



Diplomová práce

Zpevňování povrchů materiálů s využitím kavitace

Studijní program:

N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce:

Bc. Martin Dudl

Vedoucí práce:

doc. Ing. Miloš Müller, Ph.D.

Katedra energetických zařízení

Liberec 2024



Zadání diplomové práce

Zpevňování povrchů materiálů s využitím kavitace

Jméno a příjmení:

Bc. Martin Dudl

Osobní číslo:

S21000234

Studijní program:

N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení

Zadávající katedra:

Katedra energetických zařízení

Akademický rok:

2022/2023

Zásady pro vypracování:

- provést rešerši zaměřenou na technické materiály vhodné pro zvyšování tvrdosti z hlediska aplikací
- pro vybrané materiály provést kavitální erozní testy s cílem definovat inkubační dobu materiálů
- pro vybrané vzorky materiálů provést měření změny tvrdosti povrchu v průběhu inkubační doby
- provést ideový návrh konfigurace pro využití kavitálního zpevňování na reálné strojní součásti

Rozsah grafických prací: 10
Rozsah pracovní zprávy: 40
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

BRDIČKA, Miroslav, Oldřich TARABA a Ladislav SAMEK. *Kavitace: diagnostika a technické využití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981. Technická knižnice inženýra.

STATNIKOV, Efim Sh., Oleg V. KOROLKOV a Vladimír N. VITYAZEVA. Physics and mechanism of ultrasonic impact. *Ultrasonics* [online]. 2006, **44**, e533-e538 [cit. 2022-11-08]. ISSN 0041624X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ultras.2006.05.119

SOYAMA, Hitoshi a Alexander M. KORSUNSKY. A critical comparative review of cavitation peening and other surface peening methods. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2022, **305** [cit. 2022-11-08]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2022.117586

ŚWIETLIŃSKI, Aleksander, Mirosław SZALA a Mariusz WALCZAK. Effects of Shot Peening and Cavitation Peening on Properties of Surface Layer of Metallic Materials. A Short Review. *Materials* [online]. 2022, **15**(7) [cit. 2022-11-08]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma15072476

Vedoucí práce: doc. Ing. Miloš Müller, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Datum zadání práce: 1. listopadu 2022
Předpokládaný termín odevzdání: 22. května 2024

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bílek, Ph.D.
garant studijního programu

V Liberci dne 1. listopadu 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Poděkování

Tímto bych chtěl velmi poděkovat doc. Ing. Miloši Müllerovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce, rady a především čas, který mi byl ochoten věnovat při realizaci této diplomové práce. Dále bych rád vyjádřil srdečné díky všem zaměstnancům Katedry materiálů TUL, jež mi byli při vypracování praktické části nápomocni. V první řadě Ing. Petře Pazourkové Prokopčákové, Ph.D. za odbornou asistenci a výpomoc při získávání zkušeností z oblasti ručního broušení a leštění zkušebních vzorků. Dále Ing. Totce Bakalové, Ph.D. za její odborné konzultace, ochotu a pomocnou ruku za jakékoliv situace. A nakonec patří mé velké díky Ing. Michalu Krafkovi, jenž mi poskytnul odbornou asistenci při měření nanoindentace.

Od srdce též děkuji své přítelkyni Kateřině, jenž to se mnou během zpracovávání mé diplomové práce neměla moc jednoduché, ale vždy mi byla oporou. Dále děkuji mé rodině i blízkým, kteří mě napříč celým studiem podporovali.

Zpevnování povrchů materiálů s využitím kavitace

Anotace

Diplomová práce se zabývá procesem zpevnování povrchu hliníkových materiálů s využitím ultrazvukové kavitace. Rešeršní část pojednává o dosavadně získaných poznatcích z oblasti kavitačního zpevnování a kuličkování, které je do jisté míry porovnatelné s kavitačním zpevnováním. Pro experiment byly vyrobeny zkušební vzorky s jednotnou geometrií. Drsnost modifikovaného povrchu byla upravena za pomoci dokončovacích procesů, jako je broušení a leštění. V první fázi experimentu byla zjišťována inkubační doba erozní křivky pro materiály EN AW-2007 a EN AW-6082. Během následující fáze byl aplikován proces zpevnování ultrazvukovou kavitací na zkušebních vzorcích po daných časových intervalech odvozených z výsledků erozního testu. Modifikované vzorky byly podrobeny měření tvrdosti materiálu dle Vickerse a zkoumání změny drsnosti povrchu. Získaná data byla vyhodnocena a diskutována.

Klíčová slova

ultrazvuková kavitace, kavitační zpevnování, kuličkování, tvrdost materiálu, drsnost povrchu

Strengthening of material surfaces using cavitation

Abstract

The diploma thesis is focused on the surface hardening of aluminum alloys using ultrasonic cavitation. The research part deals with the knowledge obtained so far in the field of cavitation hardening and shot peening, which is comparable to cavitation hardening. For the experiment, test specimens, with uniform geometry were produced. The roughness of the modified surface was adjusted using finishing processes such as grinding and polishing. In the first phase of the experiment, the incubation period of the erosion curve for EN AW-2007 and EN AW-6082 materials were investigated. During the following phase, the ultrasonic cavitation hardening process was applied to the test specimens after given time intervals derived from the erosion test results. The modified specimens were subjected to Vickers hardness measurements and surface roughness change investigations. The data obtained was evaluated and discussed.

Keywords

ultrasonic cavitation, cavitation hardening, shot peening, material hardness, surface roughness

Obsah

Seznam symbolů a jednotek	9
Seznam zkratk	10
Seznam obrázků	11
Seznam grafů.....	12
Seznam tabulek	13
1 Úvod.....	14
2 Kavitace	15
2.1 Úvod do problematiky kavitace	15
2.2 Využití kavitace	17
2.3 Způsoby generování kavitace.....	18
3 Zpevňování povrchu materiálu	20
3.1 Zpevňování povrchu rázem (Peening methods).....	20
3.1.1 Kuličkování (SP).....	21
3.1.2 Ultrazvukové rázové kuličkování (UIP).....	25
3.1.3 Laserové rázové kuličkování (LSP)	27
4 Kavitační zpevňování.....	31
4.1 Hydraulická kavitace s využitím vodního paprsku	34
4.2 Laserová kavitace s využitím pulzního laseru.....	37
4.3 Ultrazvuková kavitace s využitím ultrazvukového měniče.....	40
4.4 Účinnost metod kavitačního zpevňování	42
5 Experimentální část.....	44
5.1 Experimentální materiály	44
5.1.1 Hliníková slitina EN AW-2007	45
5.1.2 Hliníková slitina EN AW-6082.....	46
5.2 Geometrie experimentálních vzorků	47
5.3 Dokončovací operace funkčních ploch	48
5.4 Volba experimentální metody	50
5.5 Experimentální sestava.....	51
5.6 Erozní test	52
5.6.1 Výsledky erozních testů	54
5.7 Experiment zpevňování ultrazvukovou kavitací	56
5.7.1 Použitá zařízení	58
6 Vyhodnocení experimentu	60
6.1 Měření tvrdosti.....	60
6.1.1 Výsledky měření tvrdosti	62

6.1.2	Hodnocení výsledků měření tvrdosti.....	65
6.2	Měření drsnosti povrchu	68
6.2.1	Výsledky měření drsnosti.....	69
6.2.2	Hodnocení výsledků měření drsnosti povrchu	71
6.3	Metalografický řez	74
6.3.1	Příprava vzorků metalografického řezu.....	74
6.3.2	Nanoindentace.....	77
6.3.3	Výsledky a hodnocení nanoindentace	78
7	Diskuzní část.....	80
7.1	Shrnutí a interpretace výsledků.....	80
7.2	Limity výzkumu.....	81
8	Ideový návrh konfigurace pro využití kavitačního zpevňování na reálné strojní součásti...82	
9	Závěr	83
	Seznam použité literatury.....	85

Seznam symbolů a jednotek

f	frekvence [Hz]
t	čas [s]
σ	kavitační číslo [-]
P₁	dynamický tlak na horním toku [MPa]
P₂	dynamický tlak na spodním toku [MPa]
P_v	dynamický tlak páry [MPa]
γ	bezrozměrná vzdálenost mezi povrchem a ohniskem laseru [-]
R_{p0,2}	mez kluzu [MPa]
R_m	mez pevnosti v tahu [MPa]
A	tažnost [%]
h	zvolená odstupová vzdálenost vzorku od sonotrody [mm]
P_{G1/2}	délková míra posunutí trubkového závitu po jedné otáčce [mm]
x	úhel pootočení hřídele [°]
m₁	první naměřená hmotnost zkušební vzorku [g]
m₂	druhá naměřená hmotnost zkušební vzorku [g]
m₃	třetí naměřená hmotnost zkušební vzorku [g]
m	průměrná naměřená hmotnost zkušební vzorku [g]
T	teplota [°C]
U	amplituda [μm]
F	síla zatížení indentoru [N]
P	příkon ultrazvukového procesoru [W]
R_a	průměrná aritmetická výška povrchu [μm]
R_z	výška mezi nejnižší prohlubní a nejvyšším výstupkem [μm]
R_v	výška mezi nejnižší prohlubní a střední rovinou [μm]
R_p	výška mezi střední rovinou a nejvyšším výstupkem [μm]
R_{ku}	špičatost křivky [-]
R_{sk}	šikmost křivky [-]
R_q	průměrná kvadratická výška povrchu [μm]

Seznam zkratek

PM	metody zpevňování povrchu nárazem (z anglického peening methods)
SP	kuličkování (z anglického shot peening)
UIP	ultrazvukové rázové kuličkování (z anglického ultrasonic impact peening)
LSP	laserové rázové kuličkování (z anglického laser shock peening)
RCS	zbytkové tlakové napětí (z anglického residual compressive stress)
FEM	metoda konečných prvků (z anglického finite element model)
FEA	analýza metodou konečných prvků (z anglického finite element analysis)
RSM	metoda plochy odezvy (z anglického response surface methodology)
SSP	těžké kuličkování (z anglického severe shot peening)
MSP	mikro-kuličkování (z anglického micro-shot peening)
RSSP	opětovné těžké kuličkování (z anglického re-peened severe shot peening)
SPD	silná plastická deformace (z anglického severe plastic deformation)
LPF	tvarování laserem (z anglického laser peen forming)
WLSP	laserové kuličkování za tepla (z anglického warm laser shock peening)
LPwC	laserové kuličkování bez povlakové vrstvy (z anglického laser peening without coating)
CLSP	laserové kuličkování kryogením laserem (z anglického cryogenic laser shock peening)
fs-LSP	laserové kuličkování femtosekundovým laserem (z anglického femtosecond laser shock peening)
EP-LSP	elektroimpulzní laserové kuličkování (z anglického electro pulsing-assisted laser shock peening)
TUL	Technická univerzita v Liberci
VUT	Vysoké učení technické v Brně
MUNI	Masarykova univerzita
LCP	laserové kavitační zpevňování (z anglického laser cavitation peening)
LCPwC	laserové kavitační zpevňování bez krycí vrstvy (z anglického laser cavitation peening without cover)

Seznam obrázků

- Obrázek 1: Vyobrazení kavitace ve fázovém diagramu
- Obrázek 2: Zánik kavitační dutiny a její následná imploze k povrchu tělesa (jet efekt)
- Obrázek 3: Lodní šroub poškozený kavitační erozí [4]
- Obrázek 4: Experiment hydrodynamické kavitace ve vodním tunelu [4]
- Obrázek 5: Schéma základních metod zpevňování povrchu rázem: (a) kuličkování, (b) ultrazvukové rázové kuličkování, (c) laserové rázové kuličkování [12]
- Obrázek 6: Důsledky modifikace povrchu SP [13]
- Obrázek 7: Vznik RCS na povrchu materiálu
- Obrázek 8: Sestava ultrazvukového systému od společnosti SINTES [15]
- Obrázek 9: Proces vyvolání rázové vlny působením laserového svazku [17]
- Obrázek 10: Erozní křivka – časový průběh kavitace
- Obrázek 11: Vývoj vstříkování kavitačního mraku [19]
- Obrázek 12: Zpevněná oblast zasažená hydraulickou kavitací (*materiál: čistý hliník*) [19]
- Obrázek 13: Úbytek hmotnosti hliníku v závislosti na vzdálenosti trysky od povrchu [20]
- Obrázek 14: Schéma procesu laserového kavitačního zpevňování (LCP)
- Obrázek 15: Snímky z aplikace metody LCPwc na objekt ponořený v nádobě s kapalinou [18]
- Obrázek 16: Závislost RCS a mikrotvrdosti oceli Q235 na změně vzdálenosti γ [21]
- Obrázek 17: Drsnost povrchu uhlíkové oceli Q235, (a) nemodifikovaný, (b) modifikace LCPwc, (c) modifikace LCP [21]
- Obrázek 18: Schéma ultrazvukového kavitačního zpevňování
- Obrázek 19: Teorie procesu zpevňování ultrazvukem [23]
- Obrázek 20: Naměřené hodnoty RCS [23]
- Obrázek 21: Výkres experimentálního (zkušební) vzorku
- Obrázek 22: Zkušební vzorky před broušením, vlevo EN AW-2007, vpravo EN AW-6082
- Obrázek 23: Dvourychlostní dvoukotoučová bruska a leštička Alpha od firmy BUEHLER
- Obrázek 24: Broušený vzorek
- Obrázek 25: Jednokotoučová bruska a leštička SAPHIR 550 od firmy ATM s příslušenstvím
- Obrázek 26: Zkušební vzorky EN AW-2007 a EN AW-6082 po fázi finálního leštění
- Obrázek 27: Experimentální sestava ultrazvukového kavitačního zpevňování
- Obrázek 28: Upevnění zkušební vzorku do upínací příruby
- Obrázek 29: Upevnění upínací příruby do dvoustěnné nádoby
- Obrázek 30: Schématický řez uzavřenou nádobou
- Obrázek 31: Průběh experimentu
- Obrázek 32: Snímek zpevněného vzorku
- Obrázek 33: Snímek erozního vzorku

Obrázek 34: Ultrazvukový procesor UIP1000hd [24]
Obrázek 35: Laboratorní váha KERN PBS/PBJ společně s fénem
Obrázek 36: Mikrotvrdoměr DURAMINO 40 od firmy Struers
Obrázek 37: Snímek zkušební vzorku EN AW-6082 s rozvrhnutým polem vpichů
Obrázek 38: Otisk etalonu EN AW-2007 Inkubační doba: 0 [min] Tvrdost: 125.56 HV0.5
Obrázek 39: Otisk etalonu EN AW-6082 Inkubační doba: 0 [min] Tvrdost: 102.51 HV0.5
Obrázek 40: Otisk vzorku EN AW-2007 Inkubační doba: 12 [min] Tvrdost: 163.89 HV0.5
Obrázek 41: Otisk vzorku EN AW-6082 Inkubační doba: 1 [min] Tvrdost: 113.88 HV0.5
Obrázek 42: Bezkontaktní profilometr SENSOFAR S-NEOX
s konfokálním a interferometrickým mikroskopem
Obrázek 43: Schéma pozic vzorku
Obrázek 44: Schéma parametrů drsnosti [28]
Obrázek 45: Snímek 3D struktury povrchu vzorku t = 12 min, pozice 2, materiál EN AW-2007
Obrázek 46: Průřez povrchové vrstvy vzorku t = 1 min, pozice 1, materiál EN AW-6082
Obrázek 47: Rozbrušovací pila DELTA od firmy Buehler
Obrázek 48: Přesná pila BRILLANT 220 od firmy ATM
Obrázek 49: Modulární metalografický lis OPAL X-Press
Obrázek 50: Zkušební vzorky procesu nanoindentace
Obrázek 51: Micro-indentation tester od firmy CSM Instruments
Obrázek 52: Schéma návrhu konfigurace ultrazvukového kavitačního zpevnování

Seznam grafů

Graf 1: Změna hmotnosti vzorku EN AW-2007
Graf 2: Změna hmotnosti vzorku EN AW-6082
Graf 3: Vliv ultrazvukové kavitace na změnu tvrdosti materiálu EN AW-2007
Graf 4: Vliv ultrazvukové kavitace na změnu tvrdosti materiálu EN AW-6082
Graf 5: Závislost střední hodnoty tvrdosti na době působení kavitačního zpevnování materiálu EN AW- 2007
Graf 6: Závislost střední hodnoty tvrdosti na době působení kavitačního zpevnování materiálu EN AW- 6082
Graf 7: Nárůst drsnosti povrchu materiálu EN AW-2007 v čase
Graf 8: Nárůst drsnosti povrchu materiálu EN AW-6082 v čase
Graf 9: Hodnoty tvrdosti dle Vickerse při nanoindentaci materiálu EN AW-2007
Graf 10: Hodnoty tvrdosti dle Vickerse při nanoindentaci materiálu EN AW-6082

Seznam tabulek

- Tabulka 1: Souhrn účinků metod kuličkování na běžné technické materiály
- Tabulka 2: Souhrn účinků metody ultrazvukového kuličkování na běžné technické materiály
- Tabulka 3: Přehled pokročilých metod laserového kuličkování
- Tabulka 4: Souhrn účinků metody laserového kuličkování na běžné technické materiály
- Tabulka 5: Zlepšení únavové meze modifikovaných materiálů
- Tabulka 6: Zvýšení hodnoty tvrdosti dle Vickerse u modifikovaných materiálů
- Tabulka 7: Mechanické parametry materiálu EN AW-2007
- Tabulka 8: Chemické složení prvků materiálu EN AW-2007
- Tabulka 9: Mechanické parametry materiálu EN AW-6082
- Tabulka 10: Chemické složení prvků materiálu EN AW-6082
- Tabulka 11: Erozní test EN AW-2007 Inkubační fáze: 16 [min]
- Tabulka 12: Erozní test EN AW-2007 Přejížděvací fáze (akcelerace)
- Tabulka 13: Erozní test EN AW-6082 Inkubační fáze: 14 [min]
- Tabulka 14: Erozní test EN AW-6082 Přejížděvací fáze (akcelerace)
- Tabulka 15: Časové intervaly pro zkušební vzorky materiálu EN AW-2007
- Tabulka 16: Časové intervaly pro zkušební vzorky materiálu EN AW-6082
- Tabulka 17: Naměřené hodnoty tvrdosti dle Vickerse HV0.5 materiálu EN AW-2007
- Tabulka 18: Střední hodnota a směrodatná odchylka výsledků tvrdosti materiálu EN AW-2007
- Tabulka 19: Naměřené hodnoty tvrdosti dle Vickerse HV0.5 materiálu EN AW-6082
- Tabulka 20: Střední hodnota a směrodatná odchylka výsledků tvrdosti materiálu EN AW-6082
- Tabulka 21: Výškové parametry dle normy ISO 25178
- Tabulka 22: Naměřené hodnoty parametru Ra pro materiál EN AW-2007 v mikrometrech
- Tabulka 23: Naměřené hodnoty parametru Rz pro materiál EN AW-2007 v mikrometrech
- Tabulka 24: Naměřené hodnoty parametru Ra pro materiál EN AW-6082 v mikrometrech
- Tabulka 25: Naměřené hodnoty parametru Rz pro materiál EN AW-6082 v mikrometrech

1 Úvod

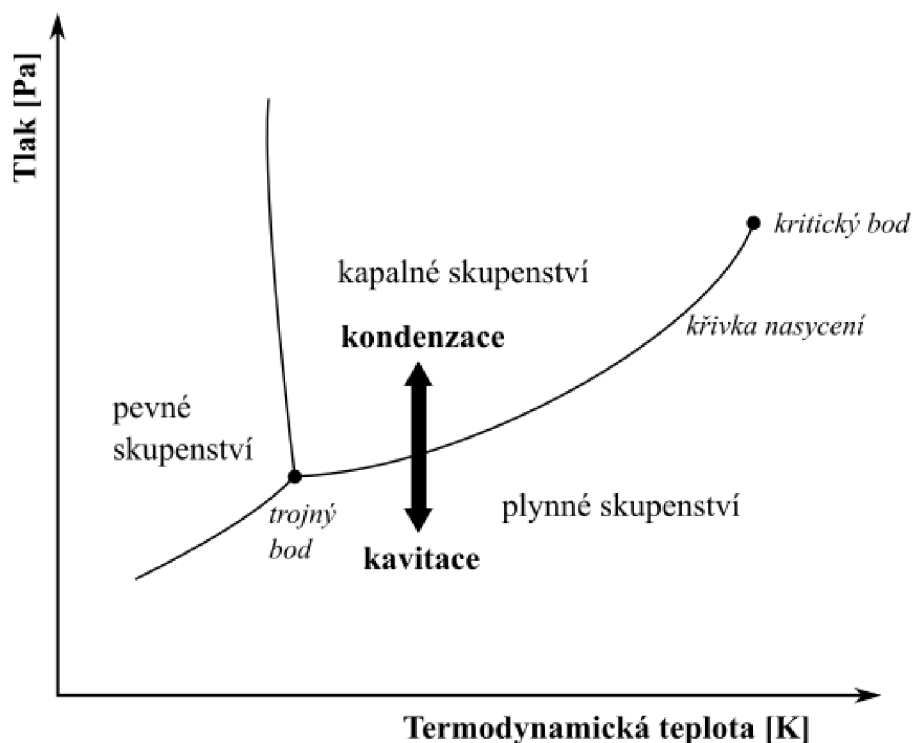
V současné době je kavitace stále vnímána jako nepříznivý jev, jenž svým účinkem způsobuje poškození na povrchu hydraulických těles, jako jsou například turbíny. Avšak s pokrokem technologií se čím dál více objevují nové přístupy, které z kavitačního jevu těží. Příkladem může být oblast medicíny, kde se kavitace využívá k odstranění ledvinových kamenů či přebytečného tuku z těla. Úspěchu se kavitací dostává i v samotném strojírenském průmyslu, kdy je na jejím principu založena metoda obrábění ultrazvukem. Veškeré zmíněné metody spojuje myšlenka destruktivního procesu. Tato diplomová práce je též založena principu využití kavitačního jevu ku prospěchu, avšak jejím primárním účelem není destrukce, ale potenciál v oblasti zpevňování hliníkových kovů. Právě myšlenka využít tento negativně vnímaný jev pro aplikaci při zpevňování materiálu namísto jeho ničení, bylo motivací k výběru tohoto tématu ke zkoumání a zpracování.

Cílem diplomové práce je seznámit čtenáře s tematikou kavitačního zpevňování a následně provést experiment s využitím ultrazvukové kavitace. Práce je rozdělena do několika kapitol, kde se první kapitola věnuje úvodu do problematiky kavitace a popisuje ji především pro účely této práce. Následuje rešeršní část pojednávající o konvenčních metodách zpevňování materiálu, jejichž princip je do značné míry porovnatelný s metodami kavitačního zpevňování. V návaznosti na to jsou popsány i nejaktuálnější poznatky z oblasti metod kavitačního zpevňování. Dalším bodem je již experimentální část, kde je v první řadě zdokumentován výběr materiálů a příprava zkušebních vzorků. Samotný experiment je poté rozdělen do dvou fází. V první fázi jsou vzorky vystaveny eroznímu testu, jehož výstupem je inkubační doba, jenž udává časové rozmezí, během kterého se materiál zpevňuje. Při druhé fázi se již aplikuje metoda ultrazvukové kavitace po různých časových intervalech, jenž jsou stanoveny na základě získaných dat erozního testu. Pro odpověď na základní otázku, zda bylo dosaženo zpevnění materiálu slouží kapitola vyhodnocení experimentu. Zde je účinnost procesu kavitačního zpevňování hodnocena z hlediska měření tvrdosti, drsnosti povrchu a nanoindentace. V návaznosti na to je součástí práce i diskuze, jenž stručně sepisuje poznatky získané při hodnocení výsledků experimentu. Celou práci nakonec uzavírá ideový návrh konfigurace pro využití kavitačního zpevňování na reálné strojní součásti.

2 Kavítace

2.1 Úvod do problematiky kavítace

Pod pojmem kavítace si dnes dokážeme představit složitý termodynamický děj, popisující vznik a následný zánik dutiny v kapalině. Za počátek tohoto děje lze označit moment, kdy v kapalině dochází k poklesu tlaku na hodnotu nižší, než je hodnota tlaku sytých par, jež odpovídá dané termodynamické teplotě. Důsledkem této skutečnosti je narušení kontinuity kapaliny vlivem odpařování a výskyt kavitačních bublinek (na Obrázku 1 je vyobrazen proces kavítace při přechodu do plynného skupenství).¹ Kavitační bublinky jsou tvořeny převážně párou, ale z části obsahují i vyloučený plyn, jenž je rozpuštěn v kapalině. Při následném pohybu bublin do míst, kde je tlak kapaliny opět vyšší, dochází uvnitř kavitačních bublin ke kondenzaci a vzniku kavitační dutiny. Působení tlaku okolní kapaliny po chvílce poškodí obal dutiny a ta je vzápětí velkou rychlostí zaplněna kapalinou. Dutina imploduje a tím je zapříčiněno vzniku rázů v oblasti kavitačních dutin, které vedou buď k vyvolání silných rázových vln nebo vytvoření mikroproudu, nazývaného též jet efekt. Tyto jevy jsou považovány za průvodce při výskytu kavitační eroze.²

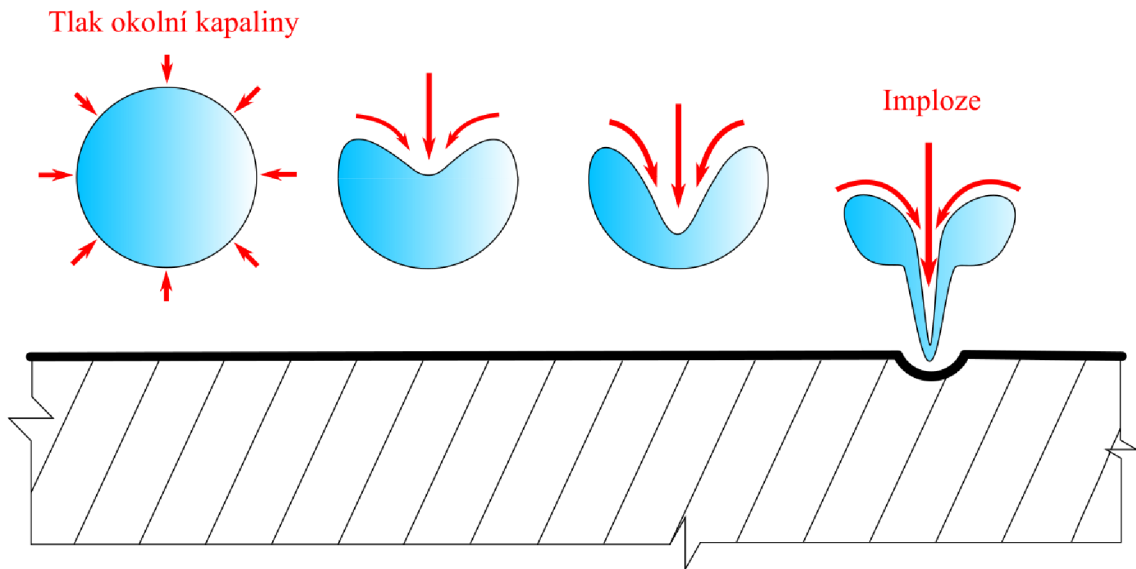


Obrázek 1: Vyobrazení kavítace ve fázovém diagramu

¹ [1] HÚJER, Jan. *Studie kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů* Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2020. s. 13.

² [2] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavítace*. Praha: Academia, 1969. s. 19.

Kavitační eroze bývá v praxi běžně označována jako nepříznivý jev. Což je zapříčiněno faktem, že při zániku kavitační dutiny je směr imploze orientován k blízkému povrchu pevného tělesa. Ve strojním průmysle jsou kavitační erozí nejvíce omezovány funkce hydraulických zařízení. Konkrétně funkce hydromotorů – turbín a hydrogenerátorů – čerpadel. Právě zde totiž dochází k velkým změnám rychlosti, teploty a tlaku při práci s kapalinou. Během kavitace dochází mimo rozrušení povrchu těles i k vibracím stroje. To může zapříčinit pokles účinnosti nebo dokonce snížení životnosti stroje.³



Obrázek 2: Zánik kavitační dutiny a její následná imploze k povrchu tělesa (jet efekt)

V současnosti je problematika kavitační eroze stále důležitým tématem. Konstrukční řešení kavitace jsou však různá. V první řadě je nutné vzít v potaz druh kavitace – kde vzniká a co ji zapříčinilo. Poté je možno aplikovat různé metody řešení. Obecně však lze vzít v úvahu kavitační odolnost materiálu, která závisí na druhu materiálu a tepelném zpracování. Nejvyšší kavitační odolnost můžeme pozorovat u austenitických ocelí a ocelí s legujícími prvky jako je chrom a nikl. Dalším řešením může být změna sací výšky, avšak ta s sebou nese i negativní dopad z ekonomického hlediska.⁴ Za zmínku stojí i inovační metody moderního inženýrství. Jednou z nekonvenčních metod je ochrana s využitím okolního prostředí – kapaliny. Při této metodě dochází k ochlazení lopatek stroje pod hodnotu bodu mrazu. Tím se docílí vzniku zamrznuté vrstvy kapaliny přímo na povrchu lopatek. Kavitační eroze poté nerozrušuje povrch částí stroje, ale právě onu zamrznutou vrstvu.

³ [3] MELICHAR, Jan. *Úvod do čerpací techniky*. Praha: České vysoké učení technické, 2012. s. 22.

⁴ [2] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace*. Praha: Academia, 1969. s. 69 – 82., s. 211 – 217.



Obrázek 3: Lodní šroub poškozený kavitační erozí [4]

2.2 Využití kavitace

Podíváme-li se na kavitační jev z hlediska užitku, lze jej využít v mnoha různých oblastech. Zpravidla se však jedná o použití za účelem destrukce. Pro realizaci je nutné, aby kavitace byla vygenerována uměle pomocí přístrojů. Zde jsou uvedeny některé ze způsobů uplatnění:

- 1) Litotrypse extrakorporální rázovou vlnou
Neinvazivní metoda pro odstranění ledvinových konkrementů a žlučových kamenů.⁵
- 2) Ultrazvuková liposukce
Odstraňování přebytečného tuku z těla.
- 3) Odstranění špíny ze zákoutí šperků
Narušování povrchu na špatně přístupných oblastech pomocí akustické kavitace.⁶
- 4) Obrábění ultrazvukem
Nekonvenční metoda obrábění, při které je řízeně rozrušován povrch obrobku.
- 5) Čištění kapalin
V roce 2020 byl zapsán patent vědců z VUT, MUNI a Botanického ústavu AVČR, jenž popisuje zařízení pro čištění kapaliny od biologického i chemického znečištění.⁷

⁵ [5] *Litotrypse extrakorporální rázovou vlnou*. Wikiskripta.eu [online]. Brno: MEFANET, 2023.

⁶ [6] *Udržujte své šperky v dokonalé čistotě*. Sperky.cz [online]. Chrudim: VIVANTIS, 2023.

⁷ [7] *Zařízení pro čištění kapalin a způsob čištění kapalin s využitím tohoto zařízení*. VUT.cz [online]. Brno: VUT, 2023

2.3 Způsoby generování kavitace

Příčiny vzniku kavitace obecně označujeme buď za přirozené, nebo uměle vytvořené. V případě přirozeného výskytu je však obtížné udržovat kontrolu nad průběhem kavitační eroze. Proto se při experimentech a v různých aplikacích generují kavitační bublinky uměle. Způsoby pro generaci kavitační oblasti v kapalině jsou různé. Z hlediska principu je rozdělujeme na tlakové a energetické.

