

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Integrita povrchu po dokončovacích zpevňovacích operacích

Vysoká škola: ČVUT v Praze
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Fakulta: strojní
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro **Bc. Tomáše Vondráka**

obor **Výrobní a materiálové inženýrství**

Název: **Integrita povrchu po dokončovacích zpevňovacích operacích**

Název anglicky: **Surface integrity after surface strengthening technologies**

Zásady pro vypracování:

1. Metody zpevňování povrchu.
2. Hodnocení kvality povrchové vrstvy.
3. Provedení experimentálního měření.
4. Vyhodnocení přínosu jednotlivých technologií.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma „*Integrita povrchu po dokončovacích zpevňovacích operacích*“ jsem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Pitrmuce. Veškerou použitou literaturu a další prameny jsem řádně označil a uvedl v seznamu literatury.

V Praze dne 10. června 2016

.....
Bc. Tomáš Vondrák

ANOTAČNÍ KARTA

Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12 134 Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí ústavu:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Téma diplomové práce:	Integrita povrchu po dokončovacích zpevňovacích operacích
Akademický rok:	2015 / 2016
Studijní obor:	Výrobní a materiálové inženýrství
Autor:	Bc. Tomáš Vondrák
Vedoucí práce:	Ing. Zdeněk Pitrmuc
Oponent:	doc. Ing. Jindřich Kafka, CSc.
Klíčová slova:	Integrita povrchu, Shot peening, Laser peening, lopatky, Ti-6Al-4V
Abstrakt:	Diplomová práce je zaměřena komplexně na kvalitu povrchové vrstvy. Detailněji jsou zpracována drsnost povrchu, zbytková napětí, mikrotvrдость a metalografie. Dále jsou zpracovány zpevňovací technologie Shot peening a Laser peening a dosavadní poznatky o jejich vlivu a možnosti aplikace na titanové slitiny, zejména na nejrozšířenější slitinu Ti-6Al-4V. Předmětem experimentální části je analýza kvality povrchové vrstvy lopatkové součásti axiálního kompresoru turbovrtulového motoru bez aplikace zpevňovací technologie. V dalším kroku je zkoumána kvalita povrchové vrstvy destiček s aplikací zpevňovací technologie Shot peening nebo Laser peening.
<u>Rozsah práce</u>	
Počet stran:	103
Počet obrázků:	95
Počet tabulek:	9
Počet příloh:	4

ANNOTATION CARD

University: Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department: 12 134 Department of machining, process planning and metrology
Head of the department: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Diploma thesis topic: Surface integrity after strengthening technologies
Academic year: 2015 / 2016
Branch of study: Production and Materials Engineering
Author: Bc. Tomáš Vondrák
Supervisor: Ing. Zdeněk Pitrmuc
Opponent: doc. Ing. Jindřich Kafka, CSc.

Keywords: Surface integrity, Shot peening, Laser peening, blades, Ti-6Al-4V

Abstract: The main aim of this Master thesis is to provide a complex perspective on quality of the surface layer. The surface roughness, residual stresses, microhardness and metallography are analyzed into detail. Furthermore the strengthening technology Shot peening and Laser peening within their effects and possible applications for titanium alloys, particularly the most common alloy Ti-6Al-4V, are described. The experimental part of the thesis focuses on analysis of quality of the surface layer of vane axial compressor component turboprop engine without the application of reinforcing technology. In next step quality of the surface layer plate with application of the strengthening technology Shot peening and Laser peening is explored.

Scope of work

Number of pages: 103
Number of pictures: 95
Number of tables: 9
Number of enclosures: 4

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňku Pitrmucovi za cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc., že mě k tomuto tématu přivedl a Ing. Janu Urbanovi za cenné rady při měření drsnosti povrchu. Můj vděk patří také rodině, jež mě po celou dobu studia podporovala všemi dostupnými prostředky.

Seznam zkratek, značek a symbolů

Symbol	Jednotka	Veličina
[Al] _{eq}	[%]	Hliníkový ekvivalent
a	[mm]	Hloubka vniknutí při zatížení silou F ₀
A	[%]	Tažnost
Ag	[-]	Stříbro
Al	[-]	Hliník
B	[mm]	Délka plochy úhelníku na výbrusu
bcc	[-]	Kubická prostorově středěná mřížka
Blisk 1°	[-]	Lopatková součást axiálního kompresoru turbovrtulového motoru
C	[-]	Uhlík
Cr	[-]	Chrom
ČVUT	[-]	České vysoké učení technické
d	[mm]	Střední průměr vtisku
D	[mm]	Průměr kuličky
d	[mm]	Aritmetický průměr délky vtisku
d ₁ ,d ₂	[mm]	Délka úhlopříček vtisku
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu-tlaku
E ₁	[N]	Hloubka vniknutí při zatížení silou F
F	[N]	Zkušební zatížení
F ₀	[N]	Předběžné zkušební zatížení
F1	[-]	Formule 1
F ₁	[N]	Přídavné zatížení
fcc	[-]	Kubická plošně středěná mřížka
Fe	[-]	Železo
FeTiO ₃	[-]	Ilmenit
FS	[-]	Fakulta strojní
h	[mm]	Naměřená výška
H	[mm]	Výchozí výška nebo hloubka měření
H	[-]	Vodík

HBW	[-]	Tvrдост dle Brinella
hcp	[-]	Hexagonální mřížka
HK	[-]	Tvrдост dle Knoopa
HRA	[-]	Tvrдост dle Rockwella (stupnice A)
HRB	[-]	Tvrдост dle Rockwella (stupnice B)
HRC	[-]	Tvrдост dle Rockwella (stupnice C)
HV	[-]	Tvrдост dle Vickerse
l	[mm]	Délka vtisku
ln	[mm]	Vyhodnocovaná délka
LSP	[-]	Laser peening
Max	[-]	Maximální hodnota z výběru
M _f	[°C]	Teplota konce vzniku martenzitu
Min	[-]	Minimální hodnota z výběru
Mn	[-]	Mangan
Mo	[-]	Molybden
M _s	[°C]	Teplota počátku vzniku martenzitu
N	[-]	Dusík
Ni	[-]	Nikl
O	[-]	Kyslík
Ra	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
Rc	[μm]	Průměrná výška prvků profilu
Rku	[-]	Špičatost posuzovaného profilu
R _m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
Rmax	[μm]	Největší výška nerovností
Rmr	[%]	Materiálový poměr profilu
Rp	[μm]	Největší výška výstupku profilu
R _{p0,2}	[MPa]	Mez kluzu
Rq	[μm]	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu
Rsk	[-]	Šikmost posuzovaného profilu
Rsm	[μm]	Průměrná šířka prvků profilu
Rt	[μm]	Celková výška profilu

