchových úprav* [online]. 2021 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.spolmont.cz/tryskaci-stroje-na-tryskani-tyci-roxoru-a-retezu>
- [21] TRYSKACÍ STROJE NA TRYSKÁNÍ TRUBEK, KULATIN A PROPANBUTANOVÝCH LÁHVÍ. In: *SPOLMONT: Technologie povrchových úprav* [online]. 2021 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.spolmont.cz/tryskaci-stroje-na-tryskani-trubek-kulatin-a-propanbutanovych-lahvi>
- [22] What Wheelabrator does. In: *Wheelabrator* [online]. 2023 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://www.wheelabratorgroup.com/en-gb/about-us/about-wheelabrator>
- [23] O NÁS. In: *Rösler: finding a better way* [online]. 2023 [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://cz.rosler.com/cz-cs/rosler/firma/o-nas/>
- [24] O NÁS. In: *SPOLMONT* [online]. 2021 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://www.spolmont.cz/onas>
- [25] O nás. In: *1.Toušeňská s.r.o.* [online]. 2016 [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://www.tryskaci-zarizeni.cz/home/o-nas/>
- [26] Profil společnosti S.A.F. Praha spol. s r.o. In: *SAF* [online]. 2019 [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <http://saf.cz/profil-spolecnosti/>
- [27] ABOUT CURTISS-WRIGHT SURFACE TECHNOLOGIES. In: *CURTISS-WRIGHT: SURFACE TECHNOLOGIES* [online]. 2023 [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://cwst.com/about-us/>
- [28] SURFACE TREATMENT AND METAL IMPROVEMENT BY CURTISS-WRIGHT SURFACE TECHNOLOGIES. In: *CURTISS-WRIGHT: SURFACE TECHNOLOGIES* [online]. 2023 [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://cwst.com/>
- [29] COTELL, C. M., J.A. SPRAGUE a F.A. SMIDT. *ASM Handbook, Volume 05 - Surface Engineering: Shot Peening*. 10th. Ohio: ASM International, 1994. ISBN 978-0-87170-384-2.
- [30] *Povrcháři: Technologie kuličkování (Shot peening)* [online]. 2009, [cit. 2023-03-01]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/200907__povrchari.pdf

- [31] SHOT BLASTING. In: *CURTISS-WRIGHT* [online]. 2021 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://cwst.online/>
- [32] KIRK, David. Quantification of Shot Peening Intensity Rating. *The Shot Peener* [online]. 2015, 24–32 [cit. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2015007.pdf>
- [33] KIRK, David. RESIDUAL STRESSES IN SHOT PEENED COMPONENTS. *Shotpeener.com* [online]. 1–8 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2004003.pdf>
- [34] Nerezová ocel 1.4307 / AISI 304L. In: *AGST: Draht & Biegetechnik* [online]. [cit. 2023-07-11]. Dostupné z: <https://www.agst.de/4307?lang=cs>
- [35] Stainless Steel 304L 1.4307. In: *Thyssenkrupp Materials (UK)* [online]. 2023 [cit. 2023-07-10]. Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/stainless-steel-304l-14307.html>
- [36] AUSTENITICKÉ SLITINY: EN 1.4301 / 304 / 1.4307 / 304L. In: *Sverdrup Steel* [online]. [cit. 2023-07-11]. Dostupné z: <https://www.sverdrupsteel.com/cs/products/austenitic-alloys/alloy-1-4301-304-1-4307-304l>
- [37] What is Sandblasting?. In: *NEUMANN INDUSTRIAL COATINGS* [online]. 2023 [cit. 2023-01-04]. Dostupné z: <https://neumannindustrialcoatings.com.au/what-is-sandblasting/>
- [38] Tryskanie. In: *Progresívne metódy v mechanických predúpravách povrchov* [online]. [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: <http://www.sjf.tuke.sk/inmf/NW/mpp/tryskanie.html>
- [39] Steel Shot. In: *FINISHING SYSTEMS* [online]. 2023 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://www.finishingsystems.com/abrasives/steel-shot/>
- [40] SHOT PEENING INCREASES FATIGUE LIFE OF AUTO COMPONENTS. In: *Patel Furnace & Forging Pvt. Ltd.* [online]. 2012 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://www.pshotblast.com/shot-peening-increases-fatigue-life-of-auto-components-page-4.php>
- [41] BHUVARAGHAN, Baskaran, Sivakumar M. SRINIVASAN a Bob MAFFEO. Numerical simulation of Almen strip response due to random impacts with

strain-rate effects. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2011, 53(6), 417-424 [cit. 2023-04-18]. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2011.03.004