A. Tlakový princip generace kavitační bublinky

Do oblasti tohoto principu zařazujeme hydrodynamickou a akustickou kavitaci. Tlakový princip generuje velké množství kavitačních bublinek a je tím pádem nejlépe srovnatelný s reálným fyzikálním procesem, jenž můžeme sledovat při kavitační erozi. Za značnou výhodou můžeme též uvažovat fakt, že při tomto principu nedochází k vyvolání dalších přidavných efektů, které by mohli, jakkoliv ovlivnit průběh a výsledky experimentu.⁸

Hydrodynamickou kavitací se rozumí situace, při které dochází k transformaci tlakové složky kapaliny na její složku rychlostní. Tím je zapříčiněno poklesu tlaku pod hodnotu tlaku sytých par a vzniku kavitačních bublinek. Pomocí generace hydrodynamickou kavitací lze simulovat průběh děje, ke kterému dochází při provozu hydraulických zařízení.⁹

Akustická kavitace využívá kmitání pevných těles, jež jsou ponořena v kapalině. Piezoelektrické a magnetostrikční měniče vyvolávají silné akustické vlny, které zapříčiní pokles tlaku v kapalině a počátek kavitačního rozrušení.¹⁰ Tento princip se využívá například při čištění šperků či jako způsob terapie v medicíně. Akustickou kavitací lze vyvolat nejen frekvencí slyšitelného spektra (16 Hz až 16 kHz) ale i ultrazvukem (16,5 kHz a výše).¹¹

B. Energetický princip generace kavitační bublinky

Na rozdíl od tlakového principu, je energetický princip aplikován spíše v případech, kdy je potřeba generovat pouze jednu bublinku. Své využití tak nachází spíše při studiu dynamiky kavitační bublinky a procesů, které vyvolává. Řadíme sem metodu generování pomocí přechodového odporu, elektrického výboje, nebo optickou kavitací. Za nevýhodu energetických principů

⁸ [8] HUIJER, J. *Mechanismy kolapsů kavitačních bublin v blízkosti pevných povrchů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013. s. 24 – 25.

⁹ Tamtéž, s. 25.

¹⁰ Tamtéž, s. 25.

¹¹ [9] BRDIČKA, M. *Kavitace: diagnostika a technické využití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981. s. 144.

můžeme označit vliv tepelného působení, ke kterému dochází u všech metod. Tepelné působení s sebou nese dopad na parametry bublinky (tlak, poloměr, rychlost kolapsu). Oproti přirozeně vyskytující se kavitační bublince se tímto principem vygenerovaná bublinka chová agresivněji.¹²

Metoda přechodového odporu je založena na využití tepelné energie. Do kapaliny jsou ponořeny dvě elektrody, jež se dotýkají v jednom bodě. Přivedením elektrického napětí do elektrod se na místě dotyku vytvoří přechodových odpor. To má za následek vznik velkých hodnot Jouleova tepla a vypařování kapaliny až do vyvolání imploze kavitační bublinky.¹³

Metoda elektrického výboje pracuje na principu vytvoření plazmy, která následně ohřeje kapalinu. Podobně jako u metody přechodového odporu jsou zde ponořeny dvě elektrody v kapalině. Výboj v jiskřišti zapříčiní pohyb nabitých částic, které narážejí do částic s neutrálními atomy. Dochází k procesu ionizace, jež vede ke vzniku již zmiňované plazmy. Plazma následně ohřívá kapalinu ve svém okolí, kapalina se začne vypařovat a tvořit bublinky.¹⁴

Optická kavítace je založena na vytvoření soustředěného svazku laserového záření do určitého bodu – ohniska v kapalině. V tomto místě dojde k uvolnění energie záření z paprsku. Kapalina je stejně jako v případě užití výboje ionizována a vzniká plazma, která ohřeje kapalinu a zapříčiní vznik kavítace. K růstu bublinky zde dochází velkou rychlostí.¹⁵



Obrázek 4: Experiment hydrodynamické kavítace ve vodním tunelu [4]

¹² [8] HÚJER, J. *Mechanismy kolapsů kavitačních bublin v blízkosti pevných povrchů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013. s. 28.

¹³ Tamtéž, s. 26 – 27.

¹⁴ Tamtéž, s. 26.

¹⁵ Tamtéž, s. 28.

3 Zpevňování povrchu materiálu

V současné době lze považovat zpevňování povrchu materiálu za běžný postup při snaze dosažení lepších mechanických vlastností a delší životnosti výrobku. Mezi klíčové vlastnosti materiálu se v tomto ohledu pohlíží zejména na tvrdost a pevnost. Ve specifických případech může hrát podstatnou roli i korozní odolnost či drsnost povrchu. Abychom docílili vysoké hodnoty tvrdosti, a přitom zachovali vhodné parametry houževnatosti jádra, musí být povrch výrobku vystaven značným technologickým změnám. Existuje mnoho technologických způsobů, které se aplikují pro zpevňování povrchu. Obecně však lze zmínit způsoby, jako jsou mechanické zpevnění (válečkování a kuličkování), tepelné zpracování (povrchové kalení), chemicko-tepelné zpracování (cementace a nitridace) nebo povlakování.¹⁶

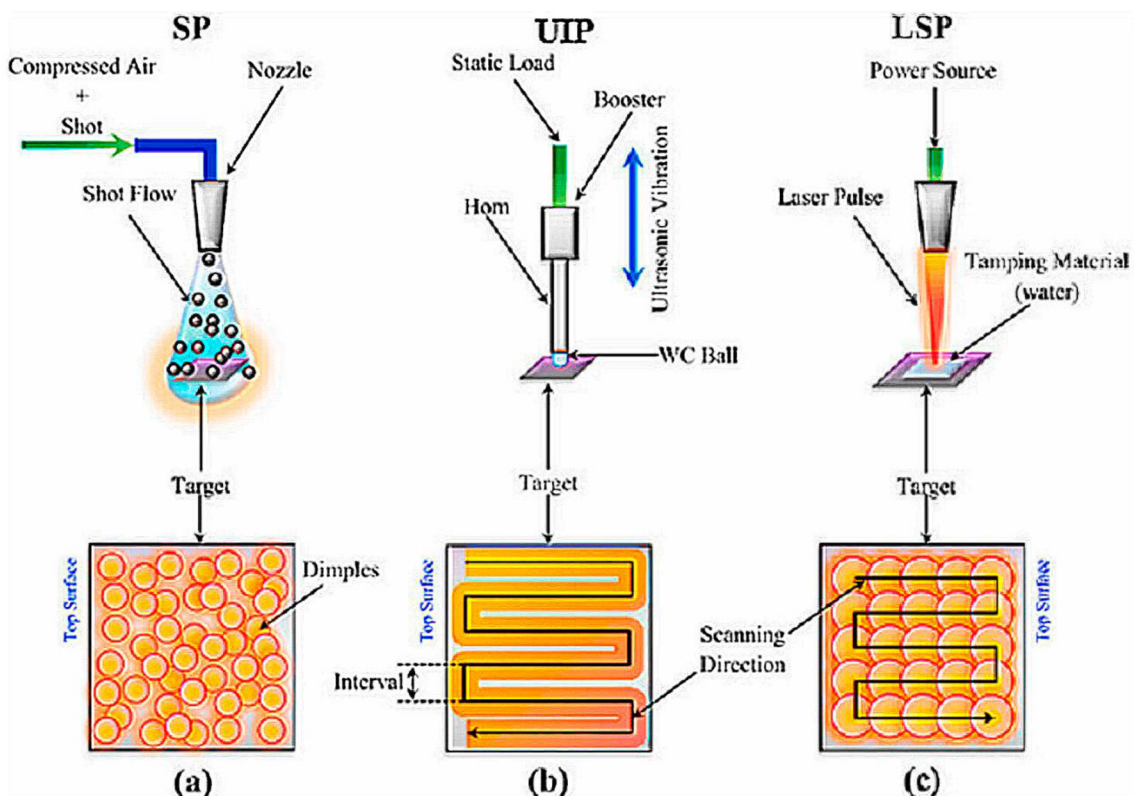
Součástí této kapitoly je níže zpracovaná rešerše z oblasti metod zpevňování povrchu materiálu. Výběr metod je zohledněn z hlediska porovnatelnosti s metodou užití kavitační eroze při zpevňování materiálu.

3.1 Zpevňování povrchu rázem (Peening methods)

Jedná se o soubor metod vytvrzování povrchové vrstvy materiálu, jenž je běžně označován dle anglického výrazu „peening methods“ (PM). Do tohoto souboru řadíme metody jako kuličkování (shot peening – SP), ultrazvukové rázové kuličkování (ultrasonic impact peening – UIP) a laserové rázové kuličkování (laser shock peening – LSP). Počátek technologie kuličkování se datuje již 50. létům minulého století. Původně si tato technologie našla uplatnění především v leteckém průmyslu, ale postupně se rozšířila i do dalších odvětví. Za přednosti je v první řadě vnímána její jednoduchost, spolehlivost, a hlavně vysoká účinnost modifikace povrchu. Přibližně o deset let později byla objevena metoda zpevňování pomocí vysokofrekvenční ultrazvukové oscilace. Díky této metodě mohl být materiál vystaven silné plastické deformaci. Rostoucí potřeba zpevňování materiálu v automobilovém, leteckém a zdravotnickém průmyslu zapříčinila vznik LSP již na přelomu 60. a 70. let 20. století. Výhodou této metody je dozajista fakt, že s sebou nenese mnoho nevýhod, které mají metody SP a UIP. Zde zmíněné metody zpevňování povrchu jsou důležité vzhledem k jejich častému používání a neustálému vývoji vedoucí k dalšímu možnému využití (např. zpevňování mikrobroky nebo kuličkování kryogenním či femtosekundovým laserem). Na obrázku 5 jsou vyobrazeny schématické ilustrace základních metod.¹⁷

¹⁶ [11] HLUCHÝ, M., MODRÁČEK O. a PAŇÁK R. *Strojírenská technologie 1: Metalografie a tepelné zpracování*. Praha: Scientia, spol., 2002.

¹⁷ [12] John, M., Kalvala, P.R., Misra, M., Menezes, P.L. *Peening Techniques for Surface Modification: Processes, Properties, and Applications*. Materials 2021, s. 1 – 2.



Obrázek 5: Schéma základních metod zpevňování povrchu rázem:

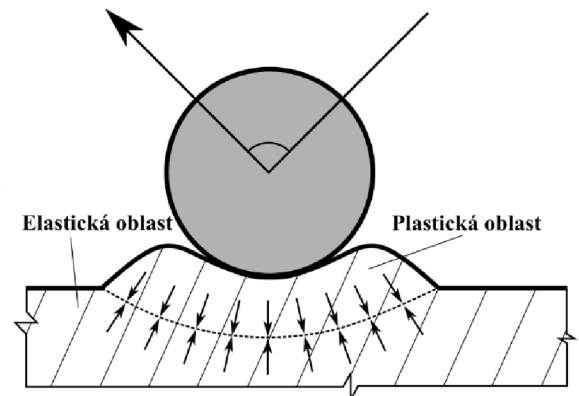
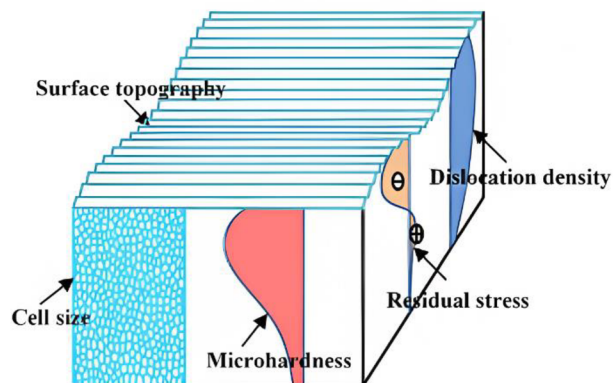
(a) kuličkování, (b) ultrazvukové rázové kuličkování, (c) laserové rázové kuličkování [12]

3.1.1 Kuličkování (SP)

Při technologii kuličkování dochází k vytvrzení povrchové vrstvy vlivem nárazu velkého množství malých sférických střel – kuliček. Kulové střely mohou být z různých materiálů, jako jsou kovy, sklo a keramika. Tyto střely jsou směřovány na cílovou oblast prostřednictvím pistole, která pracuje na stlačený vzduch. Vysoká rychlost stlačeného vzduchu zapříčiní, že náraz střel vytvoří na povrchu objektu důlky, jak je znázorněno na obrázku 5(a). V blízkosti oblasti důlků vzniká plasticky deformovaná zóna, jež je obklopena elastickou zónou. Proces zotavení po odrazu střel zachovává na povrchu objektu zbytkové tlakové napětí (residual compressive stress – RCS). Indukované RCS má pozitivní vliv na pevnostní, únavové nebo korozní charakteristiky. Mimo vzniku RCS na povrchu můžeme pozorovat i zjemnění zrn a lepší parametry mikrotvrdosti materiálu (Obrázek 6). Zvýšená odolnost proti korozi u SP je přisuzována zmenšené velikosti krystalů, tvorbě subzrn a povrchové nanokrystalizaci.¹⁸

¹⁸ [12] John, M., Kalvala, P.R., Misra, M., Menezes, P.L. *Peening Techniques for Surface Modification: Processes, Properties, and Applications*. Materials 2021, s. 1 – 4.

Modifikace povrchu kuličkováním může taktéž vést k zabránění šíření trhlin a zlepšení únavové pevnosti materiálu. Mechanismus bránění šíření trhlin spočívá v uzavření únavových trhlin pomocí silového působení vrstvy zbytkových tlakových napětí. Pro tento proces se kuličkování používá ke zpevnění kovových součástí, jež jsou náchylné k únavovým poruchám. Je však nutné brát zřetel při volbě vhodných parametrů modifikace. Může totiž nastat i situace, ve které se naopak životnost výrobku sníží vlivem zvýšené drsnosti povrchu. V nejhorším případě může dojít až ke vzniku povrchových mikrotrhlin.¹⁹



Obrázek 6: Důsledky modifikace povrchu SP [13]

Obrázek 7: Vznik RCS na povrchu materiálu

Řídící parametry modifikace kuličkováním

Výsledná modifikace povrchu může být řízena mnoha měřitelnými parametry. Řadíme sem především vlastnosti střel (materiál, průměr) a modifikovaného povrchu, úhel dopadu kuliček, intenzitu a hustotu pokrytí oblasti. Za klíčové parametry se uvažuje intenzita střel a hustota pokrytí cílené oblasti. Zvýšení těchto parametrů bývá v literatuře označováno za žádoucí. A to z důvodu dosažení výrazně vyšších hodnot zbytkových tlakových napětí spolu s větší tloušťkou zpevněné vrstvy. V tomto případě byl však zaznamenán i rozporuplný vztah mezi intenzitou zpevnění a RCS. Dřívější výzkumy byly prováděny metodou pokus – omyl a jejich proces je označován za náročný a zdlouhavý. V současné době je však možné využít moderních technologií pro získání věrohodnějších výsledků. Příkladem může být demonstrace modelu konečných prvků (FEM) či metoda plochy odezvy (RSM). Oba zmíněné příklady se vyznačují nízkými náklady a vysokou spolehlivostí získaných výsledků. Dalším faktorem, oproti dřívějším experimentům, může být rozdíl ve způsobu simulace procesu. Dříve se aplikovala simulace s jednou nebo více

¹⁹ [13] Lin, Q., Liu, H., Zhu, C., Chen, D., Zhou, S. *Effects of different shot peening parameters on residual stress, surface roughness and cell size*. Surf. Coat. Technol. 2020, s. 1 – 2.

střelami. Dnes se spíše prosazuje simulování s více střelami náhodně.²⁰ Jeden takový experiment provedli Lin a kolektiv pomocí programu Abaqus (finite element analysis - FEA), kdy korelovali vliv rychlosti střel a hustotu pokrytí kuličkované oblasti s hodnotou vzniklého zbytkového napětí a velikostí dislokačních buněk. Jejich studie odhalila, že čím vyšší je rychlost výstřelu, tím je dosaženo větší tloušťky vrstvy RCS, ale zároveň je zapříčiněno zhoršení drsnosti povrchu. Zvýšením hustoty pokrytí při procesu kuličkování se nedosáhne zesílení vrstvy RCS s jemnou mikrostrukturou. Zvláštní pozornost však autoři věnují faktu, který popisuje výrazné zvýšení RCS v podpovrchové vrstvě. Toho je docíleno právě vyšší hustotou pokrytí, jež byla srovnávána s vyšší rychlostí výstřelu, která tohoto zesílení nedosáhla.²¹ Wang a kolektiv ve své práci využili kombinaci již zmíněných metod FEM a RSM. Cílem experimentu bylo optimalizovat parametry výstřelu pro aplikaci kuličkování na vzorky materiálu 42CrMo. Výsledkem této studie je optimalizace rychlosti střel výstřelu na 88 m/s, průměr kuliček 0,8 mm a poměr pokrytí 170 %. Těmito hodnotami parametrů se dosáhlo navýšení únavové životnosti vzorku 42CrMo až o 104 %. Dále vědci uvádějí, že parametry procesu kuličkování byly udržovány v rozumných mezích, aby se snížila možnost iniciace trhlin způsobených vlivem RCS.²²

Pokročilé metody kuličkování

V současné době je metoda kuličkování stále rozvíjena z důvodu rozsáhlé aplikace v průmyslu. Důsledkem rozvoje byly zavedeny nové pokročilé metody kuličkování, jenž umožňují dosáhnout vhodnějších parametrů povrchu. Za zmínku stojí zejména metody SSP (severe shot peening) a MSP (micro-shot peening). Podstatou SSP je využití intenzivnějších parametrů procesu kuličkování, které způsobí vznik nanokrystalizace na povrchu a prohloubení vrstvy RCS. Přestože tato metoda s sebou nese podstatné zlepšení vlastností oproti samotné SP, musíme brát ohled i na její škodlivý vliv v podobě snížení únavové meze některých materiálů nebo zvýšení drsnosti povrchu. Například únavová životnost litin byla při použití SSP snížena. Příčinou byla vysoká kinetická energie výstřelů. Tento škodlivý faktor je možno odstranit aplikací opětovného SSP (nazývaného re-peened severe shot peening – RSSP). Menšího negativního dopadu drsnosti můžeme dosáhnout při použití metody MSP. Zde lze pomocí mikro střel, které jsou menší a tvrdší, než bývají kuličky u SP, docílit snížení drsnosti a zároveň výrazně zlepšit vlastnosti povrchu.

²⁰ [12] John, M., Kalvala, P.R., Misra, M., Menezes, P.L. *Peening Techniques for Surface Modification: Processes, Properties, and Applications*. Materials 2021, s. 3 – 4.

²¹ [13] Lin, Q., Liu, H., Zhu, C., Chen, D., Zhou, S. *Effects of different shot peening parameters on residual stress, surface roughness and cell size*. Surf. Coat. Technol. 2020, s. 10.

²² [14] Wang X., Wang, Z., Wu, G., Gan, J., Yang, Y., Huang, H., He, J., Zhong, H. *Combining the finite element method and response surface methodology for optimization of shot peening parameters*. International Journal of Fatigue, Volume 129, 2019, s. 12.

Souhrnem aktuálních poznatků z výše zmiňovaných pokročilých metod kuličkování se zabývá John a kolektiv ve svém vědeckém článku.²³

Tabulka 1: Souhrn účinků metod kuličkování na běžné technické materiály

Modifikovaný materiál	SP/ SSP/ MSP	Významné důsledky modifikace
AISI 304 SS (nerezová ocel)	SP	Navýšení mikrotvrlosti o 52 %, pevnosti o 14 % a lomové houževnatosti o 18 %.
Ti6Al4V	SP	Zlepšení únavové životnosti o 34 % a snížení rychlosti šíření malých trhlin o rozmezí 34 – 60%.
AISI 4140 (nizkolegovaná)	SP	Navýšení odolnosti proti korozi, drsnosti povrchu. Zjemnění zrnitosti a tvorba subzrn.
Niklová slitina Hastelloy X	SSP	Po SSP je dosaženo RCS 1200 MPa ve hloubce 125 μm. Velikost zrn na povrchu je 50 nm. Tvrдость 2,2x větší než u SP.
Ocel X70	SSP	Zlepšení meze únavy a zpevnění a drsnosti povrchu.
Hořčíkové slitiny AZ31 a AZ91	SSP	Vznik nanozrn na deformované vrstvě. Zvýšení mikrotvrlosti. Zlepšení korozní odolnosti u slitiny AZ31.
Čistý Titan	SSP	Jemnozrný povrch s velikostí zrn 100 nm. Navýšení mikrotvrlosti a modulu pružnosti.
Litina	RSSP	Vysoké zpevnění, hloubka RCS a nanokrystalizace. Po opakovaném SSP je snížena drsnost a zlepšena únavová mez.
Rychlořezná nástrojová ocel	MSP	Vyšší hodnoty RCS na povrchu při zachování nízké drsnosti povrchu.
Konstrukční ocel	MSP	Navýšení únavové meze a odolnosti proti opotřebení.

Zdroj: [12] John, M., Kalvala, P.R., Misra, M., Menezes, P.L. *Peening Techniques for Surface Modification: Processes, Properties, and Applications*. Materials 2021. s. 7.

²³ [12] John, M., Kalvala, P.R., Misra, M., Menezes, P.L. *Peening Techniques for Surface Modification: Processes, Properties, and Applications*. Materials 2021, s. 4 – 8.

3.1.2 Ultrazvukové rázové kuličkování (UIP)

Metoda ultrazvukového kuličkování využívá ke zpevnění povrchu pistoli s kulatým hrotem, jenž vibruje při vysoké frekvenci způsobené ultrazvukovým generátorem (viz. Obrázek 5(b)). Při interakci vibrujícího kuličkového hrotu s objektem je na povrchu materiálu vyvozena silná plastická deformace (severe plastic deformation – SPD), která vyvolá zbytkové tlakové napětí (RCS). Způsobená forma silné plastické deformace napomáhá ke zjemnění zrn, odstranění zbytkových tahových napětí (pokud se vyskytují) a zacelení existujících mikrotrhlin. Během ultrazvukového zpevnění je vytvořena zahuštěná povrchová vrstva, jenž má lepší parametry tvrdosti, korozní odolnosti, odolnosti proti opotřebení či únavové meze. Zařízení pro UIP se skládá ze sestavy zahrnující zdroj vysokého napětí (generátor ultrazvuku), měnič, pistoli, koncentrátor, chladicí systém a rázový nástroj (kuličkové nástavce). Součástí pistole je i válcová hlavice pro vyvolání vibrací na konci rázového nástroje. Hlavice kmitá s frekvencí vyšší než 20 kHz. Právě hodnota frekvence má významný dopad na zvýšení účinků při ultrazvukovém kuličkování.²⁴ Na Obrázku 8 je k vidění sestava ultrazvukového systému, jež byla součástí studie vědeckého článku – *A review of ultrasonic peening treatment* od Malaki a Ding. Ultrazvukové rázové kuličkování je řazeno mezi přední metody zpevňování povrchu za studena. Užitečné uplatnění nachází při modifikaci povrchu svařovaných konstrukcí. Další aplikace UIP můžeme sledovat například v leteckém, lodním a železničním průmyslu.²⁵



Obrázek 8: Sestava ultrazvukového systému od společnosti SINTES [15]

²⁴ [12] John, M., Kalvala, P.R., Misra, M., Menezes, P.L. *Peening Techniques for Surface Modification: Processes, Properties, and Applications*. Materials 2021, s. 2, 8.

²⁵ [15] Malaki, M., Ding, H. *A review of ultrasonic peening treatment*. Materials & Design 2015, s. 1 – 2.

Proces ultrazvukového zpevňování

Problematikou aplikace ultrazvukového nárazu se zabývali Statnikov a kolektiv. Ve své studii popsali teorii a výsledky experimentu z fyzikálního hlediska. Mimo jiné se věnovali také mechanismu vyvolání ultrazvukového úderu s využitím měniče. Za počátek jejich experimentu se označuje moment, kdy je zapojen a spuštěn zdroj elektrického proudu. Elektrický proud vyvolá stojatou vlnu na připojeném měniči. Odtud je dále vlnění zesíleno koncentrátorem a přeneseno až do nástroje. Nástroj začne vibrovat a při kontaktu s povrchem materiálu vyvolává silné rázové působení. Povrch materiálu je v důsledku rázů vystaven silné plastické deformaci (SPD).²⁶ V současnosti se pro tvorbu ultrazvukových vln používají dva typy měničů – magnetostrikční a piezoelektrické. Magnetostrikční měniče fungují pomocí principu převodu elektrické energie na vysokofrekvenční vibrace s vysokou amplitudou. Jelikož při procesu UIP dochází výraznému zahřívání, je důležité zajistit chlazení pro komponenty sestavy. Z tohoto důvodu je součástí sestavy i chladicí systém, jenž bývá nákladný a objemný. Tento fakt lze dozajista považovat za nevýhodu magnetostrikčních měničů. Častěji používané bývají měniče piezoelektrické. Jejich výhodou je nižší hmotnost, a tudíž i snadnější manipulovatelnost. Metoda UIP s sebou přináší řadu výhod. Za zmínku stojí možnost kontrolovat procesní parametry (změna frekvence), nízká spotřeba energie a téměř žádný odpad vytvořený během zpevňování.²⁷

Tabulka 2: Souhrn účinků metody ultrazvukového kuličkování na běžné technické materiály

Modifikovaný materiál	Významné důsledky modifikace
Austenitická nerezová ocel	Zvýšení únavové meze o 18 % při nízké amplitudě. Velikosti zrn 15 až 12 nm a tloušťka zušlechtnuté oblasti 260 – 345 μm během zpevňování od 3 do 18 min.
Hořčíková slitina AZ31	Velikosti zrn jsou 37 nm. Mikrotvrdost povrchové vrstvy se navýšila o 141 %. Koeficient tření se snížil. Zlepšení odolnosti proti opotřebení. Zpomalení delaminačního opotřebení po UIP.
EN AW-7075 (hliníková slitina)	Proces nanokrystalizace povrchu. Zušlechtnutí zrna a zlepšení odolnosti proti korozi.

²⁶ [16] STATNIKOV, Efim Sh., KOROLKOV, O. V. a VITYAZEV V. N. *Physics and mechanism of ultrasonic impact*. Ultrasonics 2006. s. 1 – 2.

²⁷ [12] John, M., Kalvala, P.R., Misra, M., Menezes, P.L. *Peening Techniques for Surface Modification: Processes, Properties, and Applications*. Materials 2021, s. 8.

EN AW-7150 (hliníková slitina)	Proces nanokrytalizace povrchu. Snížení náchylnosti k exfoliaci a zlepšení odolnosti proti korozi.
Slitina titanu (β)	Dosažení nanokrytalické vrstvy o tloušťce 100 μm na povrchu. Zlepšení mikrotvrdosti.
Čistá měď	Při delším procesu UIP bylo dosaženo navýšení tvrdosti o 233 %.

Zdroj: [12] John, M., Kalvala, P.R., Misra, M., Menezes, P.L. *Peening Techniques for Surface Modification: Processes, Properties, and Applications*. Materials 2021. s. 11.

3.1.3 Laserové rázové kuličkování (LSP)

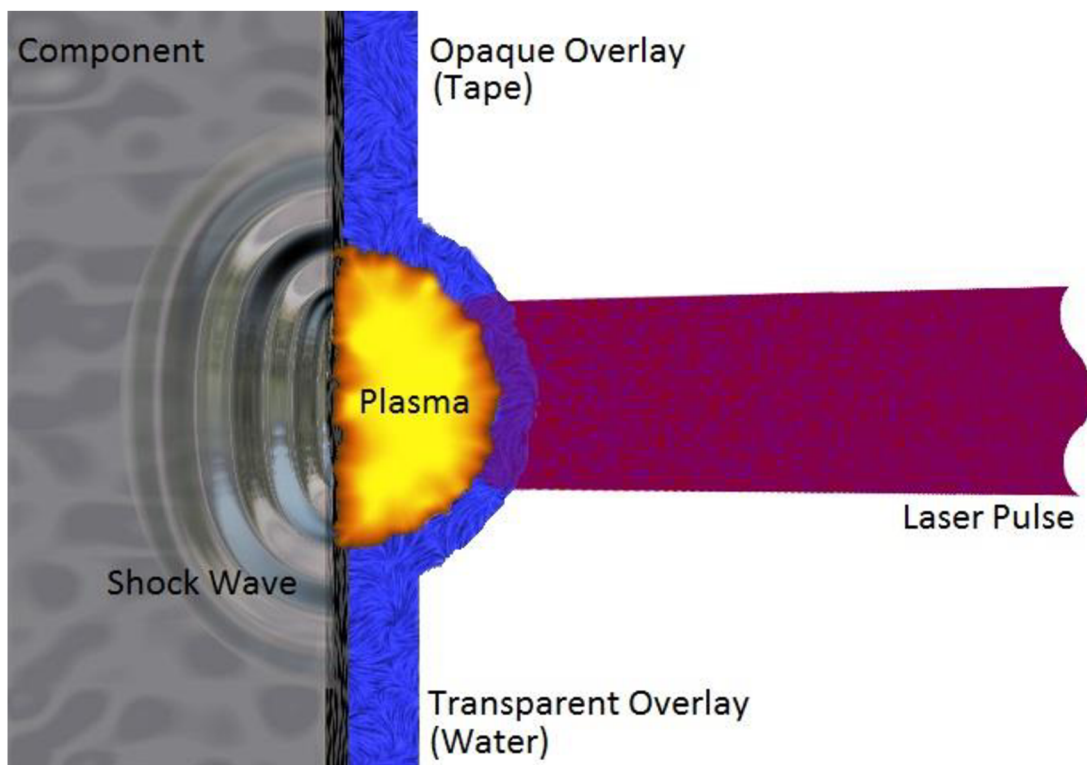
Nejmodernějším zástupcem z řad metod zpevňování rázem je laserové rázové kuličkování. Jedná se o hojně používanou modifikaci povrchu, při které dosahujeme významné hloubky a rovnoměrnějšího zpevnění (viz. Obrázek 5(c)). Podstatou procesu je využití pulzního laserového svazku působícího na cílenou oblast objektu. Laserový impuls vyvolává silnou rázovou vlnu na povrchu materiálu, jenž se nadále šíří do hloubky a zachovává v materiálu RCS. Výsledná hloubka u metody LSP může být až desetkrát větší oproti běžnému kuličkování. Z hlediska aplikace má tato metoda uplatnění v námořní oblasti, letectví a zdravotnictví. Své využití našla při zpevňování slitin materiálů jako je titan, nikl, hliník či nerez. Ačkoliv LSP s sebou nese nespočet výhod, potýká se i s potenciálními problémy. Za kritický problém lze označit změnu rozměrů modifikované součásti vlivem laserového působení na materiál. Zpevňování tenkostěnných profilů přidává riziko v podobě neodstranění zbytkových tahových napětí v důsledku nerovnoměrného rozložení RCS skrze celkovou tloušťku materiálu. Řešením tohoto rizika bývá zavedení metody LSP z obou stran tenkostěnného materiálu. Je-li modifikace povrchu metodou LSP použita v nadměrné míře, existuje možnost, že dojde k výskytu vnitřních prasklin materiálu. Avšak tomu je možno předejít vhodnou kontrolou parametrů procesu modifikace. V poslední řadě stojí za zmínění i vyšší cena technologie ve srovnání s metodami SP a UIP.²⁸

Proces laserového zpevňování

Při procesu laserového zpevňování nedochází mezi laserovým svazkem a plochou zpevňování k přímému kontaktu. Na povrchu modifikovaného materiálu se vyskytují další dva činitelé, jenž při působení laseru vykonávají důležité funkce. Prvním z těchto činitelů je neprůsvitný povlak, jenž napomáhá zabránit tepelným účinkům. Za tepelné účinky považujeme laserovou ablaci (odpařování hmoty při laserovém záření), tavení materiálu a vznik tahového napětí. Další

²⁸ [12] John, M., Kalvala, P.R., Misra, M., Menezes, P.L. *Peening Techniques for Surface Modification: Processes, Properties, and Applications*. Materials 2021, s. 12 – 13, 21.

funkcí povlaku je zvýšení rozsahu rázové vlny při přímé interakci laseru. Mezi vhodné materiály povlaku řadíme hliník, měď, zinek a černé nátěry. Často bývají černé nátěry označovány za ideální povlak kvůli své 100% schopnosti absorbovat laserovou energii. Jakmile je povlak vystaven záření laserového svazku v ochranném prostředí, dochází k odpařování povlakového materiálu a následnému vzniku laserem indukovaného plazmatu na povrchu. Druhým činitelem je právě zmíněné ochranné prostředí. Úlohou ochranného prostředí je bránit volné expanzi plazmatu do okolního prostředí. Tím je způsobeno vzniku vysokotlakové rázové vlny, jenž nadále směřuje k materiálu. Důsledkem omezené expanze v uzavřeném prostředí je navýšení maximálního dosaženého tlaku a doby trvání impulzu rázové vlny. Vysokotlaká rázová vlna nakonec doputuje až na povrch zpevňovaného materiálu, kde se dále šíří a vyvolá SPD. V rámci výzkumu byly zavedeny různá vhodná média tvořící ochranné prostředí, především voda, křemíková pryž, nebo různé druhy skla. Pro účely modifikace povrchu je potřeba vyvolat plastickou deformaci materiálu. Proto je nutné splnit podmínku, při které tlak rázové vlny překročí dynamickou mez kluzu materiálu. Velikost zbytkového tlakového napětí na povrchu je do značné míry závislá na maximální hodnotě tlaku způsobené rázové vlny.²⁹ Na Obrázku 9 je k vidění schématické vyobrazení děje při použití LSP.