Rv	[μm]	Největší hloubka prohlubně profilu
Rz	[μm]	Největší výška profilu
Si	[-]	Křemík
Sn	[-]	Cín
SP	[-]	Shot peening
Ta	[-]	Tantal
Ti	[-]	Titan
TiO ₂	[-]	Rutil
v	[%]	Variační koeficient
V	[-]	Vanad
X	[mm]	Hloubka měření
x	[mm]	Výška podložky
Xs	[μm]	Šířka prvku profilu
Y	[mm]	Délka plochy vzorku na výbrusu
y	[mm]	Délka podložení vzorku
ZN	[N.mm ⁻²]	Zbytková napětí
Zp	[μm]	Výška výstupku profilu
Zr	[-]	Zirkonium
Zt	[μm]	Výška prvku profilu
Zv	[μm]	Hloubka prohlubně profilu
α	[-]	Alfa
β	[-]	Beta
γ	[-]	Gama
σ	[-]	Výběrová směrodatná odchylka

Obsah

1	ÚVOD	13
2	REŠERŠNÍ ČÁST	14
2.1	TITAN.....	14
2.1.1	<i>Titan z hlediska metalurgie</i>	<i>15</i>
2.1.2	<i>Rozdělení legujících prvků</i>	<i>16</i>
2.1.3	<i>Slitiny titanu</i>	<i>17</i>
2.2	Ti-6Al-4V.....	19
2.2.1	<i>Mikrostruktura Ti-6Al-4V</i>	<i>20</i>
2.3	SHOT PEENING (ŘÍZENÉ KULIČKOVÁNÍ)	22
2.3.1	<i>Pracovní parametry.....</i>	<i>23</i>
2.3.2	<i>Rozložení napětí po SP</i>	<i>23</i>
2.3.3	<i>Hlavní přínosy řízeném kuličkování</i>	<i>24</i>
2.3.4	<i>Nástroj (tryskáci prostředek).....</i>	<i>24</i>
2.3.5	<i>Stroje</i>	<i>25</i>
2.3.6	<i>Nejčastější použití</i>	<i>27</i>
2.3.7	<i>Nalezené výsledky zbytkových napětí po aplikaci zpevňovací technologie SP</i>	<i>28</i>
2.4	LASER PEENING	28
2.4.1	<i>Princip metody</i>	<i>29</i>
2.4.2	<i>Charakteristika běžně používaných laserů pro LSP</i>	<i>29</i>
2.4.3	<i>Nd:YAG laser</i>	<i>30</i>
2.4.4	<i>Zařízení pro Laser peening</i>	<i>30</i>
2.4.5	<i>Děje při LSP.....</i>	<i>30</i>
2.4.6	<i>Hlavní přínosy.....</i>	<i>31</i>
2.4.7	<i>Využitím technologie LSP lze očekávat.....</i>	<i>31</i>
2.4.8	<i>Nalezené výsledky měření zbytkových pnutí titanových lopatek po aplikaci LSP.....</i>	<i>32</i>
2.5	DRSNOST POVRCHU	33
2.5.1	<i>Profil povrchu</i>	<i>34</i>
2.5.2	<i>Definice parametrů profilu drsnosti povrchu</i>	<i>35</i>
2.5.3	<i>Metody měření drsnosti povrchu</i>	<i>41</i>
2.6	ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ.....	43
2.6.1	<i>Příčiny vzniku vnitřních napětí lze rozdělit do několika skupin.....</i>	<i>44</i>
2.6.2	<i>Přehled experimentálních metod měření zbytkové napjatosti.....</i>	<i>44</i>
2.6.3	<i>Elektrolytické odleptávání.....</i>	<i>45</i>
2.7	TVRDOST	46
2.7.1	<i>Rozdělení zkoušek tvrdosti</i>	<i>46</i>

2.7.2	<i>Staticko-plastické zkoušky tvrdosti (vnikající)</i>	47
2.7.3	<i>Zkoušky mikrotvrdosti</i>	52
2.7.4	<i>Dynamicko – plastické zkoušky tvrdosti</i>	53
2.7.5	<i>Dynamicko – elastické zkoušky tvrdosti</i>	54
2.7.6	<i>Vrypové zkoušky tvrdosti</i>	55
2.8	METALOGRAFIE	55
2.8.1	<i>Používané definice</i>	56
2.8.2	<i>Postup přípravy metalografických výbrusů</i>	56
2.8.3	<i>Hodnocení metalografických vzorků</i>	57
3	EXPERIMENT	58
3.1	ÚVOD	58
3.2	VZORKY	58
3.2.1	<i>Parametry zpevňovacích technologií</i>	59
3.3	DRSNOST A PROFIL POVRCHU	60
3.3.1	<i>Měřené vzorky</i>	60
3.3.2	<i>Použité zařízení</i>	60
3.3.3	<i>Měřené parametry</i>	61
3.3.4	<i>Naměřené hodnoty</i>	61
3.3.5	<i>Zhodnocení výsledků</i>	62
3.4	ZBYTKOVÉ PNUTÍ	64
3.4.1	<i>Příprava vzorků</i>	64
3.4.2	<i>Měřené vzorky</i>	64
3.4.3	<i>Použité zařízení a přípravky</i>	64
3.4.4	<i>Podstata metody</i>	64
3.4.5	<i>Postup měření</i>	65
3.4.6	<i>Naměřené hodnoty</i>	66
3.4.7	<i>Zhodnocení výsledků</i>	72
3.5	PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO MIKROTVRDOST A METALOGRAFII - ŘEZÁNÍ	73
3.5.1	<i>Použité zařízení</i>	73
3.6	PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO MIKROTVRDOST A METALOGRAFII - VÝROBA METALOGRAFICKÝCH VZORKŮ	73
3.6.1	<i>Zalítí a lisování za tepla</i>	73
3.6.2	<i>Zalévání za studena</i>	75
3.7	BROUŠENÍ	77
3.7.1	<i>Použité zařízení a přípravky</i>	77
3.7.2	<i>Postup broušení metalografických vzorků</i>	78
3.8	MIKROTVRDOST	79
3.8.1	<i>Měřené vzorky</i>	80

3.8.2	<i>Použité zařízení a přípravky</i>	80
3.8.3	<i>Postup měření</i>	80
3.8.4	<i>Nastavené parametry měření</i>	80
3.8.5	<i>Měření mikrotvrdosti lopatek</i>	81
3.8.6	<i>Měření mikrotvrdosti destiček</i>	81
3.8.7	<i>Naměřené hodnoty mikrotvrdosti</i>	82
3.9	METALOGRAFIE	86
3.9.1	<i>Měřené vzorky</i>	86
3.9.2	<i>Použité zařízení a přípravky</i>	87
3.9.3	<i>Příprava leptadel</i>	87
3.9.4	<i>Postup měření</i>	87
3.9.5	<i>Výsledky měření</i>	88
4	ZÁVĚR	92
5	ZDROJE	94
6	SEZNAM OBRÁZKŮ	99
7	SEZNAM TABULEK	103

1 Úvod

Kvalita povrchové vrstvy představuje jednu z nejvýznamnějších problematik v současné strojírenské výrobě. Kvalita povrchové vrstvy po aplikaci zpevňovací technologie, je velice aktuální téma, které bylo v minulosti řešeno a bude nadále. Jelikož nejčastěji se tato technologie aplikuje na součásti v letectví. Kde je velký požadavek na zvyšování spolehlivosti a živostnosti u dynamicky namáhaných součástí a podle informací ze stránek Svazu českého leteckého průmyslu by chtěla firma GE Aviation, v dohledné době investovat do centra vývoje a výroby leteckých motorů až 10 miliard.