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled abraziv pro pneumatické tryskání [10]	17
Tabulka 2: Přibližná spotřeba tlakového vzduchu v závislosti na průměru trysky [10].....	18
Tabulka 3: Základní vlastnosti tryskacích prostředků [2].....	27
Tabulka 4: Chemické složení nerezové oceli AISI 304L [34] [35]	39
Tabulka 5: Naměřené hodnoty průhybů v závislosti na čase	41
Tabulka 6: Naměřené hodnoty průhybů v závislosti na použitém tlaku	44
Tabulka 7: Naměřené hodnoty průhybů v závislosti na vzdálenosti pro vzorky o t = 2 mm	45
Tabulka 8: Naměřené hodnoty průhybů v závislosti na vzdálenosti pro vzorky o t = 1 mm	46
Tabulka 9: Záznamový list.....	50
Tabulka 10: Vypočtené hodnoty	51
Tabulka 11: Srovnání skutečného zbytkového napětí – vliv vzdálenosti.....	52
Tabulka 12: Srovnání skutečného zbytkového napětí – vliv tlaku.....	54

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vynálezce Benjamin Chew Tilghman spolu s prvním tryskacím zařízením [37].....	12
Obrázek 2: Tryskací metody [38].....	16
Obrázek 3: Princip injektorového tryskání [11]	18
Obrázek 4: Princip tlakovzdušného tryskání [11] [10]	19
Obrázek 5: Princip mechanického tryskání [12].....	20
Obrázek 6: Dopad abrazivního média [12]	21
Obrázek 7: Tryskač se 4 metacími koly [12].....	21
Obrázek 8: Ocelové broky [39].....	28
Obrázek 9: Skleněné kuličky [2].....	28
Obrázek 10: Dopad kuličky na povrch [31]	29
Obrázek 11: Vyvalená plocha po dopadu kuličky [30]	29
Obrázek 12: Ovlivnění hloubky materiálu [30]	30
Obrázek 13: Procesní kontrola shot peeningu – Almen test [41].....	30
Obrázek 14: Saturační křivka [40]	31
Obrázek 15: Hustota dislokací v povrchové vrstvě po otryskání – Materiál SAE 1045 [2]	33
Obrázek 16: Vliv úhlu dopadu na mikrotvrdost tryskaného materiálu, abrazivo SG (0,71 mm) [2].....	33
Obrázek 17: Model zbytkových napětí po otryskání [2]	35
Obrázek 18: Profil zbytkových napětí [33]	35
Obrázek 19: Zbytková napětí tryskané oceli SAE 1045 v závislosti na hloubce povrchové vrstvy [2].....	36
Obrázek 20: Přípravek na trysku	40
Obrázek 21: Přípravek na uchycení vzorků.....	40
Obrázek 22: Vyhodnocování průhybu.....	41
Obrázek 23: Měření vzorku	41
Obrázek 24: Dopad abrazivního média pod úhlem α [1]	43
Obrázek 25: Vliv úhlu dopadu α [1].....	43
Obrázek 26: Tryskání při 3 barech	44
Obrázek 27: Tryskání při 7 barech	44

Obrázek 28: Vzdálenost 50 mm	46
Obrázek 29: Vzdálenost 200 mm.....	46
Obrázek 30: Vzdálenost 80 mm	47
Obrázek 31: Vzdálenost 250 mm.....	47
Obrázek 32: Zařízení na měření zbytkových napětí	48
Obrázek 33: Upevněný vzorek po elektrolytickém leštění.....	48
Obrázek 34: Vyhraničená oblast lepicí páskou	48
Obrázek 35: Očištěný vzorek po elektrolytickém leštění	48

Seznam grafů

Graf 1: Saturační křivka pro materiál AISI 304L	42
Graf 2: Vliv tlaku tryskacího abraziva na míru zpevnění.....	44
Graf 3: Vliv vzdálenosti trysky od povrchu na míru zpevnění (vzorky o $t = 2$ mm)	45
Graf 4: Vliv vzdálenosti trysky od povrchu na míru zpevnění (vzorky o $t = 1$ mm)	46
Graf 5: Srovnání – vliv vzdálenosti na zbytková napětí.....	52
Graf 6: Srovnání – vliv tlaku na zbytková napětí.....	54