Obrázek 9: Proces vyvolání rázové vlny působením laserového svazku [17]

²⁹ [12] John, M., Kalvala, P.R., Misra, M., Menezes, P.L. *Peening Techniques for Surface Modification: Processes, Properties, and Applications*. Materials 2021, s. 12.

Pokročilé metody laserového kuličkování

Existuje více pokročilých metod laserového kuličkování. Výběr nejvýznamnějších z nich je uveden v Tabulce 3, spolu s jejich aplikačním využitím. Je nutné zmínit fakt, že laserové metody jsou stále moderním trendem ve výzkumné oblasti a jejich užití se stále rozvíjí.

Tabulka 3: Přehled pokročilých metod laserového kuličkování

Metoda	Aplikace
LPwC (laserové kuličkování bez povlakové vrstvy)	V případě, že má modifikovaný objekt složitou geometrii a je obtížné aplikovat povlakovou vrstvu. Dokáže vyvolat hluboké a stabilní RCS. Vhodné pro zpevňování svarů.
WLSP (laserové kuličkování za tepla)	Pro lepší obnovení únavové životnosti než u LSP. Vhodné pro zpevnění vysokoteplotně cyklicky zatěžované materiály. Používá se též pro precipitačně tvrditelné materiály.
CLSP (laserové kuličkování kryogením laserem)	Zlepšuje vysokocyklovou únavovou pevnost v ohybu. Navýšení hustoty dislokací, deformačních dvojčat a povrchového RCS. Vhodné pro kovy, které tvoří deformační dvojčata.
fs-LSP (laserové kuličkování femtosekundovým laserem)	Okolnosti, kdy je obtížné použít ochranné prostředí a povlak. Využití nižší energie pulzního laseru vyvolá zvýšení tvrdosti až o 45 %. Nevýhodou je zvýšení tvrdosti vlivem absence činitelů. Přijatelné pro mnoho aplikací (malá zasažená část).
LPF (tvarování laserem)	Významně uplatňovaná technologie v oblasti výroby automobilů, mikroelektroniky, stavby lodí a letectví. Pro tvarování a tváření součástí se složitými tvary, pomocí femtosekundového laseru.
EP-LSP (elektroimpulzní laserové kuličkování)	Vhodné pro materiály s nízkou plasticitou, jelikož LSP obtížně indukuje RCS u těchto materiálů. Vyvolávání plastické deformace u keramických materiálů.

Zdroj: [12] John, M., Kalvala, P.R., Misra, M., Menezes, P.L. *Peening Techniques for Surface Modification: Processes, Properties, and Applications*. Materials 2021. s. 21.

Tabulka 4: Souhrn účinků metody laserového kuličkování na běžné technické materiály

Modifikovaný materiál	Významné důsledky modifikace
ANSI 316L SS (nerezová ocel)	Zvýšení tvrdosti povrchu o 35 %. Zlepšení odolnosti proti korozi.
EN AW-7075 (hliníková slitina)	Zvýšení tvrdosti povrchu. Zlepšení odolnosti proti otěru.
Duplexní nerezová ocel	Snížení hodnoty opotřebení o 39 %. Snížení vlivu koroze o 74,2 %. Velikost korozních jamek se snížila o 50 %.
Ti-17	Zvýšení únavové životnosti. Zvýšení mikrotvrdosti a zjemnění zrn.
Slitina 718	Zaznamenána nanokrystalická struktura a zjemnění zrn na povrchu. Zvýšení tvrdosti povrchu a odolnosti proti opotřebení.
ANSI 304 SS (austenitická nerezová ocel)	Zlepšení nanotvrdosti. Zvýšení modulu pružnosti. Zaznamenání vysoké hodnoty zbytkových tlakových napětí a mechanického zdvojení.
Hořčíková slitina AZ31B	Tvrdost povrchu se zvýšila o 20 %. Pevnost v tahu se zvýšila o 18,75 %. Dochází k zušlechťení zrn a zvýšení odolnosti proti opotřebení.
Polykrystalická keramika α-Al₂O₃	Zvýšení odolnosti proti praskání při tvorbě vtisku. Vznik plastické deformace na hranici zrn a pružné deformace v zrnech α -Al ₂ O ₃ .
Slitina D9	Mikrotvrdost se zvýšila o 32 %. Pevnost v tahu se zvýšila o 63 %. Zlepšení tepelné stability slitiny.
Mosaz H62	Drsnost povrchu se zvýšila o 28,3 %. Úbytek opotřebení se snížil o 31,78 %.

Zdroj: [12] John, M., Kalvala, P.R., Misra, M., Menezes, P.L. *Peening Techniques for Surface Modification: Processes, Properties, and Applications*. Materials 2021. s. 13.

4 Kavitační zpevňování

Z předchozí kapitoly již víme, že modifikace povrchu kuličkováním může zaručit výrazné zlepšení mechanických vlastností a zavedení zbytkových tlakových napětí do materiálu. Podstatnou nevýhodou těchto metod je zvýšení drsnosti povrchu, jenž je vyvolána srážkou s pevnými tělesy (kuličky, kuličkové hroty). Pakliže je drsnost povrchu směrodatná, je záhodné zvolit alternativní metodu zpevňování materiálu. Řešením může být využití řízeného kavitačního jevu, který bývá označován jako kavitační zpevňování (v anglickém jazyce cavitation peening nebo též shotless peening). Na rozdíl od kuličkování zde nedochází ke srážce pevných těles. Proces zpevňování spočívá ve vyvolání plastické deformaci vlivem kolapsu kavitačních bublinek v blízkosti povrchu. V literatuře je tato metoda řazena do skupiny bez výstřelového zpevňování. Kavitační zpevňování rozlišujeme z hlediska způsobu vzniku kavitace na tři základní typy:

- Hydraulická kavitace s využitím vodního paprsku
- Laserová kavitace s využitím pulzního laseru
- Ultrazvuková kavitace s využitím ultrazvukového měniče

Využití vodního paprsku při hydraulické kavitaci často vede k záměně s metodou zpevňování vodním paprskem. Obě tyto metody využívají vysokorychlostního vodního paprsku ponořeného pod hladinou. Při kavitaci jsou vyvolány kavitační rázy, zatímco u vodního paprsku se využívá hybnosti kapaliny. Ačkoliv jsou si tyto metody podobné, jejich optimální parametry se zcela liší. Porovnáním obou zmíněných metod se zabýval i Kamisaka a Soyama. Výstupem jejich studií bylo prokázání vyšší účinnosti kavitačního zpevňování. Při laserové kavitaci rozlišujeme též dva zaměnitelné principy. První metoda využívá vysoce výkonného laseru v kombinaci s vodním filmem a ochrannou páskou (povlakem). Tento způsob byl popsán v předchozí kapitole jako metoda laserového kuličkování (LSP). Druhou metodou dochází ke zpevnění objektu laserem v kapalině. V obou případech je generována laserová ablace při působení pulzního laseru, což vede k vyvolání rázových vln a plastické deformace. Posledním způsobem zpevňování kavitačním jevem je ultrazvuková kavitace. Jak již bylo zmíněno v kapitole zabývající se kavitací, ultrazvukové vibrace jsou hojně využívány při generování kavitace. Často bývá označována i jako akustická kavitace. Při této metodě je nutné dbát na vzdálenost objektu od hrotu nástroje, jelikož má drastický dopad na intenzitu ultrazvukové kavitace.³⁰

Z fyzikálního hlediska rozlišujeme u kavitace dva základní druhy mechanismu nárazu. Prvním mechanismem je mikroproud (neboli jet efekt vyobrazený na Obrázku 2), který představuje implozi kavitační bublinky při jejím kolapsu v blízkosti povrchu pevného tělesa. Druhým je

³⁰ [18] Soyama, H., Korsunsky, A. M. *A critical comparative review of cavitation peening and other surface peening methods*. Journal of Materials Processing Technology 2022, s. 2.

silná tlaková vlna – rázová vlna způsobená kondenzací páry uvnitř bublinky. Rychlost deformace způsobené těmito mechanismy je mnohonásobně vyšší než u běžného zpevňování povrchu. To je zapříčiněno vysokou hodnotou rychlosti zvuku v kapalině (přibližně 1500 m/s). Důsledkem tohoto faktu je dosažení jedinečných vlastností modifikovaného povrchu ve srovnání s kuličkovacími metodami. Což bylo vědecky prokázáno Soyamou a Yamadou, kteří zkoumali zpevňování kalené nástrojové oceli. Závěrem bylo dosažení hlubšího zpevnění zmiňovaného materiálu oproti porovnávanému kuličkování.³¹

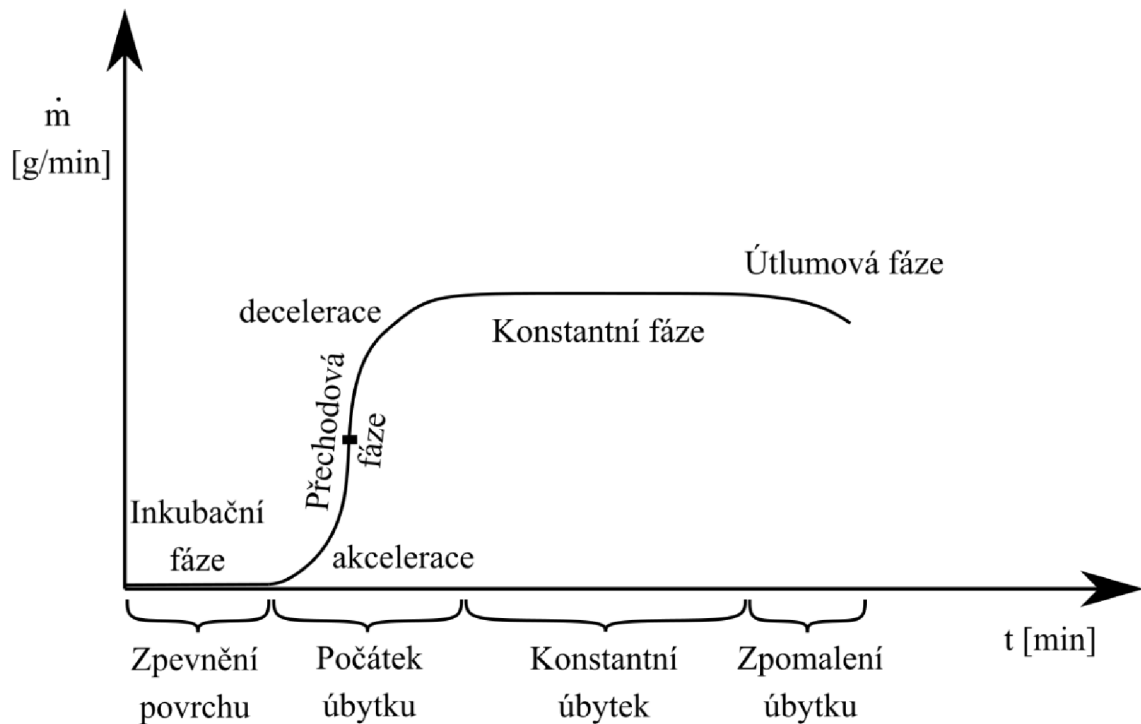
Časový průběh kavitační eroze

Výsledná míra zpevnění při kavitaci je podstatně závislá na době, při níž je povrch materiálu vystaven kavitační erozi. Na obrázku 10 je vyobrazena teoretická křivka eroze, jenž popisuje úbytek materiálu v čase. Časový průběh lze rozdělit na čtyři základní fáze:

1. *Inkubační fáze* – označuje časový interval, při němž dochází ke vzniku plastické deformace na povrchu materiálu, jenž má za následek viditelný nárůst tvrdosti povrchu. Během zpevňování vznikají na povrchové vrstvě důlky, jenž se nazývají pity, ale ani ty nemají za následek úbytek materiálu. Je zřejmé, že tato fáze je pro technologii kavitačního zpevňování klíčová. Časový úsek inkubační fáze se však často liší v závislosti na druhu materiálu, a tak je nutné jej získat experimentální metodou.
2. *Přechodová fáze* – tato fáze již ohraničuje proces úbytku materiálu. Lze ji rozdělit na dvě části. První je akcelerace, jenž nastává při dosažení maximálního zpevnění. Vlivem překročení kavitační odolnosti materiálu dochází k porušení materiálu na hranicích zm. Úbytek hmotnosti prudce narůstá v čase spolu se zvyšující drsností. Zhoršení drsnosti povrchu způsobí pokles intenzity tlakových účinků eroze. V určitém momentě (inflexní bod vyobrazený na obrázku níže) nárůst úbytku ustane a započne druhá část nazývaná decelerace. Tato část pokračuje až do ustálení účinků kavitační eroze na hodnotě maximálního úbytku materiálu.
3. *Konstantní fáze* – následuje ihned po deceleraci, jako důsledek ustálení intenzity kavitační eroze. Rychlost úbytku již neroste spíše má tendenci klesat.
4. *Útlumová fáze* – vyskytuje se až při delší době působení kavitační eroze. Při této fázi již rychlost úbytku materiálu klesá.³²

³¹ [18] Soyama, H., Korsunsky, A. M. *A critical comparative review of cavitation peening and other surface peening methods*. Journal of Materials Processing Technology 2022, s. 2 - 3.

³² [1] HUJER, Jan. *Studie kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2020. s. 17.



Obrázek 10: Erozní křivka – časový průběh kavitace

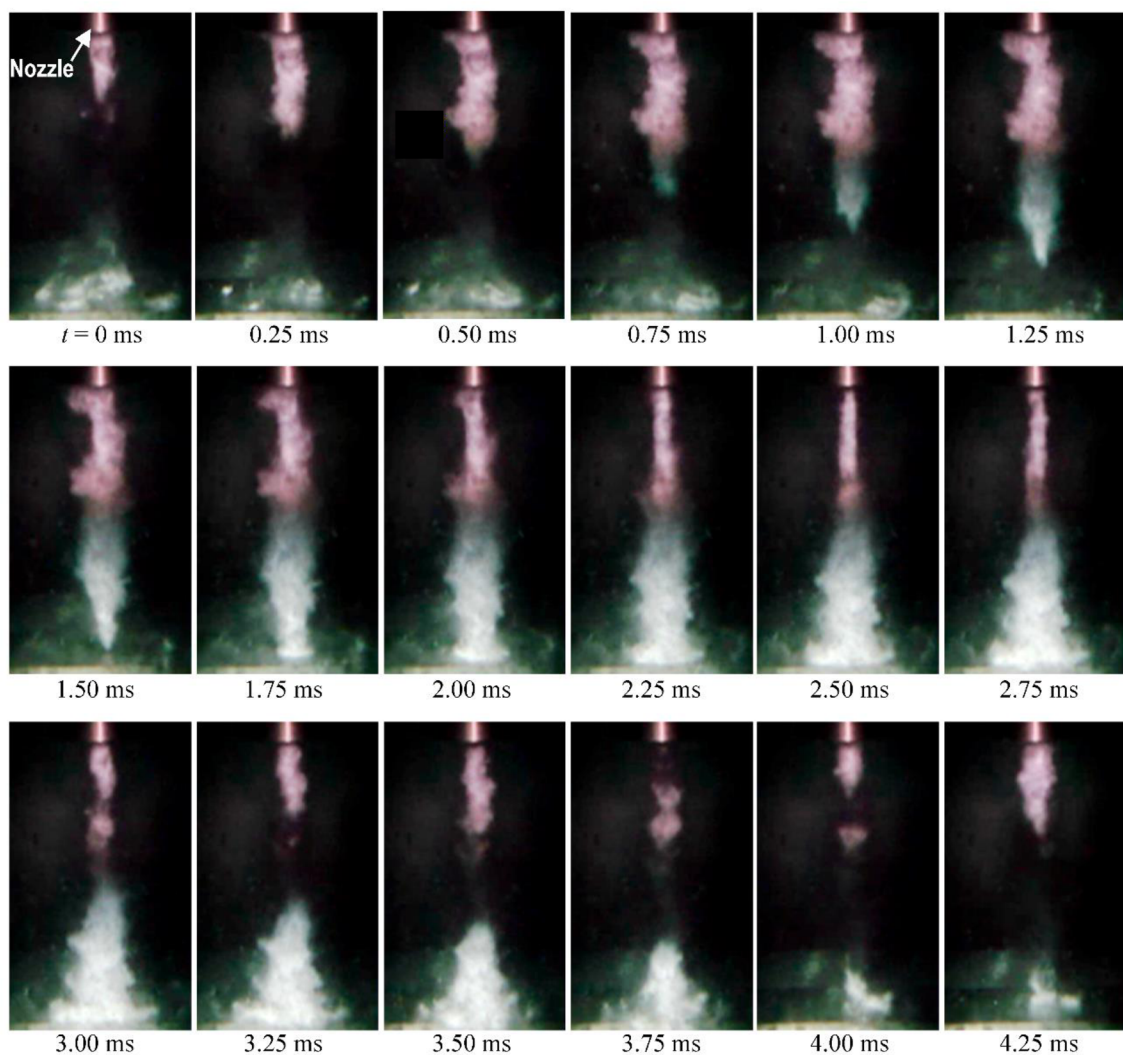
Trend zkoumání tohoto termodynamického fenoménu roste už od přelomu tisíciletí a na toto téma lze z aktuální doby nalézt mnoho vědeckých článků, zabývajících se posunem této metody zpevňování. Pro detailnější proniknutí do problematiky tohoto procesu je vhodné porozumět hydrodynamice a zároveň materiálovému inženýrství. Shrnutí dosavadně získaných kladných poznatků z oblasti kavitačního zpevňování materiálu sepsal ve svém článku Soyama a kolektiv:

- Nárůst drsnosti povrchu u měkkých kovů bývá nižší než při kuličkování
- Kavitační zpevňování probíhá pouze v inkubační době – nedochází k úbytku materiálu
- Doba kavitačního zpevňování je nejeftivnější v intervalu $\frac{1}{100}$ až $\frac{1}{5}$ inkubační doby
- Tepelný účinek kavitační eroze je při procesu zpevňování zanedbatelný
- Intenzita zpevňování může být řízena pomocí parametrů
(*laser – výkon laseru, ultrazvuk – amplituda vibrací*)
- Pracovní tlak kavitačního paprsku dosahuje vyšších hodnot než vysokorychlostní vodní paprsek
- Velikost zpevňované oblasti je mnohem větší než při užití vodního paprsku.³³

³³ [18] Soyama, H., Korsunsky, A. M. *A critical comparative review of cavitation peening and other surface peening methods*. Journal of Materials Processing Technology 2022, s. 3.

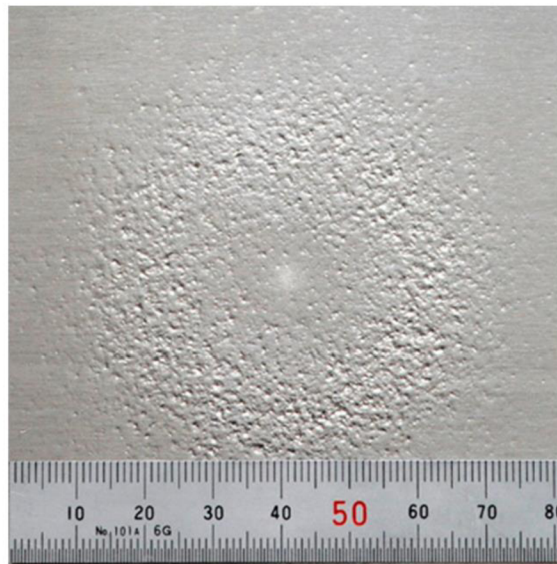
4.1 Hydraulická kavitace s využitím vodního paprsku

Princip metody je založen na vyvolání velmi silné a agresivní kavitační eroze. Při tomto procesu se za pomoci vysokorychlostní trysky vstříkuje kapalina pod vysokým tlakem směrem k blízkému povrchu zpevnovaného materiálu, jenž je ponořen v kapalném prostředí. Vzniká obrovské množství kavitačních bublinek, jenž se shlukují do takzvaného kavitačního mraku. Ten je nadále vystavován enormním parametrům tlaku a rychlosti (imploze dutin společně s neustávajícím přívodem natlakované kapaliny z trysky), což zapříčiní zformování kavitačního víru. Kavitační vír má podobu jakési struny a nejčastěji se formuje do prstencového nebo šroubovitého tvaru. Podrobněji se tomuto procesu věnuje Soyama ve svých studiích, kde například klade velký důraz na důsledky kolapsu prstenců vírové kavitace vzhledem k jejich aplikaci. Součástí jeho článku *Cavitation Jet: A review* [19] byl i experiment vstřikování vodního paprsku a vytváření kavitačního mraku. Průběh experimentu byl zaznamenán pomocí vysokorychlostní kamery. Přehled publikovaných snímků je vidět na obrázku 11.



Obrázek 11: Vývoj vstřikování kavitačního mraku [19]

Ze studie vyplívá, že v čase $t = 0$ ms započíná expanze kavitačního mraku z trysky, jenž v čase $t = 1,5$ ms dosáhne povrchu. Následně v čase $t = 1,75$ ms se část kavitačního mraku zformuje do prstencového víru, který se rozšiřuje a posléze hroubí směrem k povrchu, kde přibližně v $t = 3,25$ ms vytvoří zpevněnou oblast kruhového tvaru. V tento moment spěje ke konci první cyklus kavitace a nastává druhý cyklus v $t = 3,5$ ms, kdy se z trysky začíná vylévat další kavitační mrak. Z této skutečnosti lze usoudit, že se jedná o periodický děj.³⁴



Obrázek 12: Zpevněná oblast zasažená hydraulickou kavitací (*material: čistý hliník*) [19]

Během experimentů bylo zjištěno, že k iniciaci kavitační eroze může docházet již uvnitř trysky, popřípadě na jejím výstupu. Za zajímavost můžeme vzít fakt, že ačkoli je vodní paprsek vstříkovan kontinuálně, dochází k chaotickému slučování vznikajících kavitačních mraků, jenž do sebe narážejí při výstupu z trysky. Dále bylo zjištěno, že kavitační mrak vylučovaný z trysky lze popsat pomocí Strouhalovo podobnostního čísla. Zde je Strouhalovo číslo definováno šířkou kavitované oblasti, rychlostí proudu a frekvencí vylučování kavitačního mraku.³⁵

Podobnost s metodou zpevňování vodním paprskem

Jak již bylo v úvodu kapitoly nastíněno, hydraulické kavitační zpevňování bývá často spojováno se zpevňováním vodním paprskem. Pro separaci těchto metod je vhodné využít studii Momma a Lichtarowicz, jenž se věnuje erozi kolabující kavitační bubliny. Součástí práce je též kapitola pojednávající o úbytku hmotnosti hliníku v závislosti na vzdálenosti trysky od povrchu.

³⁴ [18] Soyama, H., Korsunsky, A. M. *A critical comparative review of cavitation peening and other surface peening methods*. Journal of Materials Processing Technology 2022, s. 3 - 5.

³⁵ Tamtéž, s. 4 - 5.

Pro klasifikaci výsledků vstupuje do experimentu parametr známý jako kavitační číslo σ . Čím nižší hodnoty toto číslo nabývá, tím je intenzita kavitační eroze vyšší. Kavitační číslo bylo definováno rozdílem tlaků při procesu vstřikování a lze jej vyjádřit vztahem níže:

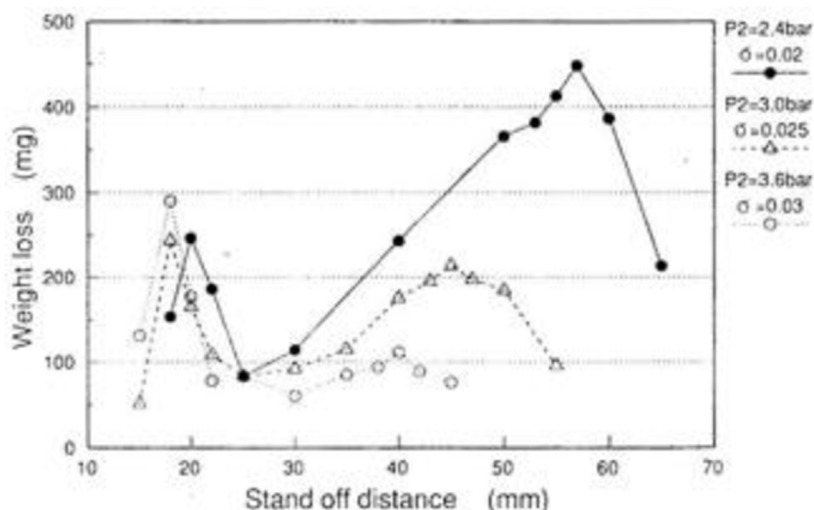
$$\sigma = \frac{p_2 - p_v}{p_1 - p_2} \quad (1)$$

kde: p_1 ... tlak na horním toku [MPa],
 p_2 ... tlak na spodním toku [MPa],
 p_v ... tlak páry [MPa],

vztah lze následně zjednodušit podmínkou (2) a upravit do podoby (3):

$$p_v \ll p_2 \ll p_1 \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{p_2}{p_1} \quad (3)$$



Obrázek 13: Úbytek hmotnosti hliníku v závislosti na vzdálenosti trysky od povrchu [20]

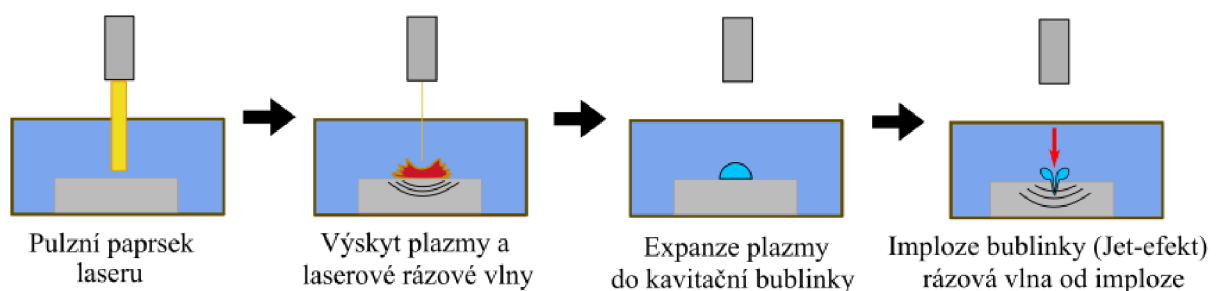
Shrnutí výsledků získaných při studii je k vidění na obrázku 13. Na první pohled je zřejmé, že průběh ztráty hmotnosti má nejdříve tendenci růst až do vzdálenosti přibližně 20 mm a poté prudce klesat a následně opět vzrůst a klesat. Dochází ke vzniku dvou vrcholů. Podíváme-li se na to z hlediska kavitačního čísla, zjistíme, že při vyšších hodnotách σ (nižší intenzita kavitace) dominuje spíše první vrchol a druhý vrchol je téměř nepatrný. Naopak při nižších hodnotách σ je znatelnější nárůst druhého vrcholu oproti prvnímu. Pokud by se nadále hodnota σ snižovala, první vrchol by byl též sotva patrný.³⁶

³⁶ [20] T. Momma, A. Lichtarowicz, *A study of pressures and erosion produced by collapsing cavitation*. Wear, Volumes 186–187 s. 427 - 428.

Následujícími studii bylo zjištěno, že první vrchol označuje vzdálenost vhodnou pro řezání vodním paprskem, a to především kvůli malé oblasti zasažení. Vznik vrcholu je zapříčiněn nárazem vodního sloupce v ose trysky. Při správně zvolených parametrech lze tohoto jevu využít jako zpevňování vodním paprskem. Oproti tomu druhý vrchol je vhodný pro kavitační zpevňování. Dochází při něm k zasažení povrchu kavitačními rázy v širší oblasti. Pro porovnání obou metod z hlediska účinnosti se však setkáváme komplikacemi. Ačkoli lze získat až několika násobně vyšší účinnost kavitačním zpevňováním ve srovnání s vodním paprskem, nelze vždy aplikovat obě metody. Určité studie dokazují fakt, že tyto metody zpevňování nemusí být pro určitý materiál vhodný a v některých případech jsou naopak destruktivní.³⁷

4.2 Laserová kavitace s využitím pulzního laseru

Za modernější metodu kavitačního zpevňování můžeme označit metodu laserové kavitace. Základní princip metody spočívá v kombinaci účinků laserového kuličkování (LSP) s kolapsem kavitační bublinky v kapalném prostředí (vodní koncentrát). Důsledkem toho vzniká složitější proces zpevňování povrchu, známý též jako LCP (laser cavitation peening). Proces LCP začíná při počátečním kontaktu pulzního laserového paprsku s vodou, kdy se část energie z paprsku spotřebuje v rámci přeměny vody na plazmu. Velké množství energie laseru působí přímo na cílený objekt a část zbývající energie se rozptýlí v kapalině. Důsledkem působení laseru dopadá na povrch rázová vlna. Zároveň plazma, jež nadále absorbuje energii z laseru, expanduje do kavitační bublinky. Dochází k cyklickému pulzování bublinky, kdy se bublinka opakovaně rozpíná a smršťuje, což vyvolává další rázové vlny v kombinaci s jet efektem, které dopadají k povrchu. Jelikož se však vlivem rozpadu laserového paprsku a prvního pulzu bublinky spotřebuje obrovské množství energie, tak jsou ostatní cykly zřetelně slabší a lze jejich účinky opomenout.³⁸

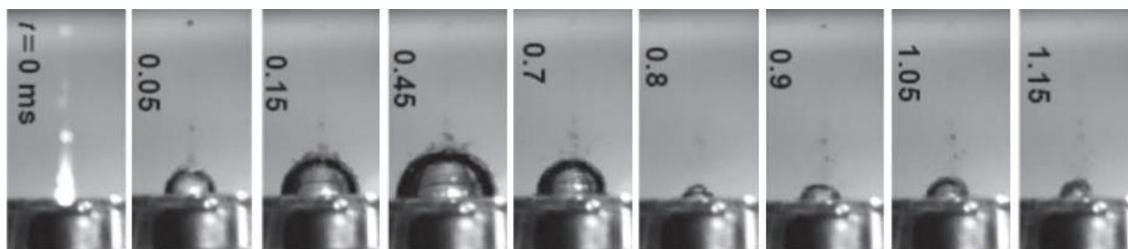


Obrázek 14: Schéma procesu laserového kavitačního zpevňování (LCP)

³⁷ [18] Soyama, H., Korsunsky, A. M. *A critical comparative review of cavitation peening and other surface peening methods*. Journal of Materials Processing Technology 2022, s. 5.