V úvodu se diplomová práce ve své teoretické části zabývá titanem a jeho slitinami. Podrobněji je zpracována titanová slitina Ti-6Al-4V. V další části jsou zpracovány dvě technologie zpevnění povrchu Shot peening a Laser peening. V závěrečné části jsou zpracována témata hodnotící integritu povrchu, kde je tedy zpracována drsnost povrchu, zbytková napětí, tvrdost a příprava metalografických vzorků. U drsnosti povrchu jsou zpracovány parametry vyhodnocení a metody měření drsnosti. V kapitole zbytkových napětí jsou shrnuty příčiny vzniku a metody měření zbytkových napětí. V části zabývající se tvrdostí jsou zpracovány zkoušky tvrdosti a mikrotvrdosti.

Experimentální část se zabývá integritou povrchu lopatkové součásti axiálního kompresoru turbovrtulového motoru a destičkami s aplikací zpevňovací technologie Shot peening nebo Laser peening. Zkoumané součásti jsou z titanové slitiny Ti-6Al-4V.

Tuto diplomovou práci jsem si zvolil jednak na základě zkušenosti z předmětu Projekt III., který se vyučuje v zimním semestru druhého ročníku, kde jsem řešil obdobné téma a jednak díky tomu, že letectví je mým koníčkem a chtěl bych v budoucnu pracovat v leteckém průmyslu.

2 Rešeršní část

2.1 Titan

Titan a jeho slitiny, se začaly používat počátkem 50. let 20. století. Během krátké doby se staly důležitým materiálem používaným v letectví, kosmonautice, energetice a chemickém průmyslu. Příznivá kombinace vysoké pevnosti, malé hmotnosti, vynikajících mechanických vlastností korozní a tepelné odolnosti činí z titanu materiál, který vydrží extrémní provozní podmínky. Titan a jeho slitiny mají největší měrnou pevnost ze všech kovových materiálů. V dnešní době se slitiny titanu používají pro náročné aplikace, jako jsou části proudového motoru (lopatky kompresoru s životností až jeden milion letových hodin), konstrukce letadel (Ti-5Al-2,5Sn), vnější zdi budov či střechy. Titan lze najít také v mnoha jiných odvětvích průmyslu například jako lopatky turbíny tepelných elektráren, výměníky tepla v ropném průmyslu, náhrada kloubů v lékařství nebo různé díly ponorek. Titan je nemagnetický kov a má dobré tepelné vlastnosti. Jeho koeficient délkové teplotní roztažnosti je nepatrně nižší než u železa a poloviční než u hliníku. Teplota tavení titanu (1 668 °C) je vyšší než u železa, ale maximální provozní teploty se pohybují v rozmezí 427 °C až 538 °C.

Vysoká cena titanu a jeho slitin limituje jeho použití tam, např. v automobilovém průmyslu, kde by mohl nahradit kovy s nižšími výrobními náklady (např. hliník nebo ocel). Relativně vysoká cena je způsobena již vysokým zájmem o materiál v surovém stavu, dále výrobními náklady a náklady na obrábění polotovaru k dosažení požadovaného tvaru. [1][2][3]

Tabulka 1: Srovnání některých vlastností titanu s jinými prvky [4]

Prvek	Ti	Fe	Ni	Al
Teplota tání [°C]	1 670	1 538	1 455	660
Alotropická přeměna	882 °C ($\beta \rightarrow \alpha$)	912 °C ($\gamma \rightarrow \alpha$)	-	-
Krystalová struktura	bcc \rightarrow hcp	fcc \rightarrow bcc	fcc	fcc
Modul pružnosti [GPa]	115	215	200	72
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	4 500	7 800	8 900	2 700
Korozní odolnost	velmi vysoká	nízká	střední	vysoká
Reaktivita s O_2	velmi vysoká	nízká	nízká	vysoká
Cena	velmi vysoká	nízká	vysoká	střední

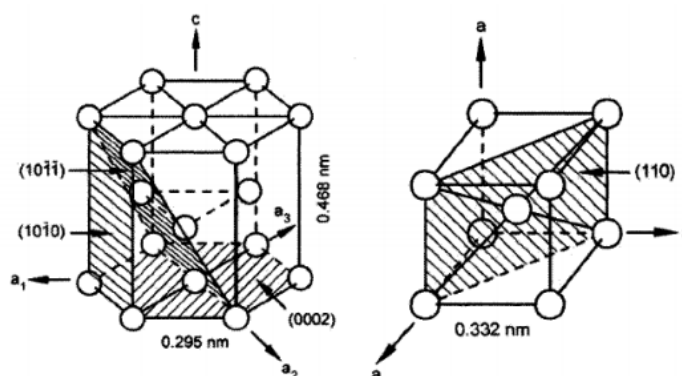
2.1.1 Titan z hlediska metalurgie

Titan se v přírodě nachází v celé řadě minerálů, v nichž se vyskytuje zpravidla jako čtyřmocný. Pro praktické využití mají největší význam rutil (TiO_2) a ilmenit (FeTiO_3). Rutilová ruda je výhodnější z hlediska těžby a přípravy ke zpracování na kov. Její zdroje jsou však téměř vyčerpané, a proto je 91 % světové spotřeby pokryto ilmenitem, jenž má poměrně rozsáhlá naleziště. [4][5][6]

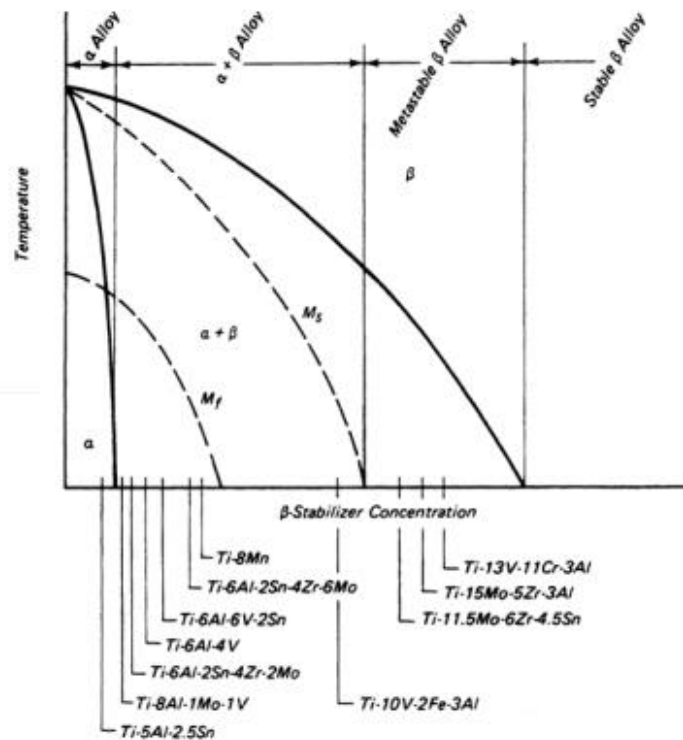
Tabulka 2: Příklady titanových rud [5]

Minerál	TiO_2 [%]
Rutil	cca 95
Anatas	cca 95
Brookit	cca 95
Olmenit	40 až 60
Leukoxen	> 65