³⁸ [20] Jiayang Gu a kolektiv, *Bubble dynamic evolution, material strengthening and chemical effect induced by laser cavitation peening*, Ultrasonics Sonochemistry, Volume 72, 2021, s. 1 – 2.

Mezi hlavní řídicí parametry zpevňování metodou LCP řadíme intenzitu laserové rázové vlny, intenzitu rázové vlny způsobené implozí kavitační dutiny a vodní paprsek (Jet-efekt). Gu a Luo provedli rozsáhlý experiment metody LCP, při kterém pozorovali průběh nárazů rázových vln pomocí hydrofonu. Z jejich studie vyplývá, že hlavní vliv na účinnost metody má bezrozměrná vzdálenost γ . Ta je definována jako podíl vzdálenosti – mezi povrchem zpevňovaného objektu a ohniskem laseru, a maximálního poloměru kavitační bublinky. Čím je vzdálenost γ větší, tím se intenzita rázových vln a samotné kavitace výrazně snižuje. Tento dopad lze přisoudit vlastnosti laseru, kdy dosahujeme maximální získané energie z ohniska laseru, a při zvětšující se vzdálenosti se laser rozostřuje a rázová vlna slábne. Jako další faktory uvažujeme hloubku, viskozitu či teplotu kapaliny. Právě tyto parametry ovlivňují tlak laserové rázové vlny, jenž je v porovnání s rázovou vlnou od kavitační bublinky přibližně o třetinu větší. Gu a Luo rovněž tvrdí, že náraz laserové rázové vlny hraje hlavní roli v procesu zpevňování a následná kombinace kavitační rázové vlny s vodním paprskem dokáže pevnost materiálu zdvojnásobit.³⁹



Obrázek 15: Snímky z aplikace metody LCPwc na objekt ponořený v nádobě s kapalinou [18]

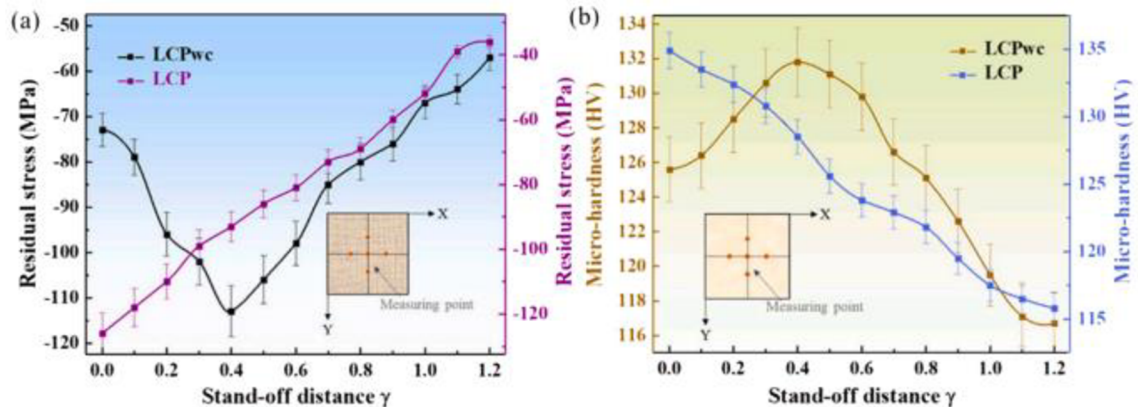
V současnosti jsou v oboru laserového kavitačního zpevňování rozvinuté především metody s krycí vrstvou (LCP) a bez krycí vrstvy (LCPwc). Obdobně jako u metody LSP (kuličkování) je v případě LCP povrch objektu polepen krycí vrstvou (např. hliníkovou fólií o tloušťce setin milimetru). Přítomnost pokrytí též prokazuje vliv na oslabení dopadu rázových vln a tak je vhodné s ním při návrhu vzdálenosti γ počítat.

Modifikace povrchu laserovou kavitací

Během procesu modifikace povrchu metodami LCP a LCPwc dochází k plastické deformaci. Přičemž jsou na povrchové vrstvě vyvolána zbytková tlaková napětí (RCS) a zlepšuje se mikrotvrdość i mez kluzu materiálu. Obdobně jako je tomu u intenzity rázových vln se i tyto parametry odvíjí od vzdálenosti γ . S narůstající vzdáleností ohniska laseru od povrchu dochází ke snížení plastické deformace. Obrázek 16 vyobrazuje dopad změny vzdálenosti γ na hodnotách

³⁹ [20] Jiayang Gu a kolektiv, *Bubble dynamic evolution, material strengthening and chemical effect induced by laser cavitation peening*, Ultrasonics Sonochemistry, Volume 72, 2021, s. 1 – 8.

RCS a mikrotvrdosti v povrchové vrstvě, jenž byl součástí studie Gu a Luo. Z jejich výsledků měření lze vyvodit, že účinnost modifikace s rostoucí vzdáleností opravdu klesá. Avšak je patrné, že v případě metody LCPwc se hodnota zbytkových tlakových napětí a mikrotvrdosti nejprve zvyšuje až do hodnoty $\gamma = 0,4$ a teprve poté začíná vliv plastické deformace slábnout. Jelikož však probíhá zpevňování povrchu bez krycí vrstvy, laserová ablace a kavitační eroze významně narušují objekt. Avšak při porovnání s metodou LCP dosahuje LCPwc lepších výsledků modifikace při vzdálenosti $\gamma > 0,3$ a vliv škodlivých faktorů je nižší.⁴⁰



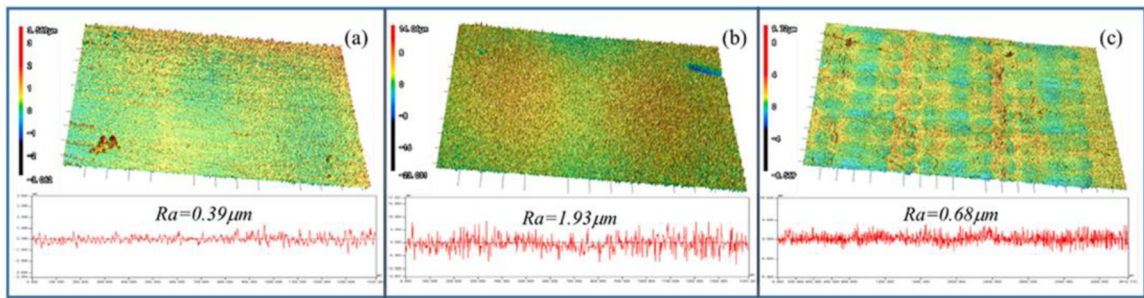
Obrázek 16: Závislost RCS a mikrotvrdosti oceli Q235 na změně vzdálenosti γ [21]

Drsnost povrchu po zpevňování laserovou kavitací

Z pohledu maximálního zachování drsnosti povrchu je vhodné použít metodu LCP. Ta díky krycí vrstvě zabraňuje přímému kontaktu laseru s povrchem a nedochází tak k ovlivnění povrchu ablací laseru a erozí kavitační bublinky. Tuto skutečnost demonstrovali i Gu a Luo [21], kdy porovnávali drsnost povrchu leštěných vzorků uhlíkové oceli Q235. Pro porovnání použili tři vzorky – jeden nemodifikovaný vzorek a jeden vzorek pro každou metodu (LCP a LCPwc). Výstupem bylo prokázání kladného efektu přítomnosti krycí vrstvy u metody LCP, kdy se drsnost povrchu zvýšila pouze nepatrně (setiny mikrometru). Naopak aplikací metody LCPwc byl zaznamenán několikanásobný nárůst drsnosti.⁴¹

⁴⁰ [20] Jiayang Gu a kolektiv, *Bubble dynamic evolution, material strengthening and chemical effect induced by laser cavitation peening*, Ultrasonics Sonochemistry, Volume 72, 2021, s. 7 – 8.

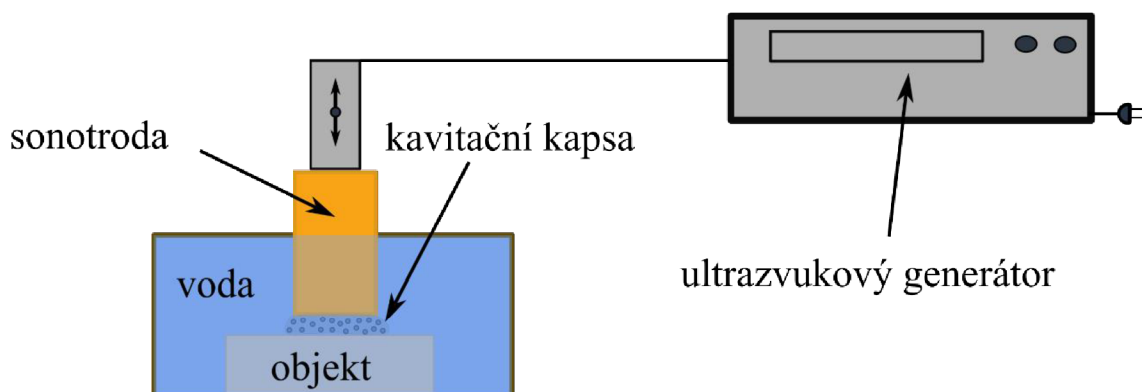
⁴¹ Tamtéž, s. 7 – 8.



Obrázek 17: Drsnost povrchu uhlíkové oceli Q235, (a) nemodifikovaný, (b) modifikace LCPwc, (c) modifikace LCP [21]

4.3 Ultrazvuková kavitace s využitím ultrazvukového měniče

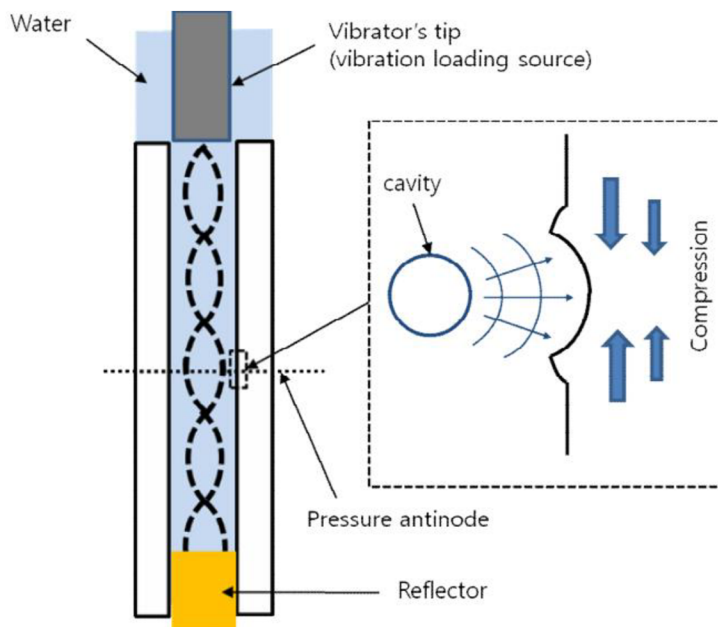
Posledním zástupcem ze dříve zmíněných základních druhů kavitačního zpevňování je ultrazvuková (akustická) kavitace. Princip metody je založen na vyvolání silného rázového zatížení, způsobeného erozí akustických kavitačních bublin v kapalném prostředí. Akčním členem je zde vibrační sonotroda (v literatuře též označována jako sonda, trn či hrot), jež obvykle kmitá frekvencí 20 kHz. Vyšší vibrace sonotrody způsobují změnu rychlosti molekul kapaliny a výskyt kavitačních bublinek. Jelikož mezera mezi povrchem zpevňovaného objektu a sonotrodou bývá běžně nastavena na délku 1 mm, dochází ke zformování kavitačních bublin do jakési kavitační kapsy. Uvnitř kapsy je významně ovlivněno šíření zvukových vln vlivem vzájemné interakce bublinek. Následná imploze kavitačních bublinek vystavuje povrch materiálu silné plastické deformaci. Šíření zvukových vln a interakce bublinek mají podstatný dopad na celkovou intenzitu a účinnost procesu.⁴²



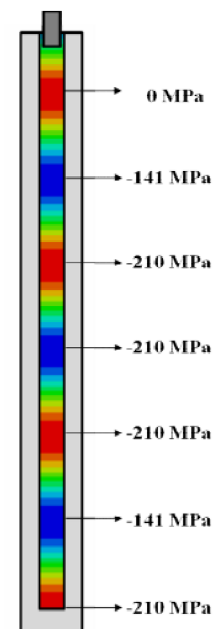
Obrázek 18: Schéma ultrazvukového kavitačního zpevňování

⁴² [22] F. Bai a kolektiv. *Theoretical and experimental investigations of ultrasonic sound fields in thin bubbly liquid layers for ultrasonic cavitation peening*, Ultrasonics, Volume 93, 2019, s. 130.

Obdobně jako při procesu ultrazvukového kuličkování (UIP) se i zde využívá funkce magnetostrikčních či piezoelektrických měničů. Avšak v mnoha případech se dnes setkáváme pouze s užitím piezoelektrických měničů z důvodu jejich snadného ovládání (další důvody již byly zmíněny v kapitole 3.1.2). Za nespornou výhodu ultrazvukové kavitace považujeme schopnost modifikace složitých tvarových ploch. Jung a kolektiv se zaměřili na výzkum účinnosti ultrazvukové kavitace při zpevňování plochy vnitřního průměru trysky tlakové nádoby reaktoru. V rámci studie byla sepsána teorie procesu zpevňování trysky, kdy se předpokládá iniciace 1D stojaté vlny (vyobrazena čárkovaně na obrázku 19). Na základě teorie byl následně navržen model numerického výpočtu (FEA). Pro ověření studie provedli rovněž experiment na trysce stejných rozměrů, jaké byly použity ve výpočtovém modelu. Při ultrazvukové frekvenci 20 kHz bylo dosaženo nárůstu zbytkových tlakových napětí na povrchu vnitřního průměru trysky.⁴³



Obrázek 19: Teorie procesu zpevňování ultrazvukem [23]



Obrázek 20: Naměřené hodnoty RCS [23]

Vzdálenost mezi sonotrodou a modifikovaným povrchem

Hlavním řídicím parametrem při aplikaci této metody je dozajista frekvence. Avšak pro dosažení vhodné modifikace povrchu je nutné vzít v úvahu velikost mezery mezi sonotrodou a zpevňovaným povrchem. Jak již bylo uvedeno, tento délkový parametr má významný vliv na dynamiku rázového zatížení. Bai a kolektiv ve své studii ultrazvukové kavitace zmiňují některé

⁴³ [23] Jung, S., Prabhu, M. & Lee, H. *Peening narrow nozzles of reactor pressure vessels using ultrasonic cavitation*. Journal of Mechanical Science and Technology 31, 2017, s 5279–5283.

již provedené experimenty s různou odstupovou vzdáleností. Uvádí, že vhodná odstupová vzdálenost sonotrody je menší než 1 mm. Kromě nežádoucího dopadu na výslednou modifikaci povrchu se při velké vzdálenosti setkáváme i se zbytečnou ztrátou energie, která se negativně projevuje na ekonomice provozu této technologie.⁴⁴

4.4 Účinnost metod kavitačního zpevnování

Tato podkapitola se věnuje představení některých dosavadně získaných výsledků z oblasti kavitačního zpevnování. Hlavním zdrojem zde uvedených informací je již zmíněný článek *A critical comparative review of cavitation peening and other surface peening methods*. Tento článek obsahuje poznatky od mnoha autorů, kteří se problematice kavitačního zpevnování věnují. Z jejich studií se modifikace povrchu posuzuje z hlediska zvýšení meze únavy, zanesení zbytkových tlakových napětí a zlepšení tvrdosti. V tabulce 5 můžeme pozorovat zlepšení meze únavy materiálů po kavitačním zpevnování v porovnání s metodou kuličkování.

Tabulka 5: Zlepšení únavové meze modifikovaných materiálů

	Materiál (norma EU)	Mez únavy před modifikací [MPa]	Kavitační zpevnování (pouze vodním paprskem) [MPa]	Kuličkování (Shot peening) [MPa]
Hliníkové materiály	EN AW - 2017	120	185	>80
	EN AW - 7075	260	320	320
	AlSi7Mg0.3	97	156	120
	AC8AH (JIS)	106	124 / 140	-
	EN AW - 5754	121	156	-
Ostatní	25CrMo4 (DIN)	777	931	915
	15CrMo5 (DIN)	733	832	785
	nerez. ocel 1.4404	279	348	305

Zdroj: [18] Soyama, H., Korsunsky, A. M. A critical comparative review of cavitation peening and other surface peening methods. Journal of Materials Processing Technology, Volume 305, 2022, s. 11.

Z tabulky je rovněž patrná zvýšená pozornost skupině hliníkových materiálů (tučně zvýrazněné hodnoty). Právě tyto hliníkové materiály jsou nejlépe srovnatelné s materiály, jež jsou

⁴⁴ [22] F. Bai a kolektiv. *Theoretical and experimental investigations of ultrasonic sound fields in thin bubbly liquid layers for ultrasonic cavitation peening*, Ultrasonics, Volume 93, 2019, s. 130.

součástí následující experimentální části. Ostatní materiály jsou v této práci uvedeny pouze pro zběžnou představu čtenáře. Tabulka 6 prezentuje výsledné hodnoty tvrdosti dle Vickerse po zpevnění kavitací vodním paprskem či ultrazvukem.

Tabulka 6: Zvýšení hodnoty tvrdosti dle Vickerse u modifikovaných materiálů

Materiál (norma EU)		Tvrdost dle Vickerse [HV]		
		Před modifikací	Kavitační zpevnění vodním paprskem	Kavitační zpevnění ultrazvukem
Hliníkové materiály	EN AW - 2017	130	160	-
	EN AW - 2030	160	-	184
	EN AW - 5005	55	-	75
	EN AW - 5050	57	-	87
	EN AW - 5754	75	77	-
	EN AW – 6063	83	101	-
	EN AW - 7075	210	230	-
Ostatní	Ti-6Al-4 V	330	416	-
	nerez. ocel 1.4301	230/227	362	269
	nerez. ocel 1.4404	160	240	-

Zdroj: [18] Soyama, H., Korsunsky, A. M. A critical comparative review of cavitation peening and other surface peening methods. Journal of Materials Processing Technology, Volume 305, 2022, s. 14 - 16.

Pozastavíme-li se v tabulce u hodnot tvrdosti nerezové oceli 1.4301, lze zpozorovat značný rozdíl mezi výslednou tvrdostí dosaženou vodním paprskem (362 HV) v porovnání s ultrazvukem (269 HV). Tato skutečnost naznačuje fakt, že volba vhodné metody zpevnění může mít velký dopad na finální podobu modifikace povrchu. Z tohoto důvodu je záhodno provést další studie aplikace metod kavitačního zpevnění v závislosti na druhu materiálu. Mimo tuto problematiku se při volbě metody setkáváme též s klady a zápory samotné technologie. Jako hlavní zápory se jeví vysoká pořizovací cena technologie a spotřeba energie při zohlednění velikosti zpevňované plochy.

5 Experimentální část

Jedním z hlavních cílů této práce byla realizace experimentu, při kterém byl vzorek vystaven ultrazvukovému kavitačnímu zpevňování. Tato kapitola se věnuje zdokumentování praktické části diplomové práce. V rámci experimentu byly provedeny následující kroky:

1. Vytipování dvou materiálů pro experiment kavitačního zpevňování
2. Zakoupení polotovarů, ze kterých se následně vyhotovily zkušební vzorky
3. Dokončovací operace obrábění funkční plochy vzorků (broušení a leštění)
4. Provedení erozního testu pro oba vybrané materiály
5. Aplikace metody kavitačního zpevňování na zkušební vzorky
6. Analýza změn drsnosti a mikrotvrdosti povrchu

5.1 Experimentální materiály

Na základě konzultací s vedoucím práce bylo rozhodnuto, že vhodnou oblastí materiálů pro experiment jsou již zmiňované hliníkové materiály. A to především kvůli srovnatelnosti s předšlými studii na Katedře energetických zařízení v Liberci. Kupříkladu může být práce mé předchůdkyně Ing. Janky Stykové, která se věnovala kavitačnímu zpevňování nerezové oceli 1.4301 a hliníkové slitiny EN AW-2030.⁴⁵ V případě této diplomové práce byly vybrány níže vypsane materiály:

EN AW-2007

Důvodem výběru této slitiny byla nejbližší shoda při porovnávání vlastností materiálu se slitinou EN AW-2030, která se již nevyskytuje v nabídce lokálních dodavatelů.

EN AW-6082

Tato slitina byla zvolena jako druhý zástupce z oblasti hliníkových slitin, a to hlavně z důvodu rozdílné odolnosti vůči korozi a vhodnějšímu předpokladu ke svařování v porovnání se slitinou EN AW-2007.

⁴⁵ [24] STYKOVÁ, J. *Využití ultrazvukové kavitace při zpevňování materiálů kovových povrchů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. Diplomové práce. Vedoucí práce: Miloš Müller.

5.1.1 Hliníková slitina EN AW-2007

V průmyslu se jedná o běžně vyskytující se slitinu hliníku s mědí, která je více známa pod názvem dural. Tato slitina vyniká především svými tvářecími vlastnostmi, nízkou hmotností a vysokou pevností. Z hlediska aplikace se s ní setkáváme zejména v oblasti obrábění, kde lze vyzdvihnout její schopnost tvorby krátké třísky při vysokých řezných rychlostech. Pro využití veškerého potenciálu materiálu je též záhodno jej v první řadě vystavit tepelnému zpracování jako je kalení, žíhání či vytvrzování. Na základě těchto faktů se slitina EN AW-2007 hojně využívá v leteckém či automobilovém průmyslu, kde se z ní vyrábí strojní díly, šrouby nebo podložky.⁴⁶

Tabulka 7: Mechanické parametry materiálu EN AW-2007

Stav	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A [%]
O	81	184	21
T4	220	340	8
T4510	220	340	8

Zdroj: [25] *Alloy EN AW-2007*. Leichtmetall.eu [online]. Hannover: LEICHTMETALL, 2024.

Tabulka 8: Chemické složení prvků materiálu EN AW-2007

Prvek [%]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni	Pb	Bi	Sn
Min.	-	-	3,3	0,5	0,4	-	-	-	-	0,8	-	-
Max.	0,8	0,8	4,6	1,0	1,8	0,1	0,8	0,2	0,2	1,5	0,2	0,2

Zdroj: [25] *Alloy EN AW-2007*. Leichtmetall.eu [online]. Hannover: LEICHTMETALL, 2024.

Ačkoli se jedná o hliníkovou slitinu, lze mezi slabší stránky tohoto materiálu zařadit jeho odolnost vůči korozi. Taktéž přítomnost mědi v chemickém složení nám naznačuje, že materiál není vhodný ke svařování.

⁴⁶ [25] *Alloy EN AW-2007*. Leichtmetall.eu [online]. Hannover: LEICHTMETALL, 2024.

5.1.2 Hliníková slitina EN AW-6082

V případě hliníkové slitiny EN AW-6082 se setkáváme s materiálem, jenž se vyznačuje svými všestrannými vlastnostmi, kterých dosahuje po tepelném zpracování (žihání a stárnutí). Obdobně jako v případě slitiny EN AW-2007 se jedná o dobře tvářitelný materiál, avšak zde již pozorujeme mnohem lepší odolnost vůči korozi. Kromě toho je tato slitina také vhodná ke svařování.⁴⁷ Z tabulky 10 vyplývá, že nejvyšší procentuální zastoupení chemických prvků ve slitině je tvořeno křemíkem, hořčíkem a manganem. Právě kombinace křemíku a hořčíku ovlivňuje míru pevnosti slitiny a přítomnost manganu má zase vliv na strukturu zrna. Jako přední oblast aplikace označujeme dopravu, kde se ze slitiny EN AW-6082 vyrábí například rámy jízdních kol či kamionů. Další uplatnění nacházíme ve stavebnictví při výrobě mostních segmentů.⁴⁸

Tabulka 9: Mechanické parametry materiálu EN AW-6082

Stav	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A [%]
O	110	160	14
T4	110	205	14
T6	240	280	6

Zdroj: [26] *Alloy EN AW-6082*. Leichtmetall.eu [online]. Hannover: LEICHTMETALL, 2024.

Tabulka 10: Chemické složení prvků materiálu EN AW-6082

Prvek [%]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Min.	0,7	-	-	0,4	0,6	-	-	-
Max.	1,3	0,5	0,1	1,0	1,2	0,25	0,2	0,1

Zdroj: [26] *Alloy EN AW-6082*. Leichtmetall.eu [online]. Hannover: LEICHTMETALL, 2024.

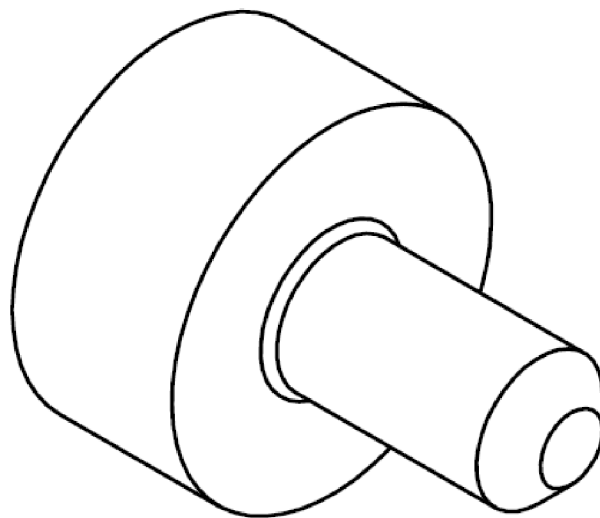
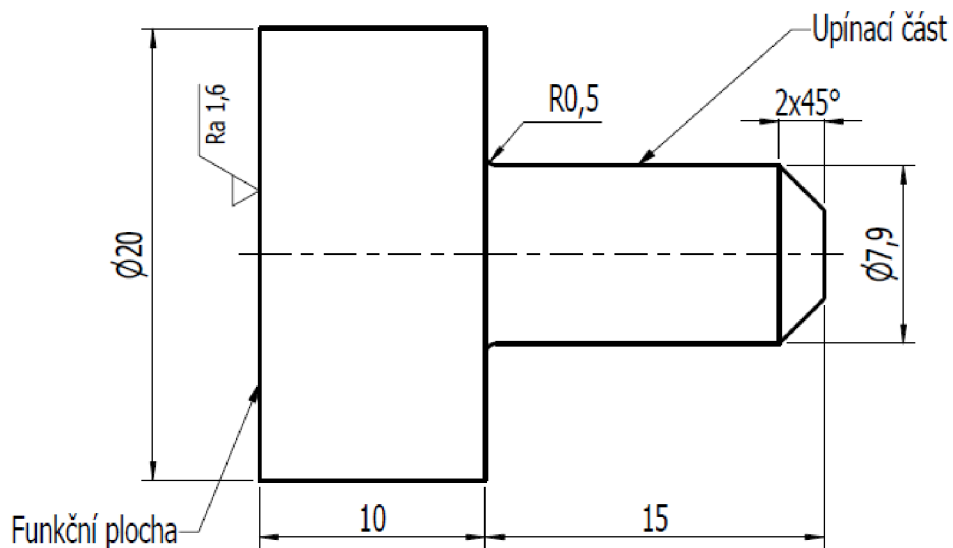
Z hlediska nevýhod tohoto materiálu je záhodno zmínit jeho nevhodnost pro výrobu složitých profilů.

⁴⁷ [26] *Alloy EN AW-6082*. Leichtmetall.eu [online]. Hannover: LEICHTMETALL, 2024.

⁴⁸ [27] *EN AW-6082*. Proal.cz [online]. Ostrava: NPS Proal, 2024.

5.2 Geometrie experimentálních vzorků

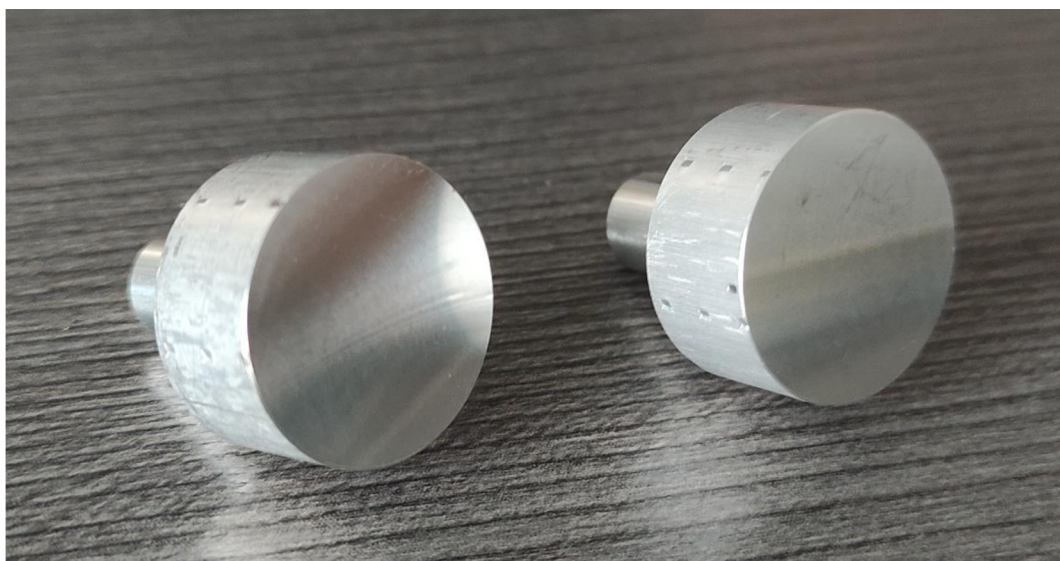
Pro účely experimentu byly zakoupeny polotovary v podobě hliníkových tyčí kruhového průřezu od firmy PRONTON s. r. o. V následující fázi se z polotovarů vyhotovily zkušební vzorky ve spolupráci s Katedrou obrábění a montáže TUL, kde byly vzorky frézovány dle zadaného výkresu na obrázku 21. Funkční plocha na výkresu označuje oblast, jenž je určena pro budoucí modifikaci povrchu kavitačním zpevňováním. Upínací část zkušební vzorku měla v první řadě funkci upínací při obrábění a přípravě vzorku a v druhé řadě plnila též funkci upínací při samotném procesu modifikace povrchu. Z této fáze vzniklo osm kusů vzorků pro oba experimentální materiály.