Titan se vyskytuje ve dvou modifikacích a to jako hexagonální α -fáze a kubická β -fáze. [4]

Obrázek 1: Hexagonální mřížka fáze α a bcc mřížka fáze β čistého titanu [7]

Rozdílnost obou fází se promítá jak do struktury, tak do mechanických vlastností. K alotropické přeměně $\beta \rightarrow \alpha$ u čistého titanu dochází při 882 °C. Fázová přeměna čistého titanu je velmi rychlá a nelze ji nijak potlačit. Avšak při legování titanu určitými prvky může β -fáze existovat i za nižších teplot. Na základě výskytu jedné či druhé fáze se slitiny titanu dělí do 3 kategorií – α -slitiny, $(\alpha+\beta)$ -slitiny a β -slitiny. Na obrázku 2 je znázorněn pseudobinární diagram Ti - β -stabilizátor. V diagramu jsou vyneseny některé titanové slitiny dle jednotlivých kategorií. Křivky M_s a M_f jsou křivkami nerovnovážného rychlého ochlazení za vzniku fází martenzitického typu. [4][8]



Obrázek 2: Pseudobinární diagram Ti - β -stabilizátor [4]

2.1.2 Rozdělení legujících prvků

Podle vlivu na teplotu alotropické přeměny se legující prvky dělí na α -stabilizátory, β -stabilizátory a prvky neutrální. [4]

2.1.2.1 α -stabilizátory

Posouvají teplotu alotropické přeměny k vyšším teplotám. Nejvýznamnější z těchto prvků je hliník. Hliník je obecně nejdůležitějším legujícím prvkem titanových

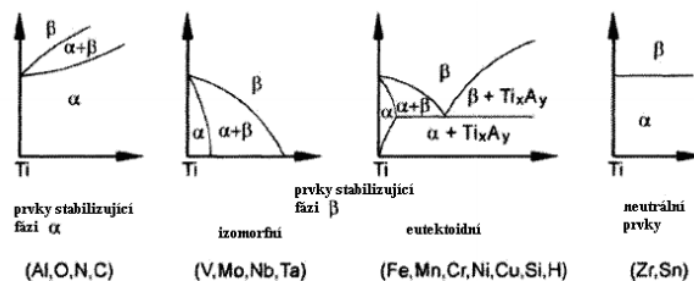
slitin. S titanem tvoří tuhý roztok až do 26 % Al. V praxi však obsah hliníku nepřesahuje 7 až 8 %, při vyšším obsahu se slitiny stávají křehkými za tepla a zhoršuje se tvařitelnost. Mezi další α -stabilizátory patří kyslík, dusík a uhlík. Tyto prvky však již při nízkých obsazích výrazně zvyšují pevnost a zhoršují tvařitelnost. Z tohoto důvodu není možné je využívat jako legující prvky, naopak jsou považovány za nečistoty.

2.1.2.2 β -stabilizátory

Posouvají teplotu alotropické přeměny k nižším teplotám. β -stabilizátory se obvykle dělí do dvou skupin:

- **rozpuštěné v β -fázi** (V, Mo, Ta, aj.)
- **eutektické** (Mn, Fe, Cr, Si, Ag, H) Za nižších teplot dochází k eutektoidní reakci, kde eutektoidní směs je tvořena tuhým roztokem α a intermediální fází bohatou na přísadový prvek. Rozpuštěnost přísadového prvku je největší za eutektoidní teploty.

Dalšími prvky, které se často objevují v slitinách titanu, jsou zirkonium a cín. Tyto prvky nemají velkou rozpustnost ani v jedné fázi a proto výrazně neovlivňují jejich stabilitu. Jejich význam ovšem spočívá ve zpomalení fázové transformace. [4]



Obrázek 3: Vliv přísadových prvků na fázový diagram titanu [2]

2.1.3 Slitiny titanu

V současnosti existuje asi 100 slitin titanu, ale využívá se jen několik zásadních. [2]

2.1.3.1 Slitiny α

Jsou charakteristické velkou pevností a je možné je tvářet i za studena. Jsou vhodné pro použití v rozmezí teplot -200 až 550 °C. Jsou více odolné proti creepu

za vysokých teplot než slitiny $\alpha+\beta$ nebo β . Na tyto slitiny se aplikuje pouze rekrytalizační žíhání po tváření za studena, jelikož mají malou odezvu na tepelné zpracování, takže je nelze zpevnit tepelným zpracováním. Tato vlastnost však souvisí s výbornou svařitelností, jelikož svarový kov se téměř neliší od základního materiálu. Obsahují stabilizující prvky jako například hliník, cín. Tyto prvky substitučně vytvrzují matici. Celkový obsah legur vyjádřený hliníkovým ekvivalentem by neměl překročit 9 hm.%, aby nedošlo k nežádoucímu zkřehnutí. [2]

$$[Al]_{eq} = Al + \frac{1}{3}Sn + \frac{1}{6}Zr + 10[O + C + N]$$

Rovnice 1

Do této skupiny lze také zařadit

- **CP-titan (Commercially Pure):** jedná se o titan o čistotě 99,0 až 99,5 %. Největšími přednostmi CP-titanu jsou výborná korozní odolnost, dobrá svařitelnost, tvarovatelnost a nižší cena. Nevýhodou je možnost využití pouze pro aplikace vyžadující nižší pevnost.
- **Slitiny pseudo- α :** tyto slitiny obsahují okolo 2 % β -stabilizátorů (např. molybden nebo vanad). Obsah těchto prvků zvyšuje odezvu na tepelné zpracování. [4]

2.1.3.2 Slitiny $\alpha + \beta$

Jedná se o nejpoužívanější titanové slitiny. Tyto slitiny obsahují za pokojové teploty jak α -fázi, tak β -fázi. Množství fáze β se pohybuje v rozmezí 5 až 50 %. [2]

2.1.3.3 Slitiny β

Tyto slitiny nabízejí široké spektrum možností s ohledem na zpracování, mikrostrukturu a mechanické vlastnosti. Oproti slitinám ($\alpha+\beta$) mají větší odezvu na tepelné zpracování, lepší únavovou odolnost a deformační vlastnosti, které souvisí s bcc mřížkou β -fáze. Další výhodou je možnost zpracování za nižších teplot. Korozní odolnost těchto slitin je stejná nebo lepší než u α -slitin a také lépe odolávají prostředí bohatému na vodík. Nevýhodami jsou nižší creepová odolnost, vyšší cena a relativně vyšší hustota. [4]

Beta slitiny lze rozdělit do dvou skupin (viz obrázek 2)

- **Metastabilní:** jedná se o vysoce pevné β -slitiny. Zakalením z vysokých teplot zůstane ve struktuře β -fáze, která se při stárnutí rozpadá na jemnou α -fázi, což je doprovázeno nárůstem pevnosti.