Obrázek 21: Výkres experimentálního (zkušební) vzorku

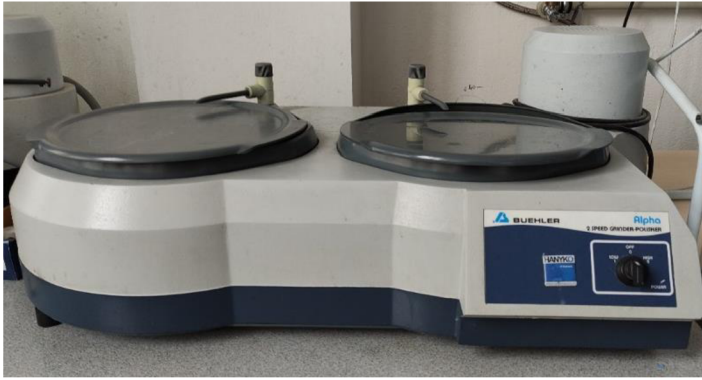
5.3 Dokončovací operace funkčních ploch

Jako finální krok přípravy vzorků následovala po obrábění nezbytná fáze dokončovacích operací. V této fázi praktické části bylo cílem dosáhnout adekvátního povrchu za účelem splnění požadavků normy. Norma ASTM G32-10 definuje postupy při zpevňování povrchu ultrazvukovou kavitací a stanovuje maximální drsnost povrchu funkční plochy na $0,8 \mu\text{m}$. Jelikož je při frézování obtížné dosáhnout požadované drsnosti povrchu, je záhodno aplikovat dokončovací operace broušením a leštěním.

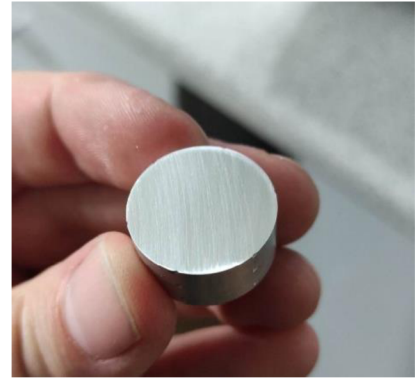


Obrázek 22: Zkušební vzorky před broušením, vlevo EN AW-2007, vpravo EN AW-6082

Dokončovací operace byly realizovány v Laboratoři metalografie Katedry materiálů TUL. Funkční plocha zkušebního vzorku byla nejdříve broušena na dvourychlostní dvoukotoučové brusce Alpha od firmy BUEHLER. Broušení lze rozdělit do tří etap, kdy se na kotouč brusky lepily brusné papíry o různé zrnitosti. V tomto případě se jednalo o brusné papíry o zrnitosti 600, 1200 a 2000, jenž se použily přesně dle tohoto pořadí. Čím je vyšší zrnitost papíru, tím je dosaženo menší drsnosti povrchu. Při každé etapě broušení byl zkušební vzorek broušen ručně, přičemž zápěstí vykonávalo krouživý pohyb po papíře, a to hlavně z důvodu vytvoření rovnoměrně zbroušené plochy. Během procesu se oblast, kde docházelo ke kontaktu vzorku s papírem, chladila kontinuálně přiváděnou vodou, jelikož vliv tření způsobil nárůst teploty vzorku. Rychlost otáčení kotouče s brusným papírem se odvíjela od fáze etapy broušení. Pokaždé, kdy byl použit nový brusný papír, byla rychlost nastavena na nejnižší možnou, protože prvotní kontakt vzorku s papírem vyvolával značný silový odpor. Jakmile se odpor snížil, došlo k navýšení rychlosti. Mezi jednotlivými etapami se vzorek omýval pod čistou vodou a následně sušil pro hodnocení drsnosti povrchu. Nakonec se vzorky po poslední etapě očistily lihem a vysušily fénem.



Obrázek 23: Dvourychlostní dvoukotoučová bruska a leštička Alpha od firmy BUEHLER



Obrázek 24: Broušený vzorek

Druhou částí dokončovacích operací bylo leštění. To se již realizovalo na jednokotoučové brusce a leštičce s automatickou přítlačnou hlavou SAPHIR 550 od firmy ATM. Samotný proces leštění je do jisté míry obdobný jako u broušení. V tomto případě jsou brusné papíry nahrazeny lešticími kotouči s tkaninou, které jsou připevněny k magnetické rotační desce. Na místo vody je na kotouč nanášena diamantová suspenze a smáčedlo pomocí rozprašovačů. Lešticí kotouč se pohyboval rychlostí 150 otáček/min. Celý cyklus leštění byl opět rozdělen do tří etap, kdy se vzorek leštil postupně na kotouči s přidavkem monokrystalické diamantové suspenze o zrnitosti 9 μm , 3 μm a 1 μm .



Obrázek 25: Jednokotoučová bruska a leštička SAPHIR 550 od firmy ATM s příslušenstvím

Každá suspenze měla zvlášť přiřazený leštící kotouč, aby nedocházelo k zanesení tkaniny zrn o větší velikosti, než pro kterou je kotouč určen. To by mohlo mít za následek poškrábání leštěného povrchu a znehodnocení samotného leštícího kotouče. Pro vyhodnocení kvality povrchu funkční plochy bylo stejně jako při broušení vždy zapotřebí vzorek očistit lihem a poté vysušit fénem. Výsledná drsnost povrchu byla pro všechny zkušební vzorky dosažena v momentě, kdy nebyl na funkční ploše zpozorován viditelný škrábanec a plocha tak tvořila funkci zrcadla. Nakonec se všechny vyleštěné vzorky zastrčily do polystyrenového nástavce a uložily do kufru, kde byly bezpečně uchovávány pro experimentální část.



Obrázek 26: Zkušební vzorky EN AW-2007 a EN AW-6082 po fázi finálního leštění

5.4 Volba experimentální metody

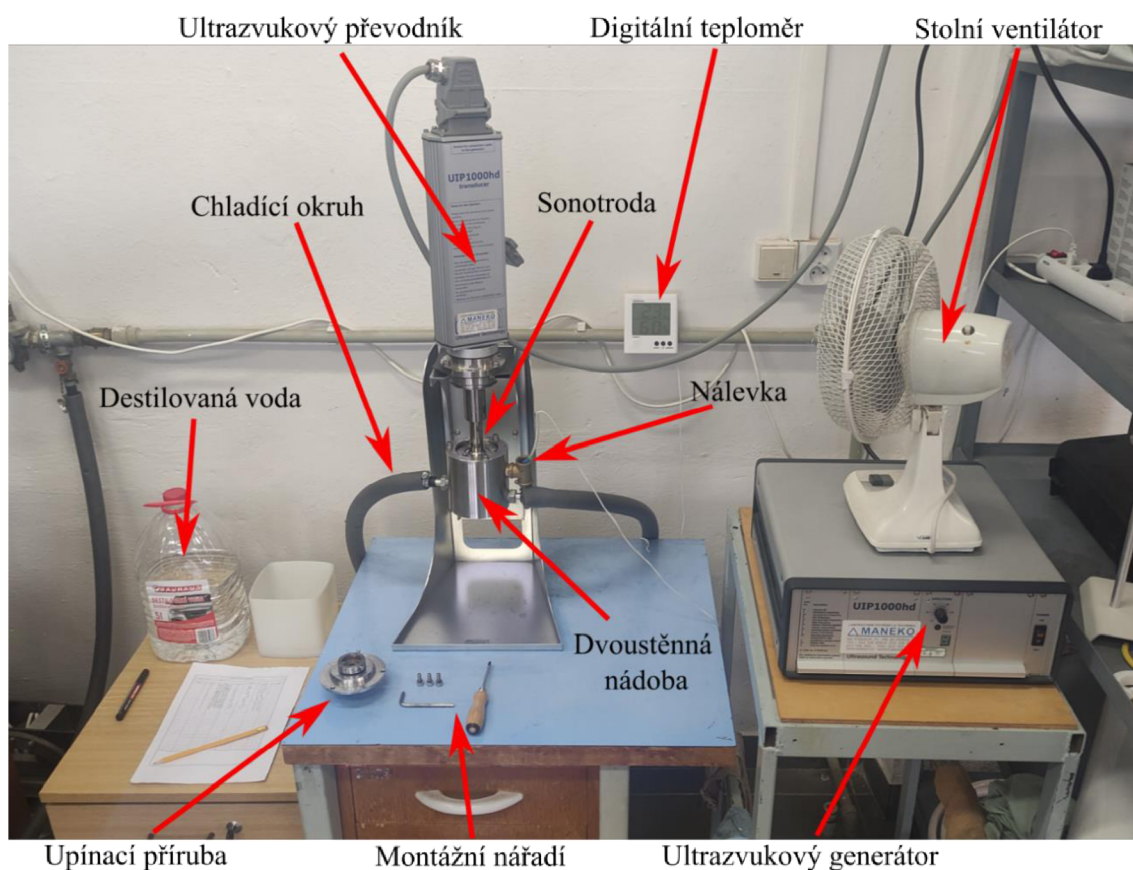
Při výběru vhodné metody kavitáčního zpevňování pro experiment diplomové práce bylo rozhodnuto ve prospěch ultrazvukové kavitace. Hlavním důvodem je skutečnost, že se tento způsob generování kavitace v minulosti již aplikoval při studiích na Katedře energetických zařízení TUL. V laboratoři vícefázového proudění a kavitace se nachází pracoviště, jenž se specializuje přímo na generování ultrazvukového pole.

Porovnáme-li ultrazvukové kavitáční zpevňování s ostatními metodami kavitáčního zpevňování (vodním paprskem či laserem), setkáváme se zpravidla s nižší četností aplikace pro modifikaci povrchu. Hojně používána je v tomto ohledu metoda zpevňování vodním paprskem. Mezi benefity užití ultrazvukové metody lze s určitostí zařadit:

- Nenáročnost – snadná obsluha
- Šetrnost – žádné znečišťující odpadní látky, ochrana životního prostředí
- Hospodárnost – nízká spotřeba vody oproti vodnímu paprsku, nižší cena
- Efektivita – vhodná pro složité tvary a tenkostěnné průřezy.

5.5 Experimentální sestava

V rámci příprav experimentu byla sestavena experimentální sestava pro realizaci modifikace povrchu ultrazvukovou kavitací. Na obrázku 27 je vyobrazena hlavní část této sestavy spolu s příslušenstvím, jenž bylo během experimentu zapotřebí. Další částí experimentální sestavy se myslí digitální váha s fénem pro účely vyhodnocování erozního testu. Za hlavní komponentu sestavy lze považovat ultrazvukový procesor UIP1000hd skládajícího se z převodníku a generátoru.



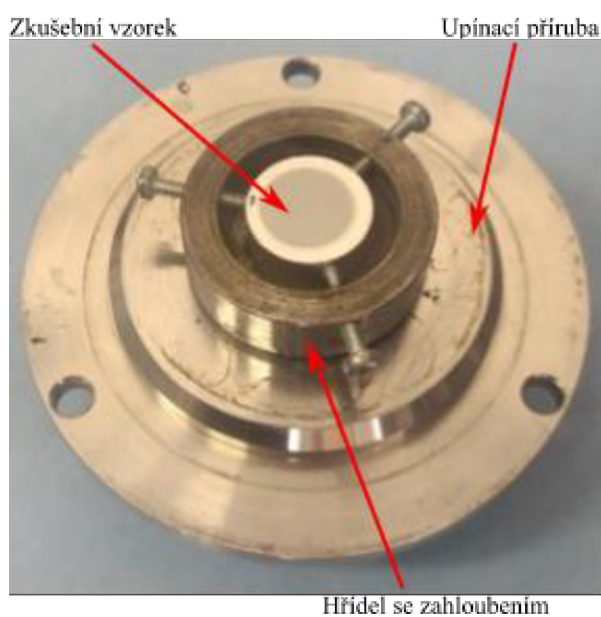
Obrázek 27: Experimentální sestava ultrazvukového kavitáčního zpevnování

Příprava experimentální sestavy

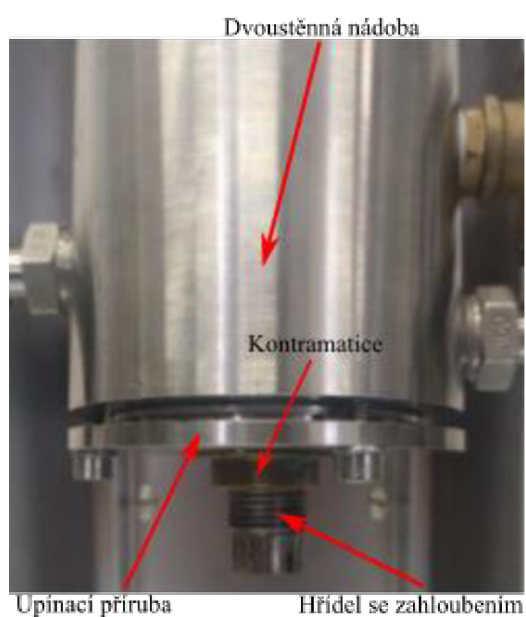
Ze všeho nejdříve byl ultrazvukový generátor propojen s ultrazvukovým převodníkem za pomoci kabelu. Následně se dvoustěnná nádoba nasunula na sonotrodu a pevně se k ní sešroubovala skrze víko. Na nádobu se poté připojila přívodní a odpadní hadice pro vytvoření chladičského okruhu ultrazvukového procesu. Přívodní hadice byla spojena s vodovodním potrubím a odpadní hadice vedla přímo do odtokového kanálu laboratoře. Do sestavy dále přibyl stolní ventilátor pro chlazení ultrazvukového převodníku a teploměr, jehož čidlo se během experimentu zasunulo do nátrubku na nádobě – otvor nálevky. Nakonec se ventilátor spolu s generátorem zapojily do elektrické sítě, jež se nacházela v bezpečném odstupu od kontaktu s kapalinou. V této fázi byla sestava připravena na experiment.

5.6 Erozní test

Erozní test je formou experimentu, při kterém se snažíme dosáhnout stavu maximální účinnosti technologie kavitačního zpevňování. Cílem testu je zmapovat inkubační oblast erozní křivky pro modifikovaný materiál. Inkubační oblast definuje časové rozmezí, kdy nedochází k úbytku hmotnosti a povrch materiálu je zpevňován. Abychom docílili maximálního zpevnění povrchu je nutné nalézt časový údaj, jenž ohraničuje konec inkubační oblasti bez úbytku hmotnosti. Teorii erozní křivky je podrobněji věnována část úvodu v kapitole Kavitace. Jelikož se parametry erozní křivky pro každý materiál liší, je třeba v tomto případě provést test pro oba materiály.



Obrázek 28: Upevnění zkušební vzorku do upínací příruby



Obrázek 29: Upevnění upínací příruby do dvoustěnné nádoby

Nastavení odstupové vzdálenosti

Před zahájením erozního testu bylo nutné nejdříve nastavit odstupovou vzdálenost mezi povrchem zkušební vzorku a sonotrodou. K tomuto kroku byl vyroben hřídel s válcovým zahloubením pro upevnění vzorku. Na hřídeli se nacházela závitová část, jenž sloužila ke změně polohy vzorku vůči přírubě. Pro nastavení odstupové vzdálenosti se vzorek nejprve upevnil do zahloubené části pomocí tří šroubků (viz. Obrázek 28). Poté se příruba uchytila třemi šrouby zespoda do dvoustěnné nádoby. Následně byl hřídel vysunut po šroubovici směrem k sonotrodě, dokud nedošlo k dotyku s povrchem vzorku. Utažením kontramatice na hřídeli došlo k aretaci polohy a upínací příruba se odšroubovala od nádoby. Těmito kroky byla získána nulová počáteční vzdálenost, která se v dalším kroku nastavila na odstupovou vzdálenost 0,5 mm. Abychom mohli posunout hřídel o tuto vzdálenost, bylo zapotřebí provést přepočítání úhlového natočení trubkového

závitu na délku. Pro výpočet se změny polohy zkušební vzorku se aplikovala prostá trojčlenka spolu se základními údaji trubkového závitu $G \frac{1}{2}$:

$$P_{G \frac{1}{2}} = 1,814 \quad (4)$$

$$h = 0,5 \quad (5)$$

kde: $P_{G \frac{1}{2}}$... délková míra posunutí trubkového závitu po jedné otáčce [mm],

h ... zvolená odstupová vzdálenost vzorku od sonotrody [mm],

$$\left| \begin{array}{l} 360^\circ \dots 1,814 \text{ mm} \\ x \dots 0,5 \text{ mm} \end{array} \right| \quad (6)$$

po úpravě trojčlenky získáme hodnotu x , jenž reprezentuje úhel pootočení hřídele:

$$\frac{x}{360} = \frac{0,5}{1,814} \quad (7)$$

$$x = \frac{0,5}{1,814} \cdot 360 = 99,23^\circ \quad (8)$$

Přes hřídel a upínací přírubu se lihovým fixem vyznačila ryska, jenž na přírubě představovala počáteční polohu. Od počáteční rysky se vyznačila druhá ryska s konečnou polohou pod úhlem $99,2$ stupňů. Poté se kontramatice uvolnila a hřídel se pootočila od počáteční rysky do konečné polohy a zasunula se tak do příruby o vzdálenost $0,5$ mm. Nakonec se kontramatice s těsnicí páskou pevně utáhla, aby během erozního testu a experimentu nedošlo ke změně odstupové vzdálenosti.

Proces erozního testu

Proces spočíval ve vystavení zkušební vzorku ultrazvukové kavitaci v krátkém časovém úseku při doprovodné kontrole úbytku hmotnosti. Vzorek upnutý do příruby se přišrouboval ke dvoustěnné nádobě a přes nálevku (Obrázek 29) se do nádoby nalila destilovaná voda pečlivě tak, aby v nádobě nezůstala žádná vzduchová kapsa. Poté se skrze ultrazvukový generátor spustil proces kavitace. Časový interval byl od počátku testu nastaven na krok po jedné minutě. Po každém kroku se příruba odšroubovala od nádoby a vzorek se vyjmul z upínací příruby, vysušil fénem, a nakonec třikrát zvažil na digitální váze. Takto se cyklus opakoval, dokud se hmotnost vzorku nezačala prokazatelně měnit. Jakmile tento stav nastal, bylo dosaženo hraničního časového údaje inkubační doby, při němž je zpevnění materiálu největší. Pro studijní účely se po nalezení tohoto údaje pokračovalo v testu, avšak tentokrát s časovým intervalem až pěti minut.

5.6.1 Výsledky erozních testů

Níže uvedené tabulky a grafy představují výsledky erozních testů pro oba hliníkové materiály. Pro každý materiál byly výsledky rozděleny do tabulky pro inkubační a přechodovou fázi.

Tabulka 11: Erozní test EN AW-2007

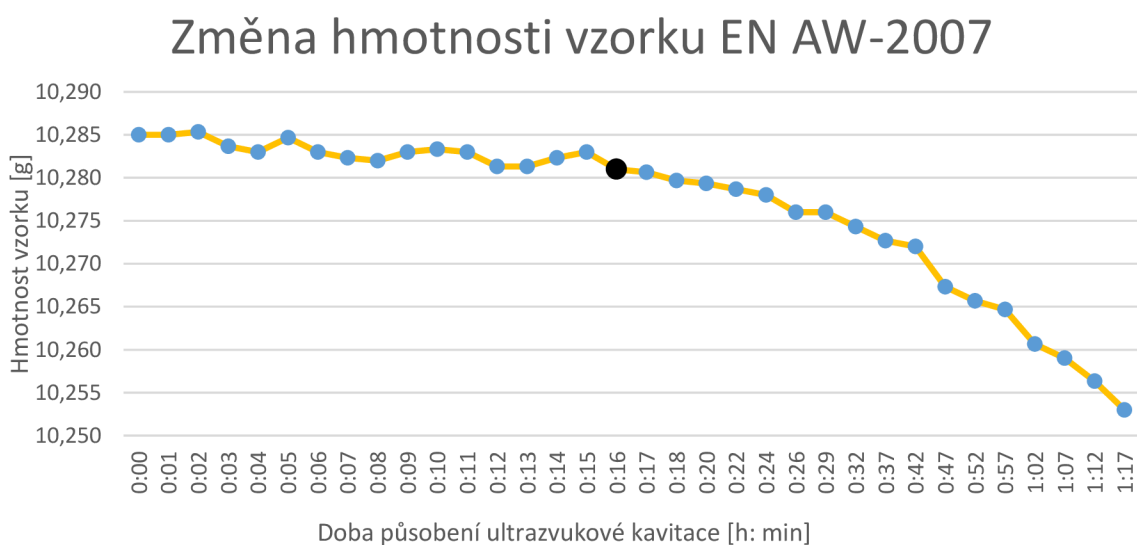
Inkubační fáze: 16 [min]

Časový interval: 1 [min]		EN AW-2007		
t [h: min]	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	m [g]
0:00	10,286	10,285	10,284	10,285
0:01	10,289	10,282	10,284	10,285
0:02	10,285	10,286	10,285	10,285
0:03	10,283	10,284	10,284	10,284
0:04	10,283	10,284	10,282	10,283
0:05	10,283	10,286	10,285	10,285
0:06	10,284	10,282	10,283	10,283
0:07	10,282	10,283	10,282	10,282
0:08	10,282	10,283	10,281	10,282
0:09	10,282	10,284	10,283	10,283
0:10	10,283	10,284	10,283	10,283
0:11	10,282	10,283	10,284	10,283
0:12	10,283	10,282	10,281	10,282
0:13	10,282	10,281	10,282	10,282
0:14	10,282	10,281	10,281	10,281
0:15	10,280	10,280	10,281	10,280
0:16	10,281	10,280	10,280	10,280

Tabulka 12: Erozní test EN AW-2007

Přechodová fáze (akcelerace)

Časový interval: 1-5 [min]	
t [h: min]	m [g]
0:17	10,279
0:18	10,279
0:20	10,279
0:22	10,279
0:24	10,278
0:26	10,276
0:29	10,276
0:32	10,274
0:37	10,273
0:42	10,272
0:47	10,267
0:52	10,266
0:57	10,265
1:02	10,261
1:07	10,259
1:12	10,256
1:17	10,253



Graf 1: Změna hmotnosti vzorku EN AW-2007

Tabulka 13: Erozní test EN AW-6082

Inkubační fáze: 14 [min]

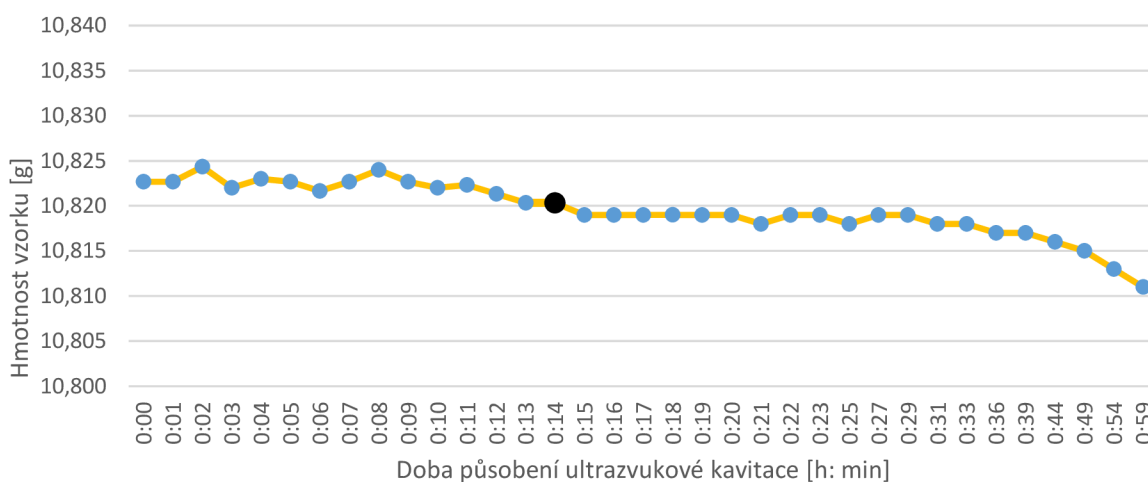
Časový interval: 1 [min]		EN AW-6082		
t [h: min]	m_1 [g]	m_2 [g]	m_3 [g]	m [g]
0:00	10,821	10,824	10,823	10,823
0:01	10,823	10,822	10,823	10,823
0:02	10,824	10,825	10,824	10,824
0:03	10,823	10,821	10,822	10,822
0:04	10,823	10,823	10,823	10,823
0:05	10,821	10,823	10,824	10,823
0:06	10,822	10,822	10,821	10,822
0:07	10,822	10,823	10,823	10,823
0:08	10,825	10,824	10,823	10,824
0:09	10,822	10,824	10,822	10,823
0:10	10,821	10,823	10,822	10,822
0:11	10,823	10,823	10,821	10,822
0:12	10,822	10,821	10,821	10,821
0:13	10,820	10,82	10,821	10,821
0:14	10,821	10,820	10,820	10,820

Tabulka 14: Erozní test EN AW-6082

Přechodová fáze (akcelerace)

Časový interval: 2-5 [min]	
t [h: min]	m [g]
0:15	10,819
0:16	10,819
0:17	10,819
0:18	10,819
0:19	10,819
0:20	10,819
0:21	10,818
0:22	10,819
0:23	10,819
0:25	10,818
0:27	10,819
0:29	10,819
0:31	10,818
0:33	10,818
0:36	10,817
0:39	10,817
0:44	10,816
0:49	10,815
0:54	10,813

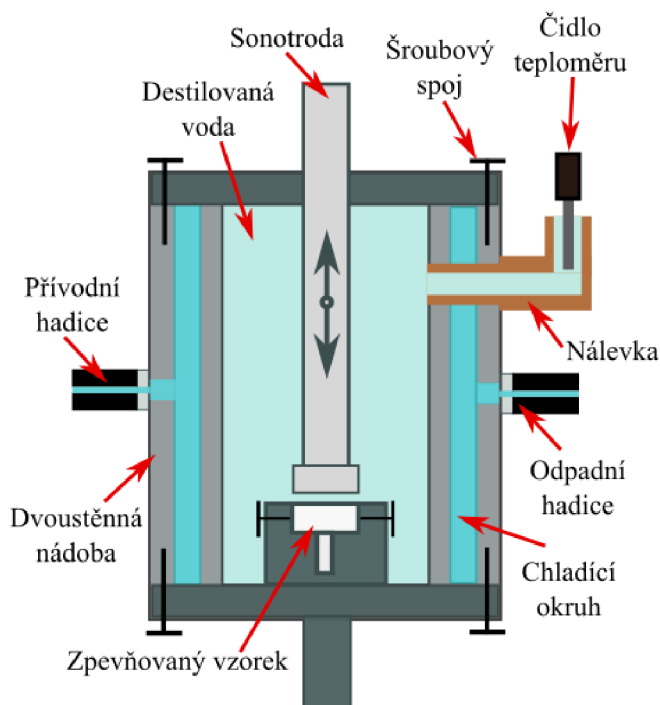
Změna hmotnosti vzorku EN AW-6082



Graf 2: Změna hmotnosti vzorku EN AW-6082

5.7 Experiment zpevňování ultrazvukovou kavitací

Proces zpevňování ultrazvukovou kavitací měl totožný průběh, jako tomu bylo v případě erozního testu. Rozdíl byl pouze v časových intervalech, při nichž byl vzorek vystavován kavitaci. Časové intervaly pro oba materiály jsou odvozeny na základě výsledků erozního testu. Jelikož při ultrazvukové kavitaci dochází k nárůstu teploty pracovního média (destilované vody), bylo zapotřebí tento parametr pozorovat pomocí teploměru. Obdobně jako u eroznímu testu zde hrozilo, že by narůstající vysoká teplota mohla mít vliv na výsledné zpevnění. Pro stabilizaci teploty vody v obou případech sloužil již zmiňovaný chladicí okruh, jenž udržoval hodnotu $T = 20 \pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$. Ultrazvukový generátor vyvíjel maximální možnou amplitudu $U = 150 \text{ } \mu\text{m}$ při frekvenci $f = 20 \pm 1 \text{ kHz}$. Odstupová vzdálenost mezi vzorkem a sonotrodou byla zachována na hodnotě 0,5 mm.



Obrázek 30: Schématický řez uzavřenou nádobou



Obrázek 31: Průběh experimentu

Rozvrh využití zkušebních vzorků

Na počátku návrhu postupů praktické části diplomové práce bylo rozhodnuto, že se pro experimentální část využije sedm vzorků:

- Jeden vzorek pro erozní test,
- Pět vzorků pro experiment ultrazvukového zpevňování,
- Jeden náhradní vzorek.

Náhradní vzorek materiálu EN AW-2007 byl použit již při erozním testu, kdy došlo ke znehodnocení původního vzorku z důvodu poruchy ultrazvukového generátoru. V případě náhradního vzorku materiálu EN AW-6082, nedošlo k žádným komplikacím, a tak se využil jako šestý vzorek pro experiment.

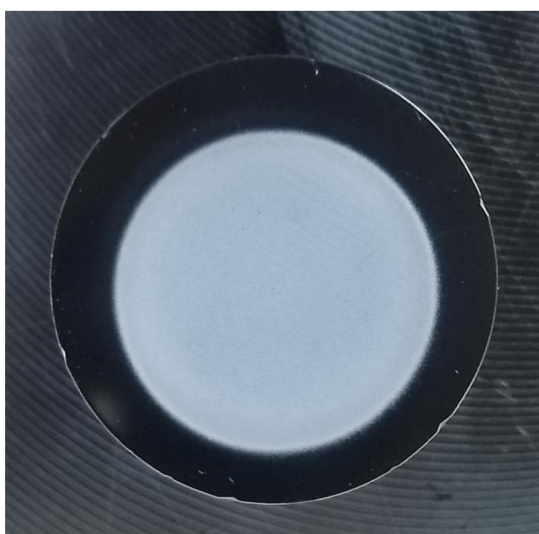
Vzorky určené pro experiment ultrazvukového zpevňování byly dále rozděleny do dvou skupin. První skupinu tvořily čtyři vzorky, které rovnoměrně pokryly celou inkubační fázi. Zbylé vzorky zůstaly pro účely dodatečného testování po vyhodnocení výsledků mikrotvrdosti první skupiny. V tabulkách níže lze vidět časové intervaly všech vzorků, jenž byly při této práci zkoumány. Druhá skupina je v tabulce zvýrazněna šedou barvou.