- **Stabilní:** jsou β -slitiny, které obsahují více β -stabilizátorů. Tyto slitiny nemohou být vytvrzovány stárnutím. [4]

2.2 Ti-6Al-4V

Je nepoužívanější titanovou slitinou, lze ji najít v 45 % průmyslových aplikacích titanu a největší předností je výborná kombinace pevnosti, korozní odolnosti, tvařitelnosti, obrobiteľnosti a svařitelnosti (v ochranné atmosféře argonu). Další výhodou je možnost tepelného zpracování a stabilita až do 400 °C. Bývá označována Titan Grade 5. Nejprve byla tato slitina vyvinuta pro kosmický průmysl. Díky jejím vlastnostem se však nadále rozšířila do automobilového průmyslu, do letectví, biomedicíny a dalších průmyslových oblastí. V automobilovém průmyslu se tato slitina začala používat v osmdesátých letech na součásti motorů závodních vozů F1. Dnes se používá především pro speciální aplikace, kde má hmotnost zásadní vliv (ventily, ojnice, hnací hřídele, aj.). [4]

Přesné obsahy jednotlivých prvků závisejí na konkrétní aplikaci (mezní obsahy prvků jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Chemické složení slitiny Ti-6Al-4V [9]

Prvek	Al	V	N	C	H	Fe	O	Ti
Obsah [hm. %]	5,5 až 6,75	3,5 až 4,5	max. 0,05	max. 0,08	max. 0,01	max. 0,3	max. 0,2	zbytek

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V [9]

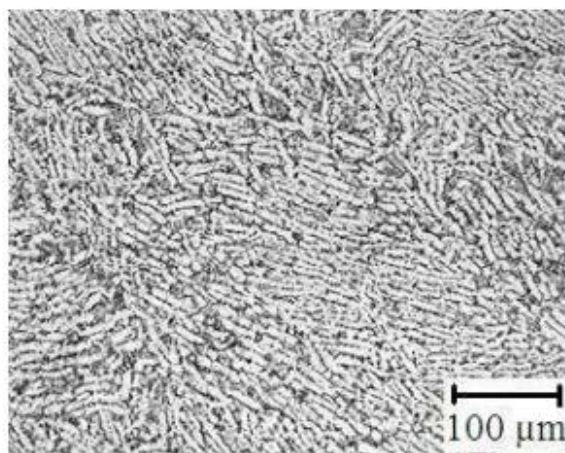
Stav	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	E [GPa]	Tvrdość HV
Žíhaný	990	900	30	100	min. 36
Kalený	1 050 až 1 200	750 až 1 000	2 až 25	90 až 110	min. 39
Vytvrzovaný	1 100 až 1 250	1 025 až 1 150	2 až 5	110 až 115	min. 41

Tabulka 5: Fyzikální vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V [9]

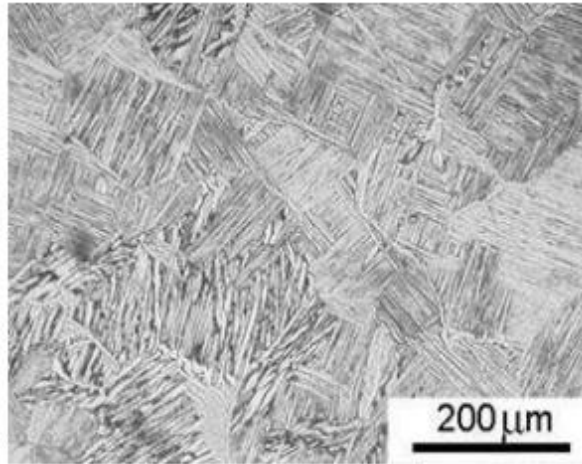
Hustota [kg.m ⁻³]	teplotní součinitel délkové roztažnosti [K ⁻¹]	Teplená vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Maximální provozní teplota [°C]
4 430	9,2.10 ⁻⁶ (při 20 až 300 °C)	7	350

2.2.1 Mikrostruktura Ti-6Al-4V

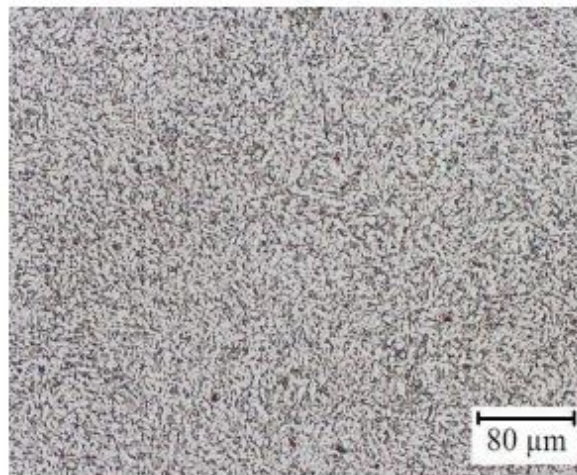
Mikrostruktura slitiny se skládá z fází α a β a ve většině případů se jedná o velmi jemnou strukturu. Množství fáze α a β je závislé na chemickém složení, tepelném zpracování a přítomnosti intersticiálních prvků (především kyslíku). Existuje několik strukturních morfologií (rovnoosá, lamelární, bimodální = kombinace lamelární a rovnoosé, widmannstättenova = jehlicovitá), jejichž vznik je ovlivněn podmínkami tváření a tepelného zpracování. Struktura tvořená rovnoosými zrny se vyznačuje dobrou tvárností a únavovou pevností. Lamelární struktura má horší mechanické vlastnosti, ale vyznačuje se vyšší žárupevností a lepší lomovou houževnatostí, což je dáno značným větvením trhlin při jejich šíření. Jehlicovitá (Widmannstättenova) struktura vzniká vlivem bezdifúzní martenzitické přeměny při nerovnovážných podmínkách ochlazování z kalící teploty, kdy se fáze β přemění na přesycený tuhý roztok α . Na rozdíl od ocelí se tvrdost přesyceného tuhého roztoku α nikterak výrazně neliší od fáze α . Za normální teploty má tato struktura sníženou tažnost. Za vyšších teplot má pak vyšší odolnost proti tečení. Při jistých nevhodně zvolených podmínkách ochlazování (plynulé ochlazování bez stárnutí za zvýšené teploty, izotermická přeměna $\beta \rightarrow \alpha$ apod.) může dojít ke vzniku nežádoucí fáze ω , která se vyznačuje vysokou tvrdostí, ale činí slitinu velice křehkou. To je zapříčiněno tím, že ve skutečnosti je fázová přeměna u titanových slitin do značné míry komplikovanější ($\beta \rightarrow \omega \rightarrow \alpha$). Vznik fáze ω v titanových slitinách eliminuje přísada hliníku. [10]



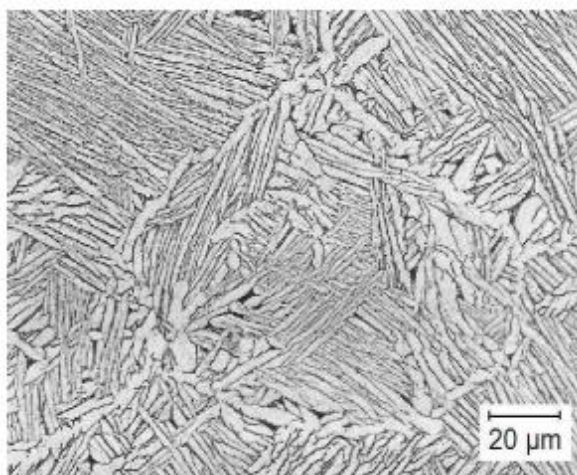
Obrázek 4: Struktura Ti-6Al-4V po tváření [10]



Obrázek 5: Widmannstättenova jehlicovitá struktura Ti-6Al-4V jehlice β (světlé) ve fázi α (tmavé) [10]



Obrázek 6: Rovnoosá struktura Ti-6Al-4V [10]

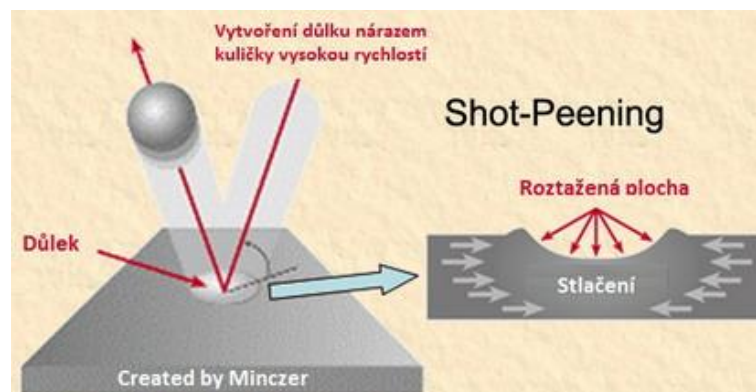


Obrázek 7: Lamelární struktura Ti-6Al-4V [10]

2.3 Shot peening (řízené kuličkování)

Účelem Shot peeningu (SP) je vytvořit rovnoměrně zpevněnou vrstvu. SP je důležitá a především z bezpečnostních důvodů nepostradatelná metoda, především ale v leteckém a kosmickém průmyslu.

Podstata metody spočívá v plastické deformaci za studena. Plastická deformace je způsobena kuličkami, které jsou vháněny proti povrchu součásti. Každá kulička vytvoří díky své vysoké kinetické energii při dopadu v povrchu malý důlek. Překrývající se důlky vytvoří souvislou zpevněnou vrstvu. Pod povrchem tak vznikají příznivá tlaková napětí v důsledku snahy materiálu vrátit se do původního stavu, jak je znázorněno na obrázku 8. [11][12][13]



Obrázek 8: Princip metody Shot peening [11]



Obrázek 9: Shot peening v praxi [12]

Tato zbytková napětí jsou v případě SP velmi vysoká. Tím pádem dochází u takto dokončené součásti k předcházení vzniku a šíření trhlin, čili k maximálnímu

zvýšení její únavové životnosti. SP navíc eliminuje vliv koncentrátorů napětí, jako jsou různé vruby, zaoblení apod. Dále musíme připomenout, že se zlepšují vlastnosti jako je vrubová houževnatost, odolnost proti únavě a opotřebení, snižuje nebezpečí korozního praskání, mezikrystalové koroze apod. Také náklady na SP jsou celkem nízké. Po SP se nesmí provádět žádné operace, které by vedly k uvolnění napětí vytvořeného kuličkováním, nebo která vyvolává škodlivá zbytková napětí. Dále drsnost povrchu materiálu, není vhodné snižovat obráběním pod úroveň způsobenou následným SP.

Jak už bylo řečeno procesem řízeného kuličkování dochází ke zpevnění povrchové vrstvy. Hloubku zpevnění lze zvětšit nárazovou energií částic, ale je přitom nutno vzít v potaz tloušťku profilu. Obecně lze říct, že pro odolnost vůči šíření trhlin a při obtížných provozních podmínkách se vyžaduje hlubší vrstva.

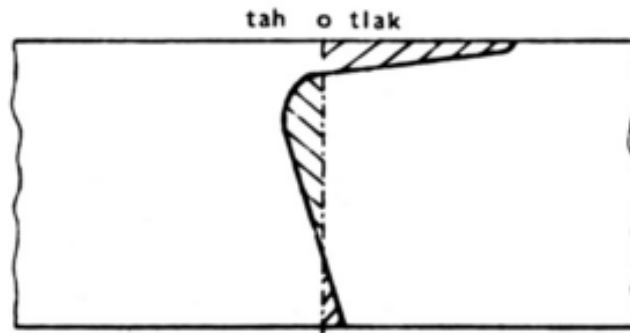
Zlepšení mechanických vlastností zaručuje zvýšení životnosti součástí, vyšší spolehlivost, popřípadě umožňuje zmenšení rozměrů a hmotnosti součástí nebo použití méně kvalitního materiálu při zachování stejné životnosti. [11][12][13][14]

2.3.1 Pracovní parametry

Volba pracovních parametrů procesu závisí na mnoha podmínkách, především na znalosti aplikace kuličkování dílu, jeho geometrii, předchozí výrobní metodě, mechanických vlastnostech základního materiálu, citlivosti základního materiálu na napětí, prostředí, provozních podmínkách apod. K nejvýznamnějším parametrům ovlivňujících konečný výsledek patří zejména úhel (50 až 80°) a rychlost dopadu částic až 150 m.s⁻¹, doba tryskání a v neposlední řadě také rozměr, tvar, hmotnost a materiál částic. [11][13]

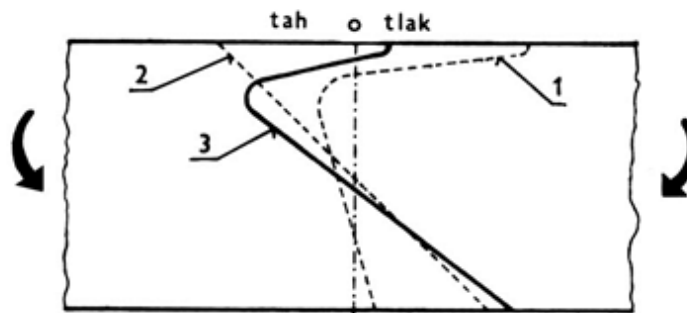
2.3.2 Rozložení napětí po SP

Vnitřní vlákna, která nejsou napínána nad mez kluzu, si uchovávají původní pružnost a brání v dilataci povrchovým vláknům. Dochází k vytvoření rovnováhy, při které relativně tlustá vrstva vnitřního materiálu drží nízkým tahovým napětím tenkou povrchovou vrstvu ve stavu vysokého tlakového napětí viz. obrázek 10. [15]



Obrázek 10: Rozložení zbytkového napětí v průřezu součásti po jednostranném SP [15]

Dojde-li k zatížení součástí vnější silou, bude výsledné napětí rovno algebraickému součtu zbytkového pnutí po SP a napětí způsobeného zatížením. Výsledné rozložení napětí je znázorněno na obrázku 11. [15]



1 – zbytkové pnutí po kuličkování

2 – napětí od vnějšího zatížení

3 – výsledné napětí

Obrázek 11: Výsledné rozložení napětí [15]

2.3.3 Hlavní přínosy řízeném kuličkování

- zvýšení únavové odolnosti
- zvýšení odolnosti proti korozi
- zvýšení odolnosti proti opotřebení [14]