Tabulka 15: Časové intervaly pro zkušební vzorky materiálu EN AW-2007

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6
Časový interval [min]	4:00	8:00	10:00	12:00	16:00	-

Tabulka 16: Časové intervaly pro zkušební vzorky materiálu EN AW-6082

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6
Časový interval [min]	1:00	2:00	3:30	7:00	10:30	14:00



Obrázek 32: Snímek zpevněného vzorku



Obrázek 33: Snímek erozního vzorku

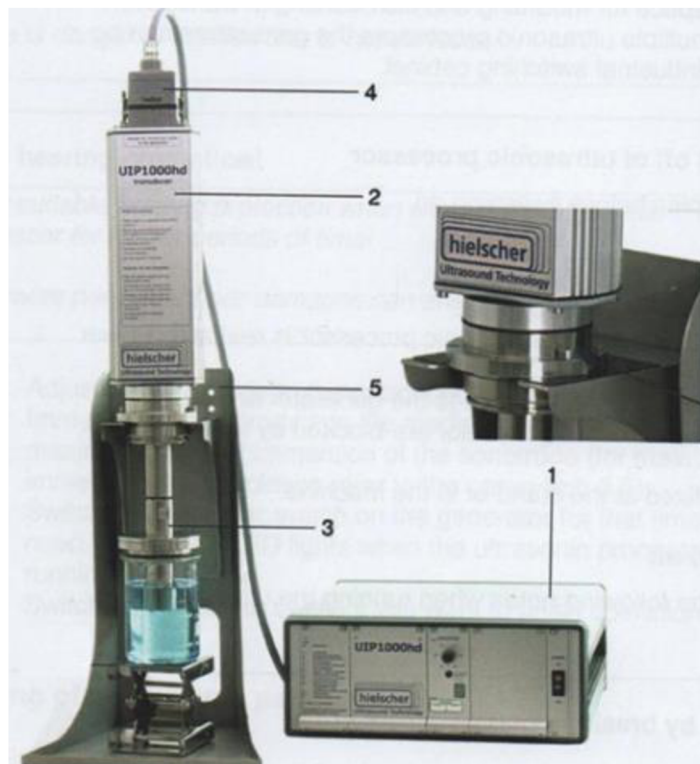
5.7.1 Použitá zařízení

Obsah této podkapitoly je určen k seznámení čtenáře se zařízeními, které byly při experimentální části použity. Popsány jsou zde pouze přístroje a zařízení určené pro účely experimentu a erozního testu. Použité doprovodné nástroje budou vynechány (imbus, šroubovák, pravítko).

Ultrazvukový procesor UIP1000hd

Jedná se o zařízení od firmy Hielscher sloužící k vytvoření ultrazvukového pole. Za akční člen považujeme sonotrodu, jež vyvolává mechanické kmitání o frekvenci 20 ± 1 kHz. Pomocí ultrazvukového generátoru lze nastavit amplitudu v rozmezí 50 až 100 % z hodnoty $150 \mu\text{m}$. Výrobce v manuálu uvádí účinnost vyšší, než 85 % při efektivním příkonu 1000 W. Název ultrazvukový procesor zastupuje sestavu přístroje, jež se dělí na pět základních komponent:

1. Ultrazvukový generátor – elektrická část ultrazvukového procesoru s ovládací funkcí
2. Ultrazvukový převodník – elektromechanická část, převádí elektrickou energii od generátoru na mechanickou energii sonotrody
3. Sonotroda – akční člen, jež kmitá v pracovním médiu
4. Propojovací kabel – spojovací člen pro přenos mezi generátorem a převodníkem
5. Stojan – tuhá část sestavy držící převodník se sonotrodou v sestavě



Obrázek 34: Ultrazvukový procesor UIP1000hd [24]

Digitální teploměr, stolní ventilátor a mobilní zařízení Xiaomi POCO X3 NFC

Pro potřebu experimentu bylo využito běžného digitálního teploměru s měřicí sondou. Ta byla zasunuta do nálevky a teploměr tak podával informace o teplotě destilované vody s přesností na celá čísla. Dalším zařízením byl stolní ventilátor, jenž byl přítomen pouze pro případ, že by okolní podmínky a doba procesu experimentu způsobily přehřívání ultrazvukového procesoru. Posledním zařízením z této skupiny je mobilní zařízení, které bylo použito pro stopování času jak při erozním testu, tak při samotném experimentu.

Laboratorní váha KERN PBS/PBJ a fén

Laboratorní váha je určena k měření hmotnosti zkušební vzorku s přesností na setiny gramu. Měřený objekt se pokládá na kovovou měřicí desku a uzavírá se následně plastovým krytem. Pro správný průběh měření se váha ustavuje do roviny pomocí nastavitelných nožiček podstavce. Digitální displej umožňuje navíc zobrazit orientační hodnotu hmotnosti v miligramech. Tuto číselnou hodnotu představuje číslice v hranaté závorce na obrázku níže. Pro účely vážení zkušebních vzorků bylo vždy nutné materiál usušit, k tomu sloužil fén od značky Philips.



Obrázek 35: Laboratorní váha KERN PBS/PBJ společně s fénem

6 Vyhodnocení experimentu

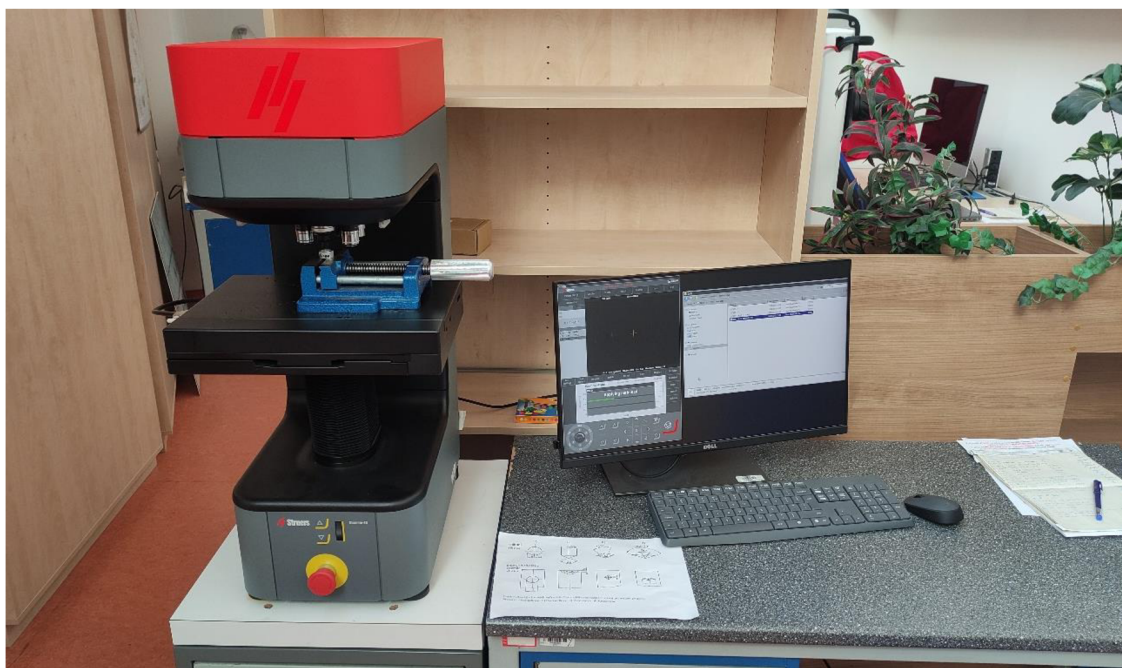
Pro posouzení účinnosti metody zpevňování ultrazvukovou kavitací je důležité stanovit si nejprve hodnotící hlediska. Před samotným experimentem bylo při konzultacích rozhodnuto, že se experiment bude hodnotit na základě parametrů:

- Tvrdosti povrchu,
- Drsnosti povrchu,
- Metalografického řezu.

Veškeré procesy měření a vyhodnocování byly realizovány na půdě Katedry materiálů TUL za pomoci pracovníku katedry.

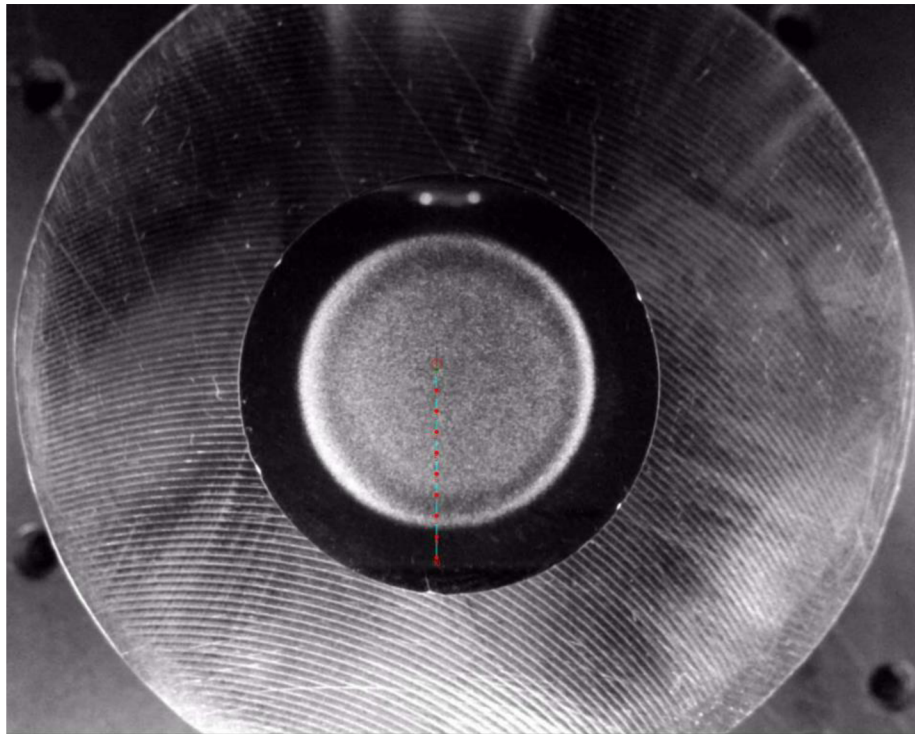
6.1 Měření tvrdosti

Tvrdost materiálu je dnes ve strojírenství vnímána jako jedna z klíčových mechanických vlastností. Za výhodu v tomto případě považujeme rychlost a nízké náklady při zjišťování tohoto parametru. Z hlediska definice se na tvrdost nahlíží jako na odpor materiálu vůči vnikání cizího tělesa. Při určování tvrdosti zkušebních vzorků diplomové práce byla provedena zkouška tvrdosti dle Vickerse. Tato zkouška se řadí mezi nepoužívanější především kvůli své univerzálnosti, přesnosti a minimální závislosti na zatížení.



Obrázek 36: Mikrotvrdoměr DURAMINO 40 od firmy Struers

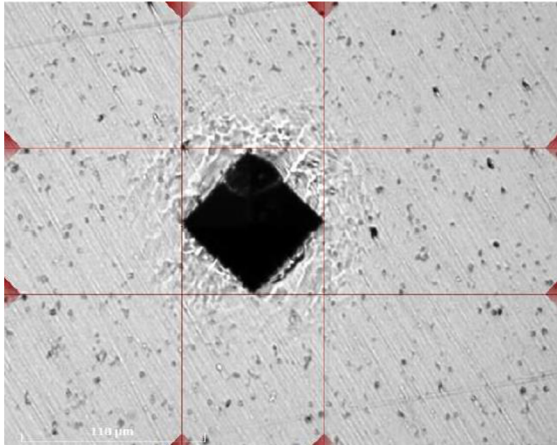
Princip metody spočívá ve vniknutí diamantového indentoru do zkoumaného tělesa a následném setrvání po určitou dobu při daném zatížení. Výslednou hodnotu tvrdosti HV určují úhlopříčky vniklého otisku indentoru. Indentor představuje velmi tvrdé těleso v podobě čtyřbokého jehlanu o vrcholovém úhlu 136° .⁴⁹ Zatížení bylo zvoleno nízké – HV0.5 a odpovídalo hodnotě $F \approx 5$ N. Doba působení zatížení byla nastavena na 10 s. Zařízením pro zkoušku se stal mikrotvrdoměr DURAMINO 40 od firmy Struers (Obrázek 36). Mikrotvrdoměr byl součástí měřicí sestavy spolu s monitorem, jenž promítal software s uživatelským rozhraním určeným pro nastavení parametrů měření. Zde bylo, kromě výše uvedených parametrů, nastaveno i pole měřících vpichů. Před zahájením měření se vzorek upnul do svěráku a usadil na posuvnou plošinu zařízení.



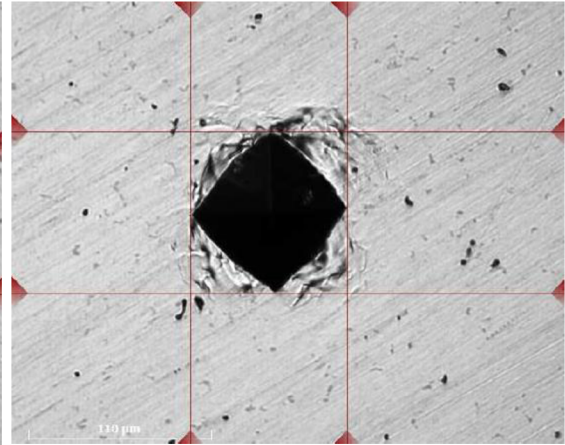
Obrázek 37: Snímek zkušební vzorku EN AW-6082 s rozvrhnutým polem vpichů

Pro každý zkušební vzorek bylo provedeno celkem deset měřících vpichů. První bod se vždy nacházel ve středu modifikované plochy, odkud pole pokračovalo v rovině až na okraj vzorku. Poslední dva vpichy se provedly na kavitaci nezasazené oblasti. Jakmile tento proces skončil, následovala fáze vyhodnocení, při které program posuzoval polohu úhlopříčky otisku z pořízených snímků mikroskopu. Pakliže program nedokázal vyhodnotit koncové body úhlopříček, bylo nutné toto rozmezí upravit ručně. Výstupem programu byl protokol se snímky otisků a veškerými parametry naměřených hodnot tvrdosti povrchu.

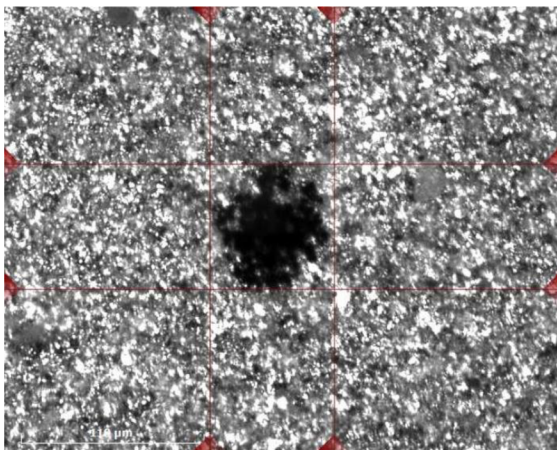
⁴⁹ [10] HLUCHÝ, M. a KOLOUCH J. Strojírenská technologie 1: Náuka o materiálu. Praha, s. 105 – 112.



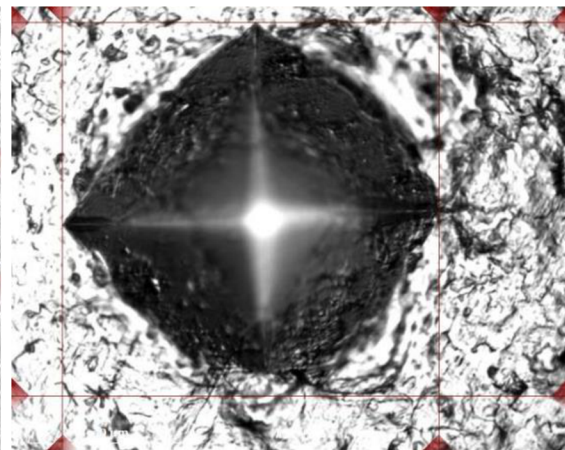
Obrázek 38: Otisk etalonu EN AW-2007
 Inkubační doba: 0 [min]
 Tvrdost: 125.56 HV0.5



Obrázek 39: Otisk etalonu EN AW-6082
 Inkubační doba: 0 [min]
 Tvrdost: 102.51 HV0.5



Obrázek 40: Otisk vzorku EN AW-2007
 Inkubační doba: 12 [min]
 Tvrdost: 163.89 HV0.5



Obrázek 41: Otisk vzorku EN AW-6082
 Inkubační doba: 1 [min]
 Tvrdost: 113.88 HV0.5

6.1.1 Výsledky měření tvrdosti

Výsledky naměřených hodnot tvrdosti dle Vickerse jsou vypsány v následujících tabulkách. Pro oba materiály jsou zvýrazněny nejvyšší dosažené parametry tvrdosti. Vpichy, které nebyly provedeny na kavitaci zasažené ploše, jsou odlišeny modrou barvou. Součástí tabulky jsou i naměřené parametry tvrdosti etalonu obou materiálů uvedené pod časem 0:00. Měření tvrdosti etalonů bylo provedeno ještě před experimentální částí. Z důvodu jejich využití pro účely erozních vzorků.

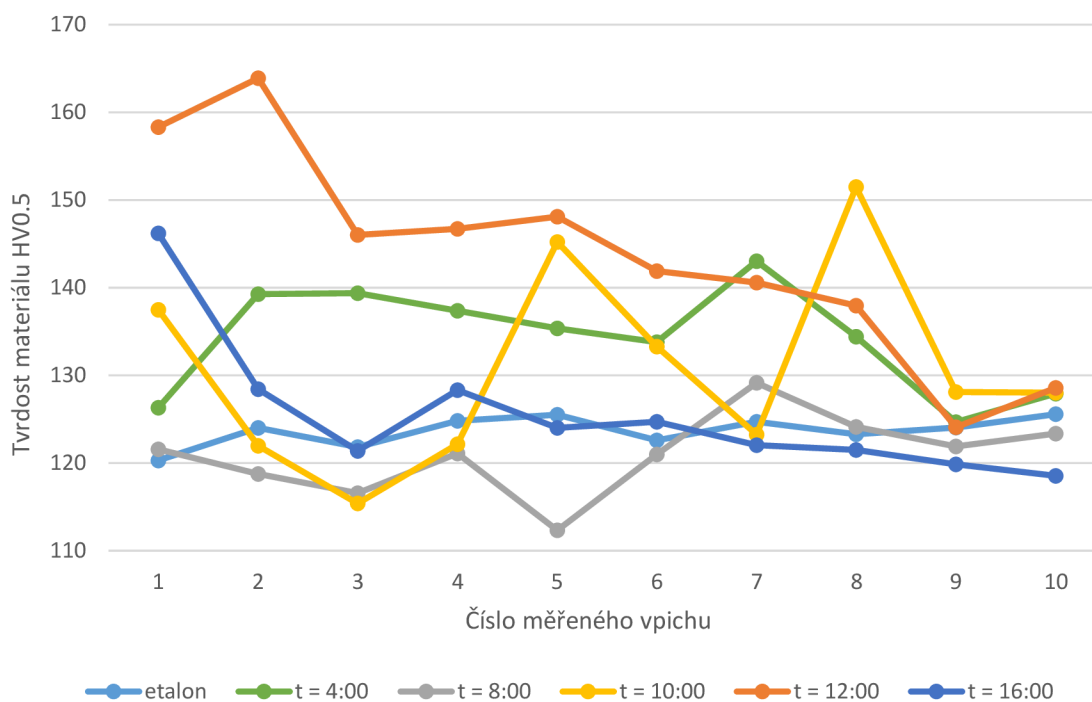
Naměřená tvrdost materiálu EN AW-2007

Tabulka 17: Naměřené hodnoty tvrdosti dle Vickerse HV0.5 materiálu EN AW-2007

Čas [min: s]	Číslo měřeného vpichu									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0:00	120,30	123,99	121,83	124,82	125,49	122,57	124,7	123,28	124,05	125,56
4:00	126,30	139,25	139,37	137,37	135,35	133,78	143,02	134,41	124,67	127,91
8:00	121,57	118,74	116,57	121,07	112,32	120,97	129,14	124,11	121,88	123,34
10:00	137,46	121,98	115,38	122,15	145,21	133,27	123,25	151,47	128,10	128,03
12:00	158,31	163,89	146,01	146,70	148,09	141,88	140,57	137,93	124,07	128,57
16:00	146,18	128,44	121,39	128,33	124,01	124,69	122,05	121,50	119,83	118,54

Tabulka 18: Střední hodnota a směrodatná odchylka výsledků tvrdosti materiálu EN AW-2007

Čas [min: s]	0:00	4:00	8:00	10:00	12:00	16:00
Střední hodnota HV0.5	123,66	136,11	120,56	131,27	147,92	127,07
Směrodatná odchylka HV0.5	1,60	4,68	4,67	11,89	8,36	7,68



Graf 3: Vliv ultrazvukové kavitace na změnu tvrdosti materiálu EN AW-2007

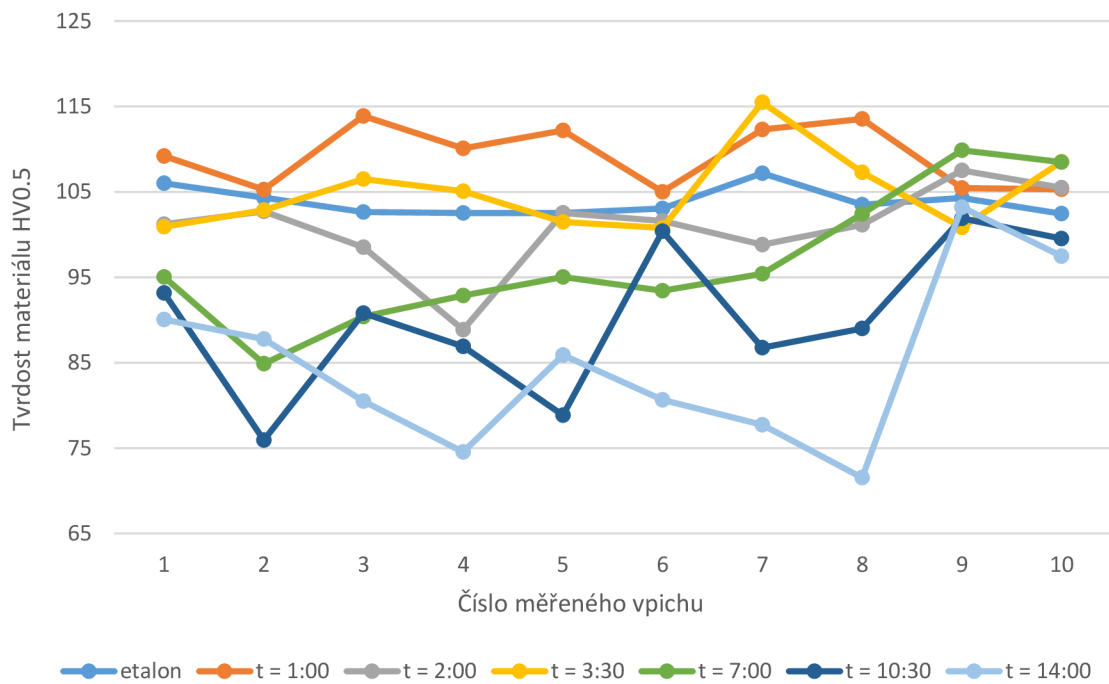
Naměřená tvrdost materiálu EN AW-6082

Tabulka 19: Naměřené hodnoty tvrdosti dle Vickerse HV0.5 materiálu EN AW-6082

Čas [min: s]	Číslo měřeného vpichu									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0:00	106,00	104,32	102,62	102,51	102,51	103,06	107,18	103,49	104,27	102,44
1:00	109,21	105,25	113,88	110,10	112,19	105,01	112,32	113,55	105,46	105,31
2:00	101,22	102,71	98,50	88,86	102,52	101,60	98,82	101,13	107,51	105,50
3:30	100,91	102,86	106,51	105,08	101,47	100,78	115,48	107,28	100,83	108,51
7:00	95,03	84,87	90,37	92,87	95,03	93,41	95,41	102,40	109,87	108,49
10:30	93,15	75,93	90,81	86,91	78,85	100,39	86,74	89,00	101,90	99,52
14:00	90,05	87,76	80,51	74,53	85,89	80,65	77,71	71,53	103,21	97,45

Tabulka 20: Střední hodnota a směrodatná odchylka výsledků tvrdosti materiálu EN AW-6082

Čas [min: s]	0:00	1:00	2:00	3:30	7:00	10:30	14:00
Střední hodnota HV0.5	103,84	110,19	99,42	105,05	93,67	87,72	81,08
Směrodatná odchylka HV0.5	1,55	3,27	4,24	4,59	4,64	7,25	6,06



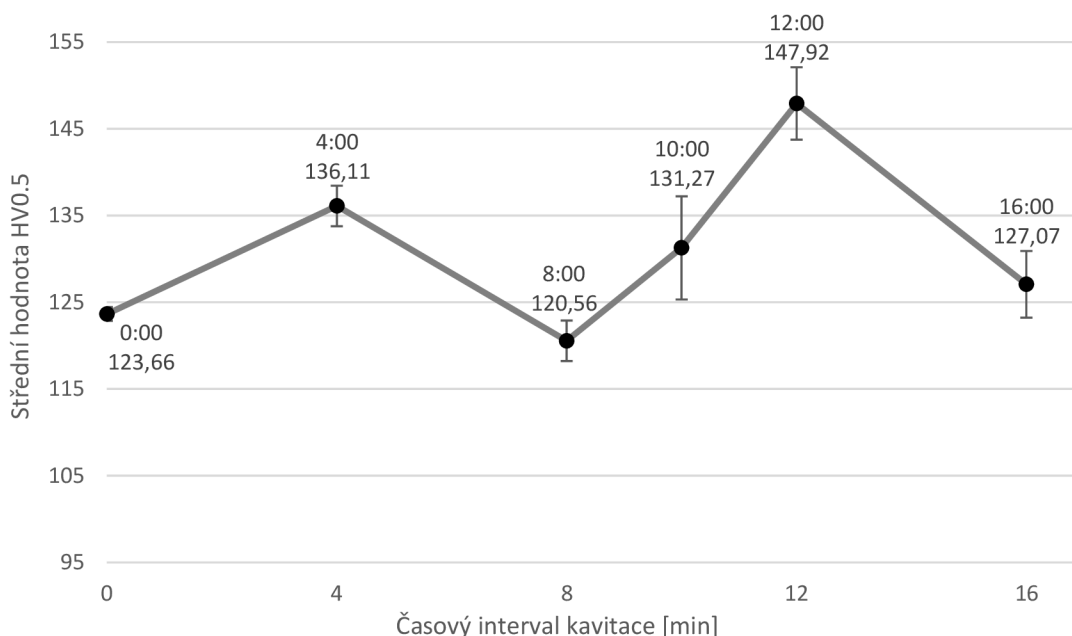
Graf 4: Vliv ultrazvukové kavitace na změnu tvrdosti materiálu EN AW-6082

6.1.2 Hodnocení výsledků měření tvrdosti

Tato část kapitoly se věnuje shrnutí a diskuzi nad poznatky získanými při měření tvrdosti zkušebních vzorků.

Materiál EN AW-2007

Z naměřených výsledků vyplývá, že materiál EN AW-2007 nabývá nejvyšší hodnoty tvrdosti přibližně v čase $t = 12$ min. V tomto časovém intervalu bylo dosaženo střední hodnoty 147,92 HV0.5 při směrodatné odchylce 8,36 HV0.5. Jedná se tedy o zhruba 20 % nárůst tvrdosti při aplikaci ultrazvukového kavitačního zpevňování.

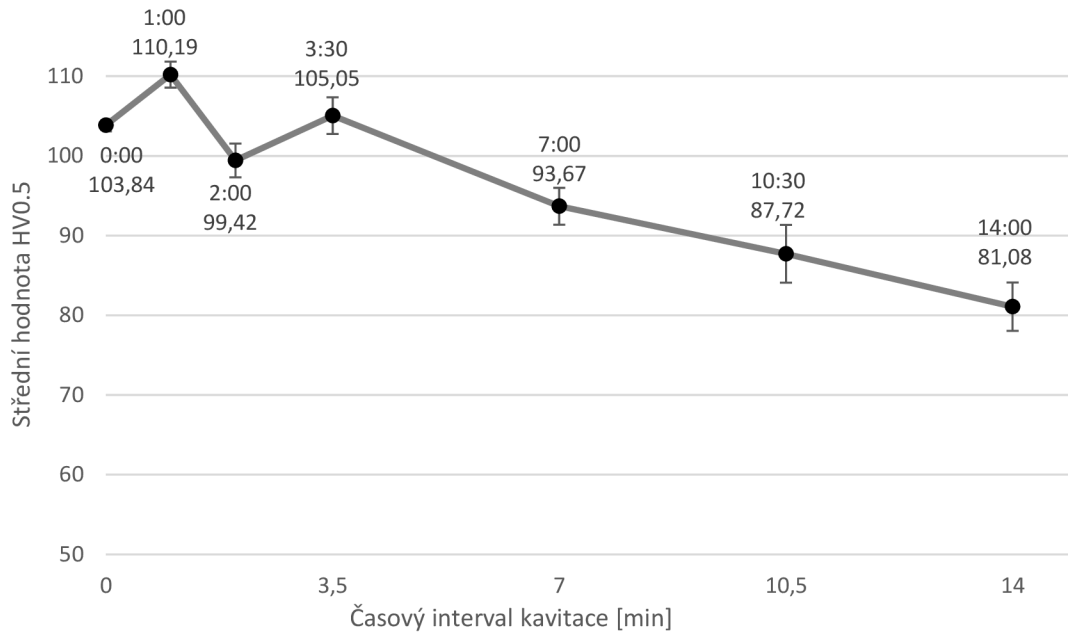


Graf 5: Závislost střední hodnoty tvrdosti na době působení kavitačního zpevňování materiálu EN AW- 2007

Navzdory výsledkům erozního testu, kdy se konec inkubační fáze odhadoval kolem 16. minuty, lze konečný čas inkubační fáze stanovit přibližně na 12 minut. Důvodem tohoto chybného úsudku může být špatné posouzení naměřených úbytků hmotnosti během erozního testu. Jako zavádějící faktor považuji nevhodnou volbu měřicího zařízení, jenž poskytovalo výsledky změny hmotnosti s přesností pouze na setiny gramu. Pro přesnější vykreslení skutečné inkubační oblasti byl použit náhradní vzorek, který byl vystaven kavitaci po dobu 10 minut a potvrdil tendenci nárůstu tvrdosti materiálu ke konci inkubační fáze.

Materiál EN AW-6082

V případě výsledků materiálu EN AW-6082 se setkáváme pouze s mírným nárůstem tvrdosti. Nejvyšších parametrů tvrdosti dosáhl materiál již po jedné minutě působení ultrazvukové kavitace, kdy se střední hodnota zvýšila na 110,19 HV0.5. Směrodatná odchylka byla rovna 3,27 HV0.5. Z těchto výsledných hodnot tedy vyplívá nárůst tvrdosti o pouhých 6 %.



Graf 6: Závislost střední hodnoty tvrdosti na době působení kavitačního zpevňování materiálu EN AW- 6082

Porovnáme-li opět výsledky ultrazvukového zpevňování s erozním testem, setkáváme se chybnou identifikací rozmezí inkubační fáze. Původní předpoklad počítal se zpevňováním materiálu až do 14. minuty. Avšak vzhledem k výsledkům experimentu lze na základě teorie usoudit, že ve skutečnosti probíhala akcelerační část přechodové fáze erozní křivky. Prvotní výsledky, které byly pořízeny s první skupinou vzorků, poskytly pouze negativní dopad v podobě snížení hodnot parametru tvrdosti materiálu. Pro opětovný pokus nalezení inkubační doby se použily dva náhradní vzorky. Z tohoto pokusu vyšel s pozitivním výsledkem pouze vzorek zpevňovaný do 1. minuty.