2.3.4 Nástroj (tryskací prostředek)

Nástroj není v tomto případě tvořen jedním nebo několika tvářecími elementy, ale sestává z mnoha tvářecích tělísek, která samostatně dopadají na povrch součásti. Pro mechanické zpevnování se musí používat taková media, která jsou výjimečná především svou kulovitostí (skleněné perly „Balotina“, ocelový granulát „Steelshot“

a nebo keramické médium „Zirshot“). Nejpoužívanější pro kuličkování je ocelový granulát o tvrdosti 46 až 53 HRC. Avšak pro úpravu neželezných materiálů jako jsou Al, Mg však ocelový materiál nevyhovuje. Při použití ocelového granulátu vzniká nebezpečí, že na povrchu součásti zůstanou mikročástice ocelového materiálu, které mohou nepříznivě ovlivnit životnost celé součásti. V těchto případech se dává přednost skleněným (balotině) nebo keramickým kuličkám. Jedná se o inertní materiál, který nezpůsobuje kontaminaci povrchu. Bez ohledu na materiál tryskacího prostředku musí být abrazivo vždy kulaté a stejnoměrné velikosti. Žádné tryskací médium není vyrobeno tak, aby na něj neúčinkovali přírodní zákony a z toho důvodu se každé médium po určité době opotřebuje. Avšak k opotřebení nemusí docházet jen časem, ale také například rozdrčením zrna a tím již nemáme kulatý tryskací materiál, který je vhodný na mechanické zpevňování, ale vytvoří se nám ostrohranný materiál. Tento materiál je nutné průběžně kontrolovat.

2.3.4.1 Kontrola tryskacího prostředku

Kontroly se provádějí za pomoci

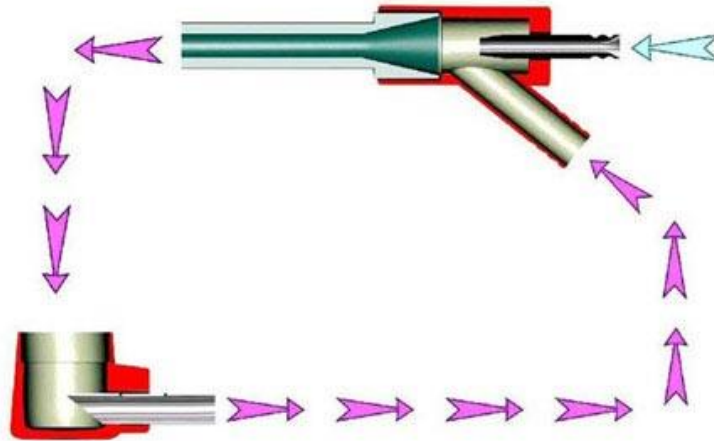
- separátoru (součást stroje)
- sítové zkoušky
- vizuální zkoušky [11][13][14][16]

2.3.5 Stroje

Zařízení se dělí podle principu činnosti do dvou základních skupin. Do první skupiny se řadí zařízení, která pracují na základě tryskání pomocí stlačeného vzduchu a do druhé stroje vrhající tvářecí média mechanicky pomocí metacích kol.

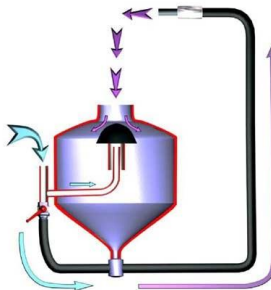
Vzduchová tryskací zařízení se vyznačují vysokou variabilitou, neboť se mohou přizpůsobit nejrůznějším požadavkům při praktických aplikacích. Jejich velká výhoda spočívá zejména v schopnosti tryskat i těžko dostupná místa, předměty velkých rozměrů nebo konstrukce umístěné v terénu. Tyto stroje se vyskytují v různých provedeních, od jednoduchých tryskacích pistolí až po speciální tryskací komory s automatickým naváděním trysky. Samotná vzduchová zařízení lze ještě rozdělit na injektorová a tlaková. [13][17]

Na obrázku 12 je znázorněn princip tryskání pomocí injektorového systému. Ze směšovače umístěného na dně tryskací komory je přisáván do pistole tryskací prostředek, kde je za působení proudu vzduchu urychlován a nasměrován do požadovaného místa. Po dopadu na povrch součásti se tryskací médium odrazí, dopadne na dno komory a je následně opět nasáváno do pistole.



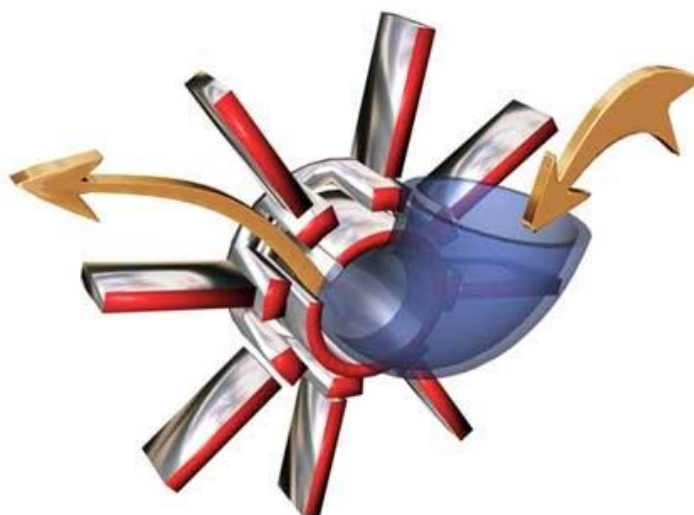
Obrázek 12: Injektorový systém [17]

Obrázek 13 ukazuje podstatu tlakového tryskacího systému. Zde je do oběhu zařazena tlaková nádoba, do níž se vsype příslušné množství tryskacího prostředku. Následně se uzavře těsnicí kuželka v plnicím hrdle a nádoba je natlakována. Poté je tryskací médium tlačeno přes přepouštěcí trysku ve směšovací hlavě do hadice, kde je promíseno se vzduchem a následně vystupuje ven pracovní tryskou. Kulovým ventilem se reguluje poměr mezi tlakovou nádobou a unášecím vzduchem v hadici. Tryskací médium se po dopadu na povrch předmětu odrazí a dopadá na dno kabiny, kde se shromažďuje. Po vytryskání celého obsahu tlakové nádoby je třeba tryskání přerušit a doplnit tryskací prostředek. Tento způsob dosahuje přibližně trojnásobné intenzity injektorového systému.



Obrázek 13: Tlakový systém [17]

Stroje s metacími koly se vyznačují vysokou výkonností a lze je plně mechanizovat. Jejich provoz díky tomu závisí pouze v malé míře na lidském faktoru a dosažená kvalita tak bývá obvykle vyšší. Z ekonomického hlediska je taktéž jejich provoz hospodárnější. Nevýhodou je možné omezení výběru tryskacích prostředků, jelikož tato zařízení bývají většinou koncipována pouze na ocelový granulat. Na obrázku 14 je ukázán základní princip fungování takového stroje. Z něj je patrné, že tryskací prostředek se přivádí k metacímu kolu, které se otáčí vysokou rychlostí. Odstředivá síla má za následek metání tvářecích prvků vysokou rychlostí až $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ proti povrchu tryskané součásti. Výsledek procesu je ovlivněn především tvarem lopatek, množstvím použitého prostředku, a rychlostí rotace kola. [12][13][17]



Obrázek 14: Stroj s metacími koly [17]

2.3.6 Nejčastější použití

Technologie řízeného kuličkování má velmi široké uplatnění. Je to především tam, kde stav povrchové vrstvy hraje důležitou roli v životnosti celé součásti. Blahodárný vliv kuličkování se nejnápadněji projevuje u dílů uvedených v tabulce 6.