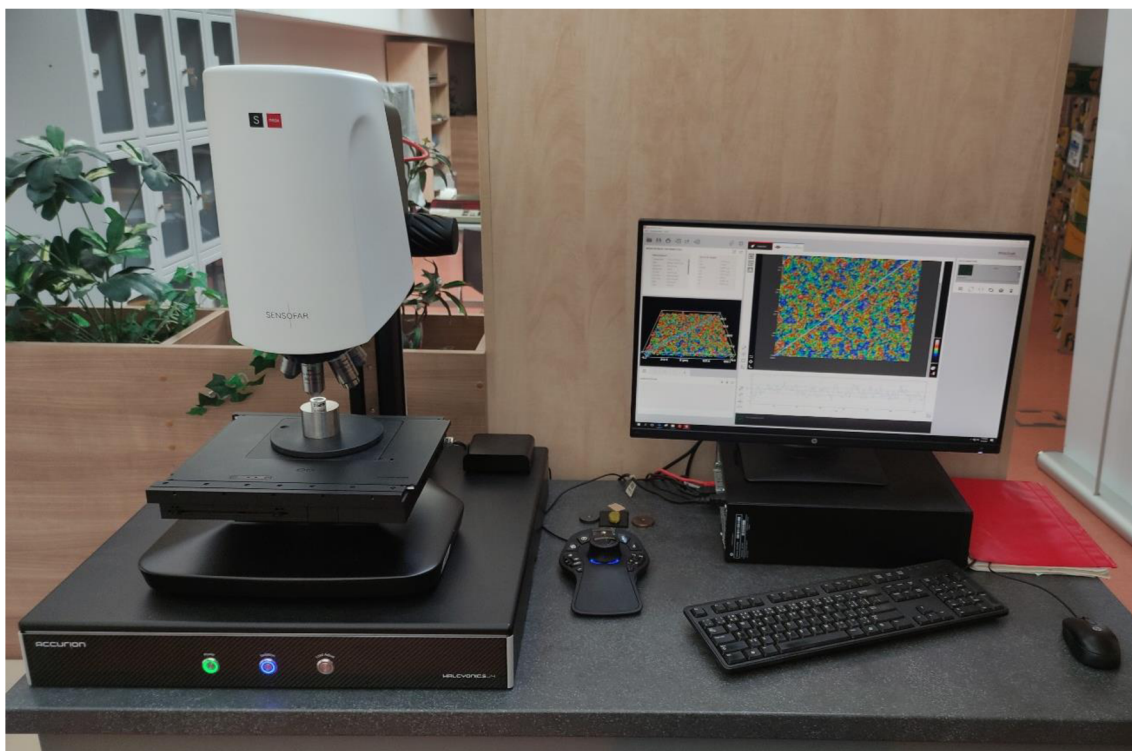
Dodatek k výsledkům tvrdosti

Zaměříme-li se opět na vyobrazené grafy závislosti střední hodnoty tvrdosti na době působení kavitačního zpevnování (Graf 5 a 6), můžeme při zkoumání křivek zpozorovat vykreslení dvou vrcholů u obou materiálů. Důvod této skutečnosti není zcela jasný. Z hodnot směrodatných odchylek je zřejmé, že se tyto vrcholy budou projevovat při jakékoliv nastavené hranici. Poměr velikostí vrcholů se též v obou případech liší. V případě materiálu EN AW-2007 nabývá křivka nejvyšší hodnoty tvrdosti při dosažení druhého vrcholu. U materiálu EN AW-6082 pozorujeme přesný opak. Zdůvodnění výskytu vrcholů se jeví jako vhodný impuls k budoucí důkladnější studii.

V poslední řadě je vhodné se též pozastavit nad vyhodnocením poloh úhlopříček při měření tvrdosti materiálu. Z důvodu působení kavitační eroze na zpevnovaný povrch dochází ke značnému zhoršení drsnosti povrchové vrstvy na mikroskopické úrovni. Tento fakt způsobil obtížnější klasifikaci hodnoty tvrdosti, jelikož otisk vpichu nebyl ze snímku vždy zřetelný (Obrázek 40).

6.2 Měření drsnosti povrchu

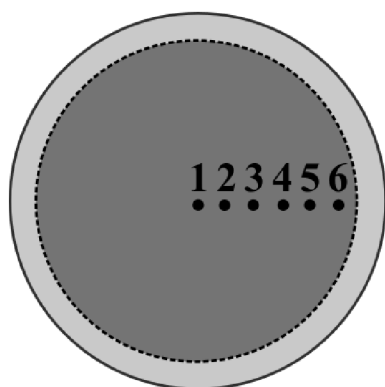
Obdobně jako v případě tvrdosti se drsnost řadí mezi přední parametry zájmu při zkoumání vlastností povrchu materiálu. Drsnost (též označována jako jakost) vyjadřuje míru nerovnosti povrchu, jenž je zapříčiněna opracováním této plochy. Podstatný vliv na hodnotu drsnosti povrchu má technologie výroby a podmínky, při kterých se plocha obrábí. Pro určení drsnosti povrchu zkušebních vzorků byl použit bezkontaktní profilometr SENSOFAR S-NEOX s konfokálním a interferometrickým mikroskopem. Toto zařízení umožňuje skenování povrchu pomocí konfokální a interferometrické metody.



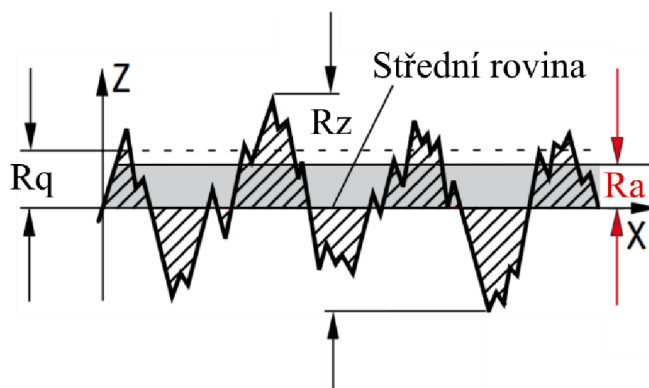
Obrázek 42: Bezkontaktní profilometr SENSOFAR S-NEOX s konfokálním a interferometrickým mikroskopem

Před zahájením měření byly zkušební vzorky označeny šesti body pozic na kavitaci zasažené ploše. Toto označení sloužilo pro snazší orientaci na povrchu vzorku při přiblížení mikroskopem. Postup měření drsnosti spočíval v ustavení zkušebního vzorku na posuvnou plošinu profilometru. Následně byl vybrán vhodný objektiv pro skenování, jenž v tomto případě představoval Nikon TU Plan Fluor 20x/0,45A. Po přípravě vzorku s objektivem se přešlo do softwarového prostředí programu SensoSCAN S neox, kde se na monitor promítal 20x zvětšený povrch vzorku. Kontrolní panel zprostředkoval pohyb plošiny se vzorkem a zaostření oblasti před procesem skenování. Jakmile byl proces skenování povrchu dokončen, zobrazily se podklady pro

vytvoření protokolu. Součástí protokolu byly naměřené parametry drsnosti a grafický snímek struktury povrchu, na kterém se následně provedl úhlopříčný řez za účelem vyobrazení nerovností. Pro každý vzorek bylo vyhotoveno šest protokolů, přičemž skenovaná poloha odpovídala vyznačeným pozicím.



Obrázek 43: Schéma pozic vzorku



Obrázek 44: Schéma parametrů drsnosti [28]

6.2.1 Výsledky měření drsnosti

Během procesu měření drsnosti povrchu byly naměřeny parametry dle normy ČSN EN ISO 25178. Jedná se o výškové parametry, jenž udávají informace v ose kolmé k povrchu. Přehled výškových parametrů je k vidění v tabulce 21.

Tabulka 21: Výškové parametry dle normy ISO 25178

Značení	Parametr – popis
Ra	Průměrná aritmetická výška povrchu – <i>průměrná drsnost povrchu (Sa)</i>
Rz	Největší výška – <i>výška mezi nejnižší prohlubní a nejvyšším výstupkem (Sz)</i>
Rv	Největší hloubka prohlubně – <i>výška mezi nejnižší prohlubní a střední rovinou (Sv)</i>
Rp	Největší výška výstupku – <i>výška mezi střední rovinou a nejvyšším výstupkem (Sp)</i>
Rku	Špičatost – <i>hodnota strmosti křivky (Sku)</i>
Rsk	Šikmost – <i>hodnota asymetrie křivky (Ssk)</i>
Rq	Průměrná kvadratická výška povrchu – <i>RMS (Sq)</i>

Zdroj: [28] *Parametry drsnosti Mahr*. klz.inshop.cz [online]. Zlín: Kalibrační laboratoř Zindler, 2024.

Pro účely hodnocení výsledků drsnosti povrchu jsou v této podkapitole vybrány pouze některé parametry z protokolu. Jedná se především o směrodatný parametr průměrné drsnosti povrchu Ra a hloubku největší prohlubně Rz.

Naměřené parametry materiálu EN AW-2007

Tabulka 22: Naměřené hodnoty parametru Ra pro materiál EN AW-2007 v mikrometrech

Čas [min: s]	Pozice na zkušebním vzorku						Střední hodnota	Směrodatná odchylka
	1	2	3	4	5	6		
0:00	0,015	0,023	0,035	0,013	0,036	0,058	0,030	0,015
4:00	0,766	0,829	0,764	0,743	0,727	0,637	0,744	0,058
8:00	1,588	1,417	1,493	1,428	1,425	1,207	1,426	0,115
10:00	1,917	1,788	1,720	1,682	1,517	1,235	1,643	0,218
12:00	1,731	1,780	1,622	1,612	1,533	1,481	1,626	0,104
16:00	1,910	1,839	1,856	1,761	1,537	1,567	1,745	0,143

Tabulka 23: Naměřené hodnoty parametru Rz pro materiál EN AW-2007 v mikrometrech

Čas [min: s]	Pozice na zkušebním vzorku						Střední hodnota	Směrodatná odchylka
	1	2	3	4	5	6		
0:00	0,085	0,137	0,210	0,090	0,263	0,356	0,190	0,098
4:00	5,207	6,093	5,408	5,427	5,204	4,579	5,319	0,446
8:00	10,891	10,233	10,249	10,220	10,458	8,880	10,155	0,616
10:00	13,827	12,836	12,090	11,755	11,490	9,188	11,864	1,424
12:00	12,673	12,426	11,714	11,722	10,834	10,383	11,625	0,809
16:00	13,938	13,029	13,484	12,283	11,680	11,544	12,660	0,894

Naměřené parametry materiálu EN AW-6082

Tabulka 24: Naměřené hodnoty parametru Ra pro materiál EN AW-6082 v mikrometrech

Čas [min: s]	Pozice na zkušebním vzorku						Střední hodnota	Směrodatná odchylka
	1	2	3	4	5	6		
0:00	0,016	0,019	0,025	0,023	0,030	0,025	0,023	0,005
1:00	0,509	0,538	0,532	0,532	0,523	0,484	0,520	0,018
2:00	0,723	0,733	0,767	0,784	0,851	0,805	0,777	0,043
3:30	1,300	1,252	1,345	1,380	1,337	1,253	1,311	0,048
7:00	2,209	2,160	2,182	2,127	2,139	2,099	2,153	0,036
10:30	2,789	2,813	2,765	2,708	2,480	2,484	2,673	0,139
14:00	3,059	3,133	3,088	2,998	2,762	2,631	2,945	0,184

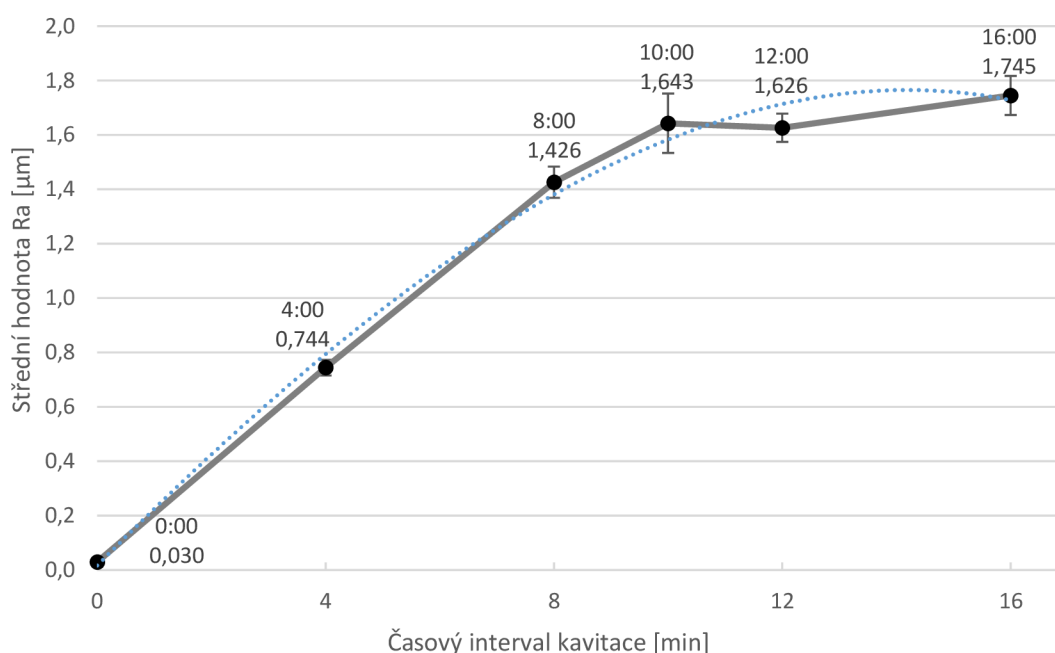
Tabulka 25: Naměřené hodnoty parametru Rz pro materiál EN AW-6082 v mikrometrech

Čas [min: s]	Pozice na zkušebním vzorku						Střední hodnota	Směrodatná odchylka
	1	2	3	4	5	6		
0:00	0,113	0,141	0,186	0,176	0,217	0,192	0,171	0,034
1:00	3,522	3,984	3,914	3,917	3,674	3,505	3,753	0,195
2:00	5,047	4,946	5,671	5,663	6,230	6,534	5,682	0,573
3:30	9,526	9,258	9,615	9,521	9,770	9,251	9,490	0,186
7:00	15,889	15,909	17,514	15,725	15,792	16,271	16,183	0,620
10:30	20,430	20,474	18,864	19,380	17,902	17,128	19,030	1,231
14:00	20,735	21,213	22,544	21,318	19,395	18,392	20,600	1,355

6.2.2 Hodnocení výsledků měření drsnosti povrchu

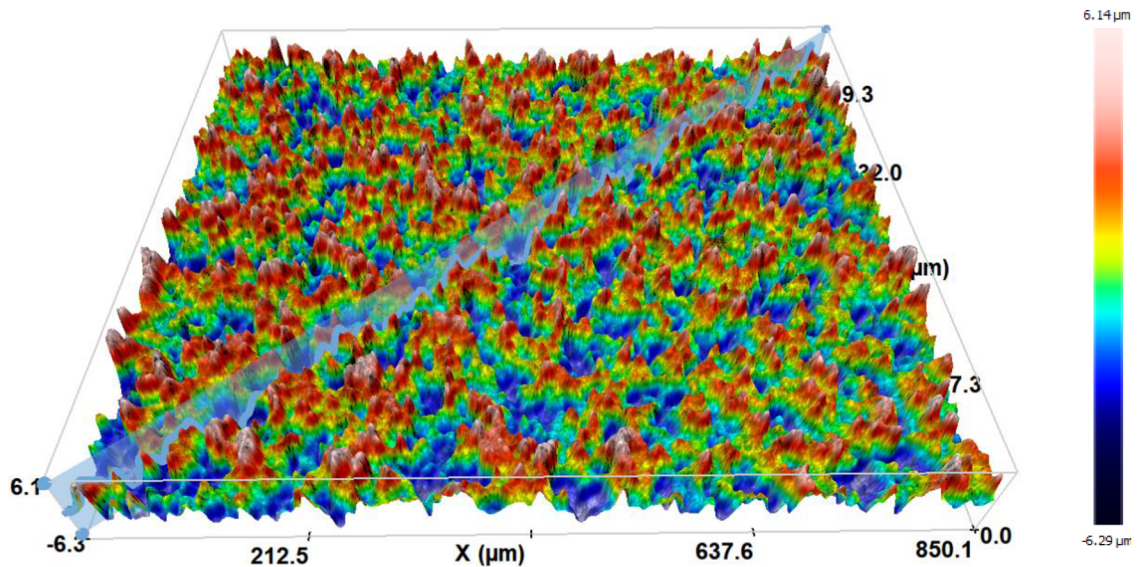
Materiál EN AW-2007

Při hodnocení drsnosti povrchu materiálu EN AW-2007 lze zaznamenat pozvolný nárůst hodnot, jenž byl způsoben procesem kavitační eroze. Na grafu níže je tento nárůst zachycen skrze střední hodnoty naměřených drsností Ra. Vzniklá křivka je proložena spojnici trendu v podobě polynomu třetího stupně. Ačkoli se trend růstu jeví jako výrazný, je nutné vzít v úvahu počáteční drsnost vyleštěných vzorků. Zaměříme-li se na hodnoty posledního zkušebního vzorku (16:00), můžeme předpokládat rapidní zhoršení drsnosti povrchu v souvislosti s akcelerační částí přechodové fáze erozní křivky.



Graf 7: Nárůst drsnosti povrchu materiálu EN AW-2007 v čase

Drsnosti vzorků z inkubační fáze nabývají maximální střední hodnoty $R_a = 1,643 \mu\text{m}$ při směrodatné odchylce $0,218 \mu\text{m}$. Porovnáme-li tyto hodnoty s běžně předepisovanými drsnostmi, pohybujeme se na jakosti povrchu materiálu, jenž je obráběn na čisto. Tato jakost povrchu splňuje převážnou část požadavků na kvalitu povrchu materiálu ve strojírenství.



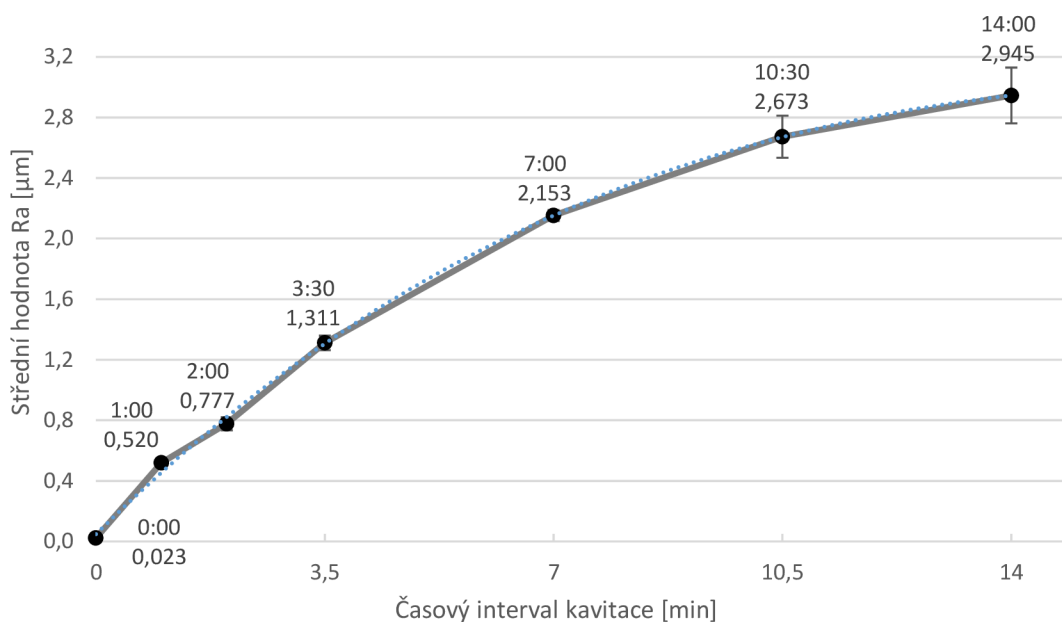
Obrázek 45: Snímek 3D struktury povrchu vzorku $t = 12 \text{ min}$, pozice 2, materiál EN AW-2007

Druhým sledovaným parametrem byla hodnota největší hloubky prohlubně R_z . Z procesu měření vzorků inkubační fáze dosáhl tento parametr nejvyšší střední hodnoty $11,864 \mu\text{m}$ při směrodatné odchylce $1,424 \mu\text{m}$. Dle převodníku drsností od firmy MIKON TOOLS s. r. o. lze mezi sebou porovnat parametry R_a a R_z , přičemž pro drsnost $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ odpovídají hodnoty R_z v rozmezí 10 až $16 \mu\text{m}$.⁵⁰

Materiál EN AW-6082

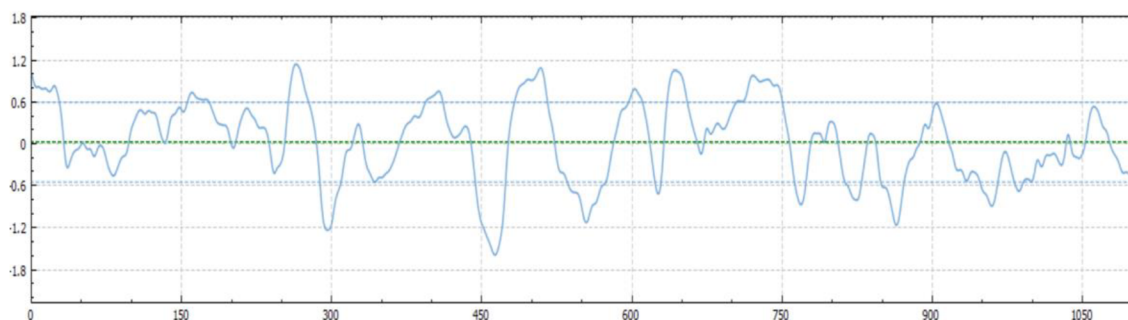
Výsledky drsnosti povrchu materiálu EN AW-6082 s sebou přináší neúspěšné zmapování hodnot v důsledku chybného předpokladu rozsahu inkubační fáze. Podíváme-li se na křivku středních hodnot drsnosti (Graf 8), můžeme zpozorovat jistou podobnost s erozní křivkou. Křivka je v tomto případě též proložena spojnicí trendu polynomu třetího stupně. Z výsledků tvrdosti lze usuzovat konec inkubační fáze v čase $t = 1 \text{ min}$. Od tohoto okamžiku je k vidění přítomnost přechodové fáze erozní křivky, kdy se nejprve projeví akcelerační část se znatelným nárůstem drsnosti. Od přibližně třetí minuty působení ultrazvukové kavitace se růst ustálí a následuje decelerační část, jejíž konec nebyl při měření již zachycen.

⁵⁰ [29] *Drsnosti povrchů a jejich značení a převodník*. Mikon-tools.cz [online]. Brno, 2024.



Graf 8: Nárůst drsnosti povrchu materiálu EN AW-6082 v čase

Z naměřených hodnot tvrdosti usuzujeme, že pro výsledky drsnosti povrchu vzorků inkubační fáze je směrodatný pouze vzorek zpevňovaný po dobu jedné minuty. Střední hodnota průměrné drsnosti tohoto vzorku je rovna $0,520 \mu\text{m}$ se směrodatnou odchylkou $0,018 \mu\text{m}$. Oproti materiálu EN AW-2007 se sice setkáváme s nižším nárůstem tvrdosti, avšak drsnost povrchu zde dosahuje velmi přívětivých hodnot a je srovnatelná s jakostí broušeného povrchu.



Obrázek 46: Průřez povrchové vrstvy vzorku $t = 1 \text{ min}$, pozice 1, materiál EN AW-6082

Pro parametr největší hloubky prohlubně se z výsledků měření vypočítala střední hodnota $Rz = 3,753 \mu\text{m}$, jejíž směrodatná odchylka nabývá hodnoty $0,195 \mu\text{m}$. Porovnáme-li opět parametry Ra a Rz s tabulkovými hodnotami převodníku, dojdeme k závěru, že se pro parametr Rz pohybujeme v oblasti hodnot, jež odpovídají normalizované drsnosti $Ra = 0,4 \mu\text{m}$ a méně.⁵¹

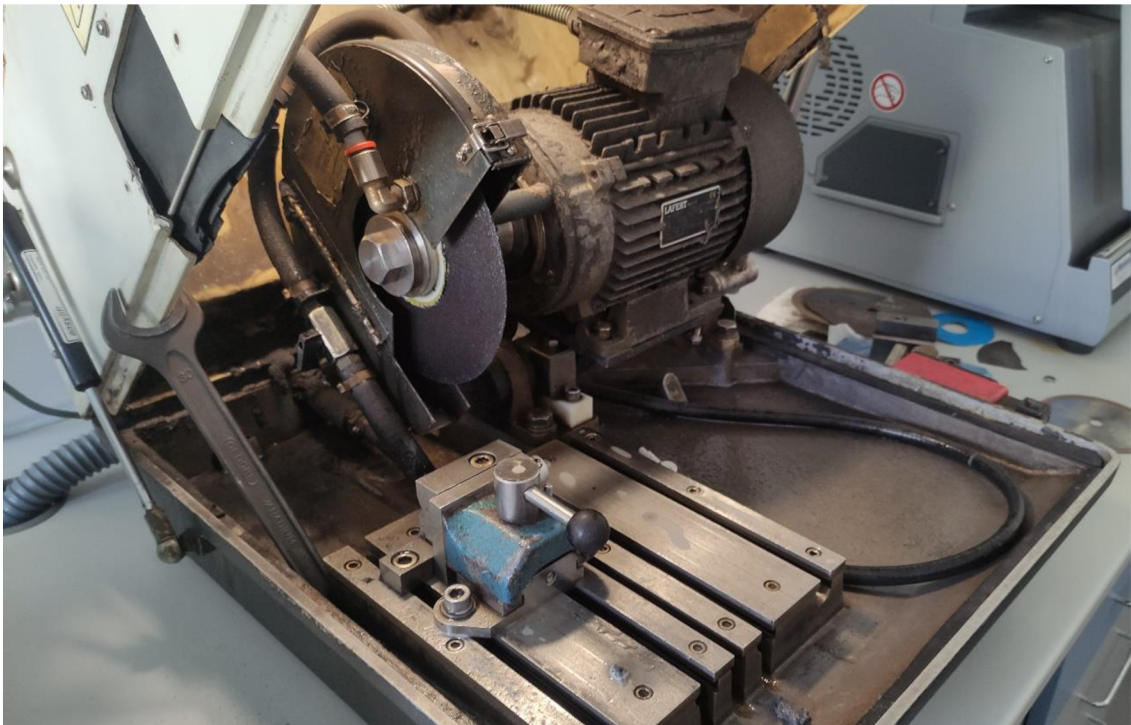
⁵¹ [29] *Drsnosti povrchů a jejich značení a převodník*. Mikon-tools.cz [online]. Brno, 2024.

6.3 Metalografický řez

Metalografický řez označuje proces, při kterém je zkoumaný materiál rozdělen pilou za účelem provedení materiálové analýzy. Důležitým předpokladem procesu je záruka minimálního vlivu mechanické a tepelné deformace. Jako nejvhodnější metodu metalografického řezu označujeme abrazivní řezání za mokra, jenž způsobuje nejmenší poškození a ovlivnění zkoumaného vzorku.⁵²

6.3.1 Příprava vzorků metalografického řezu

Pro účely hodnocení experimentální části byl proveden metalografický řez na dvou zkušebních vzorcích pro oba materiály. V obou případech se použil jeden vzorek, jenž nebyl zpevňován kavitací. Geometrie tohoto vzorku byla stejná jako u ostatních zkušebních vzorků s rozdílem, že povrch vzorku byl pouze frézován. Druhý vzorek zastupoval výsledek nejvyšší dosažené tvrdosti materiálu způsobené zpevňování ultrazvukovou kavitací. Výběr vzorků je založen na porovnatelnosti neovlivněného materiálu s nejlépe modifikovaným materiálem experimentální části.



Obrázek 47: Rozbrušovací pila DELTA od firmy Buehler

⁵² [30] *Dělení materiálu*. Metalco.cz [online]. Roztoky u Prahy: Metalco Testing s.r.o, 2024.

Dělení a příprava vzorků se v tomto případě skládala z několika na sebe navazujících kroků. V první řadě byla válcová část zkušební vzorku oddělena od upínací stopky, která již neměla význam v této fázi diplomové práce. Dělení bylo provedeno na rozbrušovací pile DELTA za přítomnosti kontinuálně přiváděného chlazení do oblasti řezu. Chlazení zprostředkovala chladicí kapalina, jenž měla za cíl zamezit tepelné deformaci. Jakmile byla stopka oddělena, přešlo se k dalšímu kroku, kdy se již vzorek dělil podél osy rotace na dvě stejné části. Tento krok se prováděl na přesné metalografické pile BRILLANT 220. Řezná rychlost činila 1800 otáček/min a posuv kotouče se rovnal rychlosti 0,25 mm/s. Při procesu docházelo opět ke chlazení materiálu.



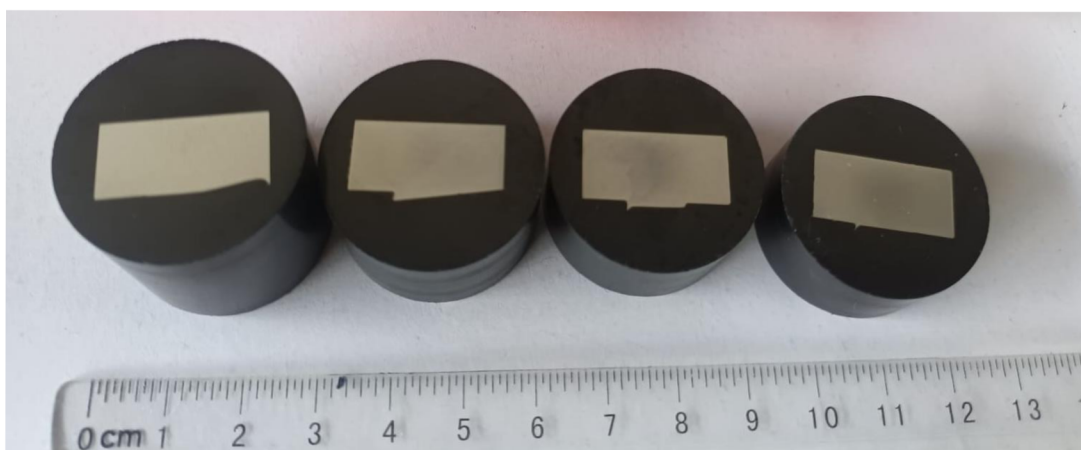
Obrázek 48: Přesná pila BRILLANT 220 od firmy ATM

Odříznutá část vzorku se následně položila řezanou plochou na dno zásobníku modulárního metalografického lisu OPAL X-Press. Do zásobníku se nasypala vodivá pryskyřice pro dosažení dobré viditelnosti vzorku. Zde se pryskyřice nejprve zapékala po dobu 5 minut a 30 vteřin při teplotě 180 °C. Po dokončení spékání se pryskyřice chladila po dobu 4 minut. Během celého procesu vyvolával lis tlak na pryskyřici o hodnotě 25 MPa. Výsledkem se stal pryskyřicový váleček se zakomponovaným zkušebním vzorkem.



Obrázek 49: Modulární metalografický lis OPAL X-Press

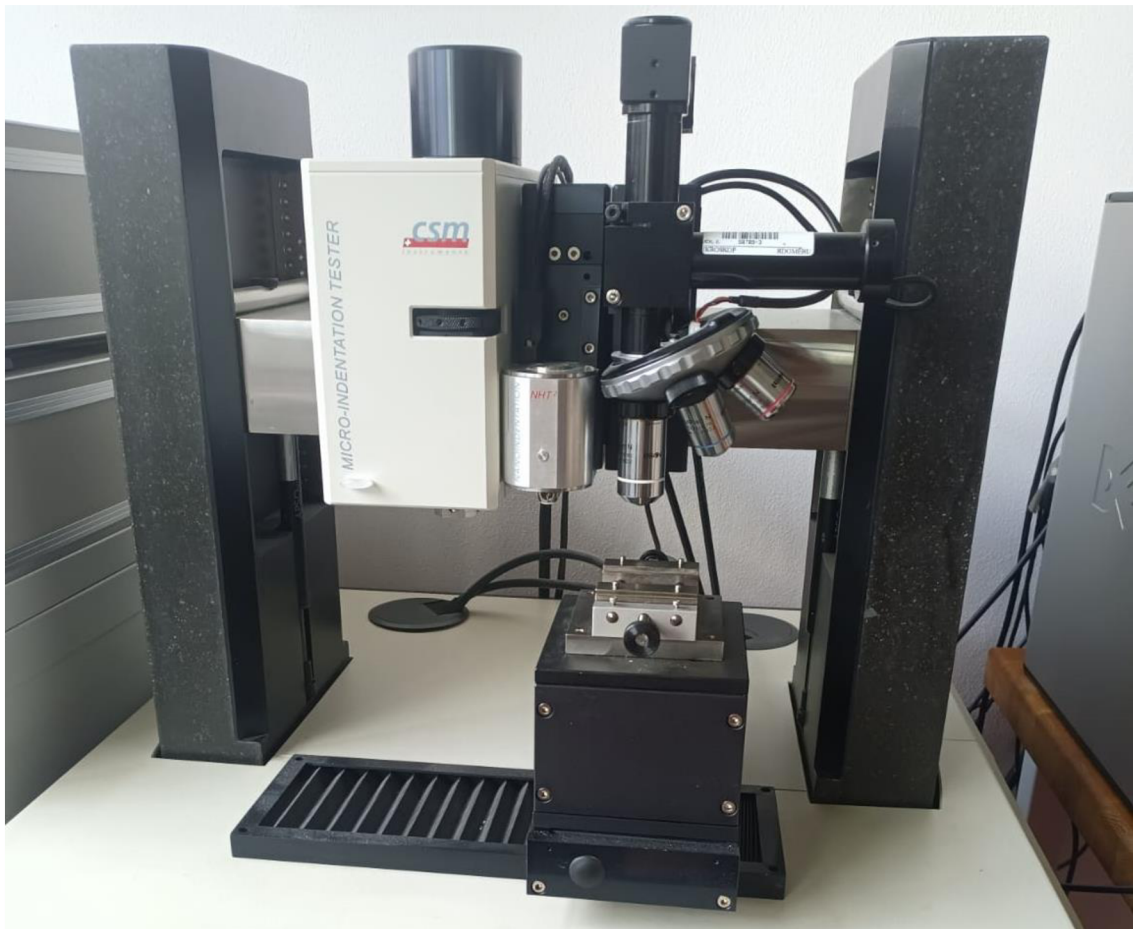
Poslední fáze příprav vzorků metalografického řezu sestávala z vytvoření metalografického výbrusu. Broušení a leštění bylo uskutečněno opět na brusce a leštičce SAPHIR 550. Pro fázi broušení byl použit brusný kotouč o zrnitosti 500. Následné leštění pak probíhalo při užití kotouče o zrnitosti 4000 a 9 μm .



Obrázek 50: Zkušební vzorky procesu nanoindentace

6.3.2 Nanoindentace

Nanoindentace je dnes jedním z nejmodernějších způsobů měření mechanických vlastností materiálu v měřítku jednotek nano. Pomocí této techniky lze měřit modul pružnosti, mez kluzu či tvrdost. Pro měření se využívá takzvaného nanoindentoru, jenž představuje malý diamantový hrot. Zatěžovací síla a hloubka vtisku se pohybuje zpravidla řádech mikrometrů až nanometrů.⁵³ Důvodem aplikace nanoindentace byl zájem o prozkoumání hloubky zpevněné vrstvy. Jako měřící přístroj pro měření byl použit Micro-indentation tester.



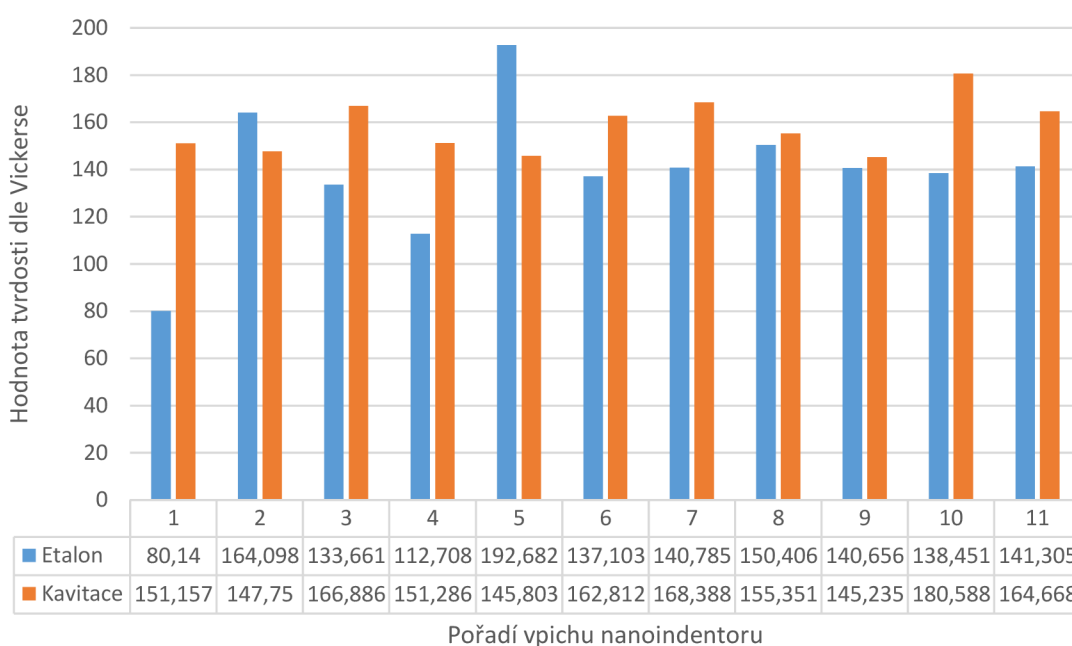
Obrázek 51: Micro-indentation tester od firmy CSM Instruments

V rámci měření nanoindentace bylo provedeno jedenáct vpichů nanoindentoru pro všechny vzorky metalografického řezu. Přičemž pole vpichů mělo počátek ve vzdálenosti 10 μm od modifikované hrany a vedlo podél osy rotace se stejným rozestupem 100 μm . Pro měření byla nastavena hloubka nanoindentace 0,4 μm .

⁵³ [31] *Nanoindentace a měření vlastností v malém objemu*. cvut.cz [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2024, s. 2–3.

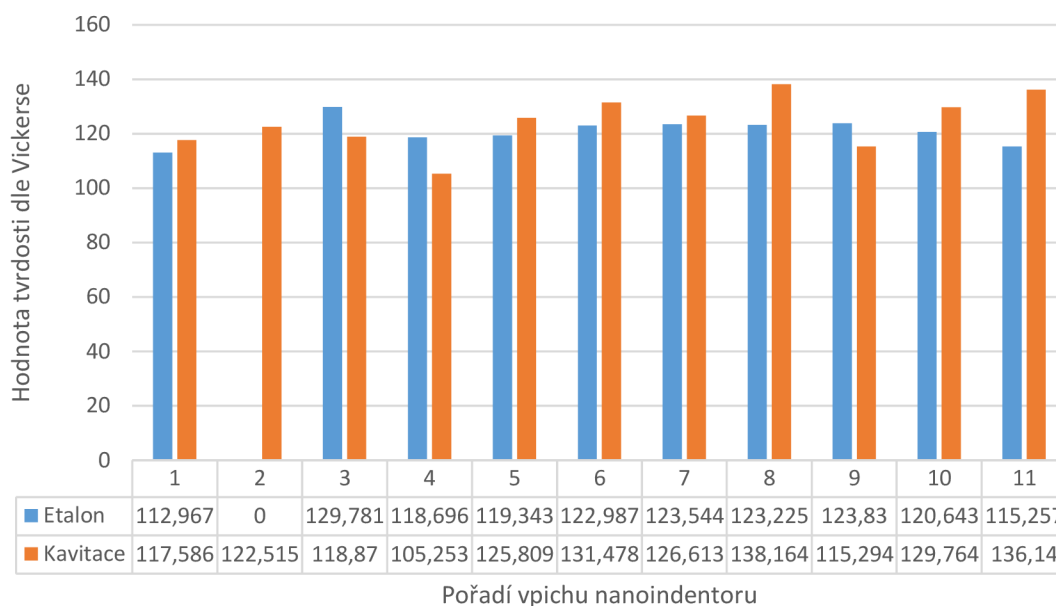
6.3.3 Výsledky a hodnocení nanoindentace

Proces měření byl realizován skrze program Indentation software, kde byly nastaveny dříve uvedené parametry. Při měření byla použita metoda Oliver & Pharr s indentačním hrotem typu Berkovich. Výstupem programu se stal protokol s naměřenými hodnotami nanotvrdosti a parametry vyvolaného zatížení nanoindentoru. Naměřené výsledky tvrdosti jsou udávány v jednotkách Vickerse a jsou zaznamenány a vyobrazeny na grafech níže. Sloupcové grafy znázorňují rozdíly hodnot parametru tvrdosti při stejných vzdálenostech vpichů od povrchu obou vzorků stejného materiálu. Nemodifikovaný vzorek je označený pod pojmem „Etalon“, naopak zpevněný vzorek je označen jako „Kavitace“.



Graf 9: Hodnoty tvrdosti dle Vickerse při nanoindentaci materiálu EN AW-2007

Z naměřených výsledků nanoindentace je zřejmé, že se tvrdost dosažená po aplikaci ultrazvukové kavitace projevuje ve více vrstvách zkušebních vzorků. V tomto případě lze vyvodit závěr, jenž naznačuje zpevnění obou materiálu až do hloubky 1010 μm (zhruba 1 mm). Zpevnění ve větší hloubce nelze rovněž vyloučit a bylo by pro další zkoumání vhodné provést test s více kroky. Výsledky měření nanoindentace materiálu EN AW-6082 potvrzují nízké hodnoty navýšení tvrdosti z kapitoly 6. 1. Pro tento materiál se v Grafu 10 vyskytuje chybně naměřená hodnota, jenž byla vyhodnocena softwarem a byla způsobena při měření, kdy vnikající indentoru nebyl schopen naměřit odpovídající tvrdost.



Graf 10: Hodnoty tvrdosti dle Vickerse při nanoindentaci materiálu EN AW-6082

Hodnoty tvrdosti vycházející z procesu nanoindentace nejsou na první pohled shodné s výsledky naměřené tvrdosti dle Vickerse v předchozí kapitole. To může být způsobeno mnoha různými faktory. V první řadě se jedná o rozdílné metody měření tvrdosti, při kterých se aplikují rozdílné postupy procesu a je rovněž použit i jiný typ indentoru (Vickers/Berkovich). Dále je vhodné zmínit vliv přepočtu naměřených hodnot. Měřicí software totiž udává naměřené hodnoty tvrdosti v GPa a v souvislosti s tím jsou zde prezentované hodnoty tvrdosti HV přepočítány pomocí algoritmů softwaru.

7 Diskuzní část

Pro splnění zadání diplomové práce byl realizován experiment zpevňování povrchu materiálu za využití metody ultrazvukového kavitačního zpevňování. Hodnocení dosažených výsledků bylo založeno na pozorování změn mechanických vlastností materiálu. Hlavním parametrem zájmu se stala tvrdost materiálu, jež byla klíčová pro posouzení účinnosti metody zpevňování. Za druhý důležitý parametr k pozorování lze považovat drsnost povrchu, jež se dle poznatků ze studií nemá v důsledku působení kavitace téměř zhoršovat při modifikaci měkkých kovů.

7.1 Shrnutí a interpretace výsledků

Tvrdost materiálů

Měření bylo prováděno zkouškou tvrdosti dle Vickerse na základě univerzálnosti použití této metody. Ze získaných výsledků lze dozajista prokázat vliv ultrazvukové kavitační eroze na zvýšení parametru tvrdosti. V případě materiálu EN AW-2007 se jedná o nárůst tvrdosti přibližně 20 %. Porovnáme-li tyto naměřené výsledky s hodnotami tvrdosti uvedenými v přehledu naměřených tvrdostí pro hliníkové materiály zpevňované ultrazvukovou kavitací (kapitola 4.4, tabulka 6), lze konstatovat jistou podobnost v míře nárůstu tvrdosti. Konkrétně pak s výsledky práce Janky Stykové, která dosáhla 15 % zvýšení tvrdosti u materiálu EN AW-2030.⁵⁴ Naopak u materiálu EN AW-6082 se potýkáme s pouhým 6 % nárůstem tvrdosti. Z naměřených hodnot materiálu EN AW-6082 můžeme dále usoudit, že se materiál zpevňuje ve velmi krátkém časovém úseku – v řádu desítek vteřin, a tudíž vzniká prostor pro další zkoumání potenciálního nárůstu tvrdosti. V opačném případě je žádoucí uvažovat i nad vhodností tohoto materiálu pro zpevňování ultrazvukovou kavitací. Pro oba materiály byla dále zkoumána hloubka zpevněné vrstvy pomocí nanoindentace. Zde se prokázalo, že se aplikací ultrazvukové kavitace materiál zpevňuje nejméně do hloubky 1010 μm .

Drsnost povrchu

Pro hodnocení změn drsnosti povrchu byly vybrány parametry Ra – průměrná drsnost povrchu a Rz – hloubka největší prohlubně. Materiál EN AW-2007 dosáhl při největším zpevnění velmi dobré drsnosti Ra = 1,6 μm . Při porovnání této hodnoty s tabulkovými hodnotami se pohybujeme na hranici mezi jakostí povrchu obráběného na čisto a broušeného povrchu. Naměřené výsledky materiálu EN AW-6082 nabývají mnohem nižších hodnot drsnosti – Ra = 0,5 μm , přičemž tato jakost odpovídá kvalitě broušeného povrchu. Nízká drsnost je zde jistě zapříčiněna

⁵⁴ [24] STYKOVÁ, J. *Využití ultrazvukové kavitace při zpevňování materiálů kovových povrchů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. Diplomové práce. Vedoucí práce: Miloš Müller, s. 60.

krátkou dobou (desítky vteřin) působení kavitační eroze na povrch zkušební vzorku. Dosažené poznatky při zkoumání drsnosti povrchu obou materiálů potvrzují předpoklad, jenž se uvádí v rešeršní části studií – drsnost povrchu měkkých kovů se nemění. Je však vždy vhodné vzít v úvahu počáteční drsnost povrchu. Pro běžně obráběné hliníkové materiály bez aplikace dokončovacích operací lze na základě zde uvedených dat prohlásit, že se drsnost povrchu vlivem kavitace nezmění.

7.2 Limity výzkumu

Tato část kapitoly je věnována souboru poznatků, které limitovali či dokonce mohli mít vliv na průběh experimentu.

Erozní test

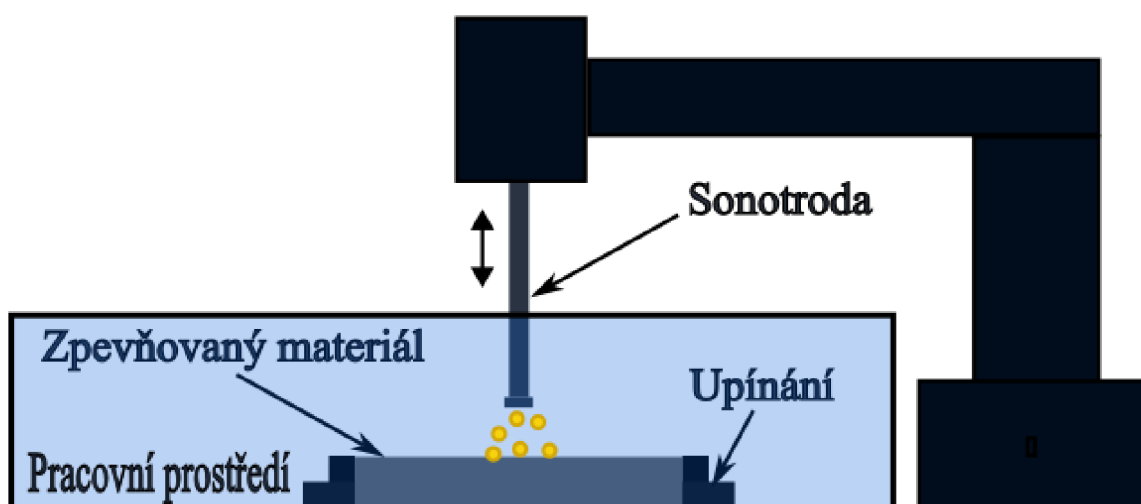
Za největší prokázanou limitaci výsledků diplomové práce lze označit vyhodnocení erozního testu. U obou materiálů byla vyhodnocena délka inkubační fáze chybně. V případě materiálu EN AW-2007 se chyba projevuje až ke konci mapování průběhu inkubační fáze a nedochází tak k nedostatku získaných dat při následném hodnocení měření tvrdosti. Pro druhý zkoumaný materiál EN AW-6082 se rozsah inkubační fáze zmapoval hůře, kdy se nepředpokládala již zmiňovaná krátká délka rozsahu v řádu desítek vteřin. V obou případech se při zpětném hodnocení erozního testu potýkáme stále s obtížemi prokázání viditelné přítomnosti skutečného konce inkubační fáze. Možnost, jak tomuto omezení předejít by mohlo poskytnout jiné měřící zařízení s větším měřicím rozsahem. S touto změnou lze předpokládat, že by poté byl úbytek materiálu během erozního testu prokazatelnější. Dále by bylo vhodné provést počáteční měření erozního testu s menšími rozestupy, aby se vyvarovalo překročení inkubační fáze již od počátku.

Další limitní faktory

Mezi faktory, jež mají vliv na průběh experimentu řadíme například mezeru mezi sonotrodou a zpevňovanou plochou. Dopad této mezery na výslednou modifikaci povrchu může být různý. V tomto případě však bylo docíleno zpevnění při mezeře 0,5 mm. Další faktor můžeme shledat při vyhodnocování naměřených hodnot tvrdosti. Zde se potýkáme s obtížným posuzováním rozmístění hranic úhlopříček měření tvrdosti dle Vickerse. Poslední faktor, jenž stojí za zmínku, je nízký počet vzorků experimentu. Při vyšším počtu vzorků by bylo možné docílit detailnějšího vykreslení průběhu nárůstu tvrdosti a zároveň by byla zjištěna bližší hodnota maximálního zpevnění.

8 Ideový návrh konfigurace pro využití kavitačního zpevňování na reálné strojní součásti

Na základě požadavků zadání je tato kapitola věnována návrhu konfigurace pro aplikaci ultrazvukového kavitačního zpevňování. Vyjdeme-li z poznatků získaných při zpracování rešeršní části, lze předpokládat podobu konfigurace dle obrázku níže. Na schématu návrhu je k vidění modifikovaný materiál, jenž je pomocí svěrného spoje upnut na dno pracovní vany. Vana je naplněna kapalinou vhodnou pro proces ultrazvukové kavitace (destilovaná voda). Nad modifikovaným materiálem se nachází v přednastavené odstupové vzdálenosti sonotroda (vibrační trn či hrot). Sonotroda se v rámci procesu ultrazvukové kavitace pohybuje ve svislém směru a vyvolává kavitační erozi. Pohyb sonotrody by mohl být zprostředkován skrze CNC zařízení, která by zároveň poskytovalo řízení procesu. Součástí konfigurace by měl být také chladicí systém (dno vany), jenž by snížil narůstající teplotu, k níž dochází při ultrazvukové kavitaci.



Obrázek 52: Schéma návrhu konfigurace ultrazvukového kavitačního zpevňování

Konfigurace v tomto provedení s sebou může přinášet následující výhody:

- Snadné řízení procesu CNC, jednoduchá manipulace s modifikovaným materiálem
- Nízká cena technologie a nízké náklady na provoz procesu
- Nízký nárůst drsnosti povrchu (vhodné pro měkké materiály)
- Technologie šetrná k životnímu prostředí, recyklovatelnost

9 Závěr

Diplomová práce se zabývá tematikou kavitačního jevu a jeho využití pro účely zpevňování hliníkových materiálů. Úvodní část práce seznamuje čtenáře s principem kavitačního jevu, způsoby generování a aplikací ve prospěch člověka. Následující rešeršní část se zabývá metodami zpevňování povrchu. V kapitolách jsou detailně popsány konvenční metody kuličkování spolu s metodami kavitačního zpevňování. Čtenář si tak může udělat představu o současných poznatcích z oblasti aplikace obou metod a porovnat je mezi sebou. Další část práce se již věnuje přípravám experimentu ultrazvukového kavitačního zpevňování. Nejprve je popsán výběr materiálů a geometrie zkušebních vzorků. Následně jsou podrobně zdokumentovány postupy přípravy vzorků od obrábění přes broušení až po leštění. Experimentální část diplomové práce je poté rozdělena do dvou fází. V první fázi jsou vzorky obou materiálů vystaveny eroznímu testu. Výstupem testu jsou časové údaje, jež slouží pro zjištění rozsahu inkubační fáze materiálů. Ve druhé fázi experimentu jsou na základě těchto získaných dat navrženy časové intervaly zpevňování zkušebních vzorků a provedena aplikace ultrazvukové kavitace. Po realizaci experimentu následuje kapitola, jež pojednává o vyhodnocení naměřených dat. Pro posouzení účinnosti metody ultrazvukové kavitace byly vybrány k pozorování parametry – tvrdost materiálu dle Vickerse, průměrná drsnost povrchu a hloubka zpevněné vrstvy. Celý experiment shrnuje a uzavírá diskuze pojednávající o poznatcích získaných z hodnocení výsledků experimentu. Nakonec je v diplomové práci uveden také ideový návrh konfigurace pro využití kavitačního zpevňování na reálné strojní součásti.

Z naměřených výsledků lze vyvodit následující závěry. Aplikací metody ultrazvukové kavitace dochází ke zpevňování obou zkoumaných materiálů, konkrétně EN AW-2007 a EN AW-6082. Zkouška tvrdosti dle Vickerse prokázala nárůst parametru tvrdosti, avšak pouze v menším měřítku, přičemž v případě materiálu EN AW-6082 se jednalo o navýšení tvrdosti v řádu jednotek procent. Měření nanoindentace s sebou přináší kladné výsledky, z nichž můžeme usoudit minimální hloubku zpevněné vrstvy vyšší než 1 mm. Za nespornou výhodu metody kavitačního zpevňování můžeme označit skutečnost, že v případě měkkých materiálů nedochází ke zhoršení drsnosti povrchu vlivem působení eroze.

Na základě poznatků získaných během zpracování této diplomové práce, vyplívají níže uvedená doporučení pro navazující výzkum v této oblasti:

- Vyšší počet vzorků pro dosažení detailnějšího zmapování inkubační fáze erozní křivky.
- Prozkoumání vlivu odstupové vzdálenosti mezi vzorkem a sonotrodou na výsledné zpevnění.
- Porovnání aplikace různých metod kavitačního zpevnění na stejný materiál vzorku.
- Vytipování dalších vhodných materiálů pro aplikaci kavitačního zpevnění.

Seznam použité literatury

- [1] HUJER, J. *Studie kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů: Study of the cavitation bubble collapse and the cavitation bubble structures collapse close to surfaces*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2020.
- [2] NOSKIEVIČ, J. *Kavitace*. Praha: Academia, 1969. s. 9-19. ISBN 21-047-69, 509-21-875.
- [3] MELICHAR, J. *Úvod do čerpací techniky*. Praha: České vysoké učení technické, 2012. s. 16 - 23. ISBN 978-80-01-05056-9.
- [4] *Kavitace*. Wikipedia.org [online]. [cit. 2023-3-22]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kavitace>
- [5] *Litotrypse extrakorporální rázovou vlnou*. Wikiskripta.eu [online]. Brno: MEFANET, 2023 [cit. 2023-3-22]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Kavitace>.
- [6] *Udržujte své šperky v dokonalé čistotě*. Sperky.cz [online]. Chrudim: VIVANTIS, 2023 [cit. 2023-3-28]. Dostupné z: <https://www.sperky.cz/magazin/udrzujte-sve-sperky-v-dokonale-cistote>.
- [7] *Zařízení pro čištění kapalin a způsob čištění kapalin s využitím tohoto zařízení*. VUT.cz [online]. Brno: VUT, 2023 [cit. 2023-3-28]. Dostupné z: https://www.vut.cz/vav/vysledky/detail/165549?aid_redir=1#vysledek-165549
- [8] HUJER, J. *Mechanismy kolapsů kavitačních bublin v blízkosti pevných povrchů: Mechanisms of cavitation bubble collapses near the solid boundaries*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013. Diplomové práce. Vedoucí práce Miloš Müller.
- [9] BRDIČKA, M., SAMEK, L. a TARABA, O. *Kavitace: diagnostika a technické využití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
- [10] HLUCHÝ, M. a KOLOUCH J. *Strojírenská technologie 1: Náuka o materiálu*. Praha: Scientia, spol., 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [11] HLUCHÝ, M., MODRÁČEK O. a PAŇÁK R. *Strojírenská technologie 1: Metalografie a tepelné zpracování*. Praha: Scientia, spol., 2002. ISBN 80-7183-265-0.
- [12] John, M., Kalvala, P.R., Misra, M., Menezes, P.L. *Peening Techniques for Surface Modification: Processes, Properties, and Applications*. Materials 2021, 14, 3841. [cit. 2023-4-3]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma14143841>
- [13] Lin, Q., Liu, H., Zhu, C., Chen, D., Zhou, S. *Effects of different shot peening parameters on residual stress, surface roughness and cell size*. Surf. Coat. Technol. 2020, 398, 126054. [cit. 2023-4-5]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126054>
- [14] Wang X., Wang ,Z., Wu, G., Gan, J., Yang, Y., Huang, H., He, J., Zhong, H. *Combining the finite element method and response surface methodology for optimization of shot peening parameters*. International Journal of Fatigue, Volume 129, 2019, 105231, ISSN 0142-1123. [cit. 2023-4-5]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105231>.

- [15] Malaki, M., Ding, H., *A review of ultrasonic peening treatment*. Materials & Design, Volume 87, 2015, Pages 1072-1086, ISSN 0264-1275. [cit. 2023-4-7].
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.102>.
- [16] STATNIKOV, Efim Sh., KOROLKOV, O. V. a VITYAZEV V. N. *Physics and mechanism of ultrasonic impact*. Ultrasonics [online]. 2006, 44, e533-e538 [cit. 2023-04-10]. ISSN 0041624X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ultras.2006.05.119
- [17] *Metal Fatigue Improvement with Stress Waves*. <https://www.lsptechnologies.com> [online]. Dublin: LSP Technologies. 2023 [cit. 2023-4-10]. Dostupné z: <https://www.lsptechnologies.com/resources/metal-fatigue-improvement-with-stress-waves/>
- [18] Soyama, H., Korsunsky, A. M. *A critical comparative review of cavitation peening and other surface peening methods*. Journal of Materials Processing Technology, Volume 305, 2022, 117586, ISSN 0924-0136. [cit. 2023-4-15].
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117586>.
- [19] Soyama H. *Cavitating Jet: A Review*. Applied Sciences. 2020; 10(20):7280. [cit. 2024-2-18]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app10207280>.
- [20] T. Momma, A. Lichtarowicz, *A study of pressures and erosion produced by collapsing cavitation*, Wear, Volumes 186–187, Part 2, 1995, Pages 425-436, ISSN 0043-1648, [cit. 2024-2-24]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)07144-X](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)07144-X).
- [21] Jiayang Gu, Chunhui Luo, Zhubi Lu, Pingchuan Ma, Xinchao Xu, Xudong Ren, *Bubble dynamic evolution, material strengthening and chemical effect induced by laser cavitation peening*, Ultrasonics Sonochemistry, Volume 72, 2021, 105441, ISSN 1350-4177 [cit. 2024-2-26]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105441>.
- [22] F. Bai, Y. Long, K.-A. Saalbach, J. Twiefel, *Theoretical and experimental investigations of ultrasonic sound fields in thin bubbly liquid layers for ultrasonic cavitation peening*, Ultrasonics, Volume 93, 2019, Pages 130-138, ISSN 0041-624X, [cit. 2024-3-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.11.010>.
- [23] Jung, S., Prabhu, M. & Lee, H. *Peening narrow nozzles of reactor pressure vessels using ultrasonic cavitation*. Journal of Mechanical Science and Technology 31, 2017. 5279–5283. [cit. 2024-3-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12206-017-1021-4>.
- [24] STYKOVÁ, J. *Využití ultrazvukové kavitace při zpevňování materiálů kovových povrchů*. [cit. 2024-4-1]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. Diplomové práce. Vedoucí práce Miloš Müller.
- [25] *Alloy EN AW-2007*. Leichtmetall.eu [online]. Hannover: LEICHTMETALL, 2024 [cit. 2024-4-5]. Dostupné z: <https://www.leichtmetall.eu/aluminum-alloys/alloy-en-aw-2007/>
- [26] *Alloy EN AW-6082*. Leichtmetall.eu [online]. Hannover: LEICHTMETALL, 2024. [cit. 2024-4-5]. Dostupné z: <https://www.leichtmetall.eu/aluminum-alloys/alloy-en-aw-6082/>
- [27] *EN AW-6082*. Proal.cz [online]. Ostrava: NPS Proal, 2024. [cit. 2024-4-5]. Dostupné z: <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-6082/>
- [28] *Parametry drsnosti Mahr*. klz.inshop.cz [online]. Zlín: Kalibrační laboratoř Zindler, 2024. [cit. 2024-5-5]. Dostupné z: <https://www.klz.inshop.cz/inshop/files/6910230/Parametry%20drsnosti%20Mahr-NEW.pdf>

[29] *Drsnosti povrchů a jejich značení a převodník*. Mikon-tools.cz [online]. Brno: MIKON TOOLS s.r.o., 2024. [cit. 2024-5-5]. Dostupné z: <https://www.mikon-tools.cz/drsnosti-povrchu-a-jejich-znaceni-a-prevodnik/>

[30] *Dělení materiálu*. Metalco.cz [online]. Roztoky u Prahy: Metalco Testing s.r.o, 2024. [cit. 2024-5-10]. Dostupné z: <https://www.metalco.cz/deleni-materialu/>

[31] *Nanoindentace a měření vlastností v malém objemu*. cvut.cz [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2024. [cit. 2024-5-10]. Dostupné z: <https://www.metalco.cz/deleni-materialu/>

[32] ŚWIETLICKI, Aleksander, Mirosław SZALA a Mariusz WALCZAK. *Effects of Shot Peening and Cavitation Peening on Properties of Surface Layer of Metallic Materials—A Short Review*. Materials [online]. 2022. [cit. 2022-11-08]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma15072476