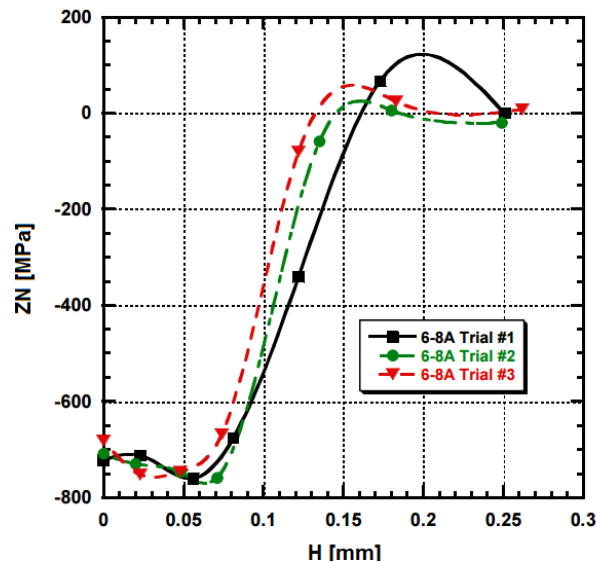
Tabulka 6: Nejčastější použití řízeného kuličkování [15]

Aplikace	Zvýšení životnosti [%]
šroubové pružiny	až o 1 000
ozubená kola	až o 1 000
torzní tyče	až o 600
svary	až o 200
ojnice	až o 100

Dále nesmíme zapomenout na lopatky turbín a díly pro letecký průmysl z lehkých slitin. [13][14][15][18]

2.3.7 Nalezené výsledky zbytkových napětí po aplikaci zpevňovací technologie SP

Zbytkové napětí malých desek po aplikaci SP



Obrázek 15: Zbytková napětí malých desek po aplikaci SP [19]

Informace o experimentu

- metoda: rentgenografická difrakční metoda
- materiál: Ti-6Al-4V
- vzorek: malá kovaná destička (délka 63,5 mm, tloušťka 5 mm)
- pokrytí: 125 %
- Almen intenzita: 6 až 9
- tryskací médium: S110[19]

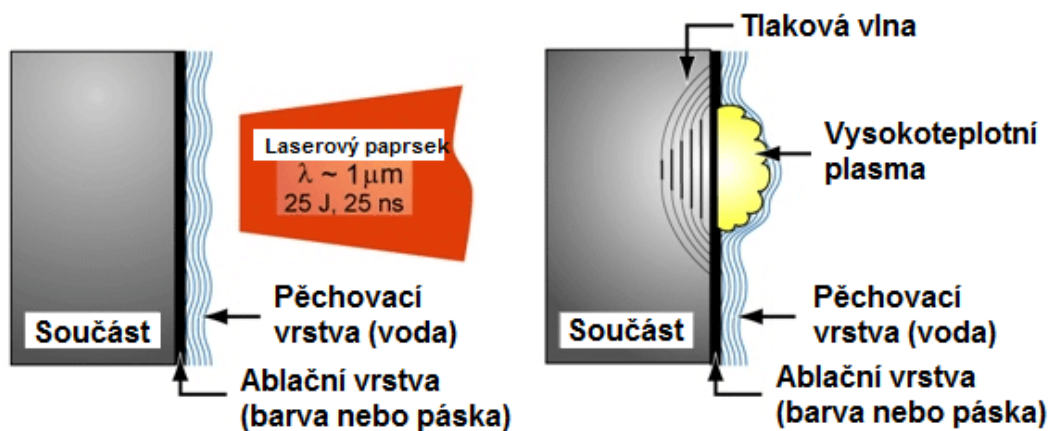
2.4 Laser peening

Tato metoda je blíže specifikována normou AMS 2546. Laser peening je počítačem řízený proces. Kdy pomocí laseru je vytvořena rázová vlna pomocí, které dochází k vytvrzení povrchu součásti a v povrchové vrstvě vzniká příznivé tlakové napětí jako např. u kuličkování.

2.4.1 Princip metody

Na povrch součásti je nanесena žáruvzdorná vrstva, která absorbuje energii laserového paprsku. Pak je potřeba na povrchu součásti vytvořit izolační vrstvu např. voda nebo sklo. Poté jsou na povrch vystřelovány elektrické pulzy Nd:YAG laseru. Vznikne tak vysokotlaká plasma, která vyvolává v povrchu součásti šokové vlny (v řádech GPa).

Díky ochranné vrstvě nedojde k nežádoucímu poškození povrchu (nedochází k tepelnému ovlivnění). Naopak vznikne v podpovrchové vrstvě tlakové napětí, které je až 4x silnější než je možné dosáhnout kuličkováním. [20]



Obrázek 16: Princip metody LSP [20]



Obrázek 17: Proces LSP u lopatek [20]

2.4.2 Charakteristika běžně používaných laserů pro LSP

- typ laseru Nd:YAG laser (vlnová délka 1 064 nm)
- délka laserového pulsu: 8 až 40 ns

- energie jednoho pulzu: 1 až 50 J
- průměr laseru: 1 až 6 mm
- výkon laseru: 0,5 až 10 GW.cm⁻² [21]

2.4.3 Nd:YAG laser

Nd:YAG laser je nejrozšířenějším a v současnosti asi i nejlépe technicky zvládnutým pevnolátkovým laserem. Generuje neviditelné infračervené záření na vlnové délce 1 064 nm. Aktivním materiálem je izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu (Y3Al5O12) dopovaný ionty neodymu (Nd³⁺) a z toho vzniká zkratka pro laser, složená z počátečních písmen chemických prvků. YAG je zkratka pro yttrito-hlinitý granát (Y3Al5O12), což je bezbarvý, opticky izotropní krystal kubické struktury. [22]

2.4.4 Zařízení pro Laser peening



Obrázek 18: Zařízení pro Laser peening [23]

2.4.5 Děje při LSP

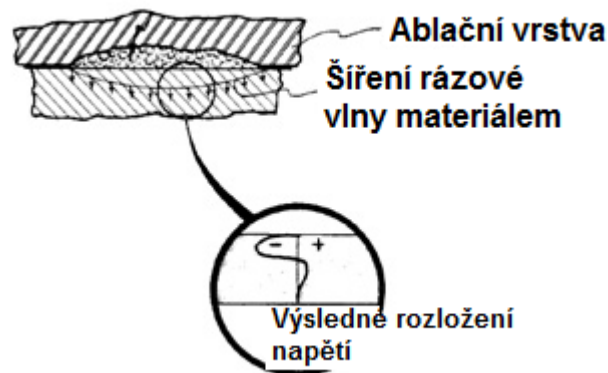
- nátěr absorbuje energii laserového paprsku a začne se tavit a vypařovat
- pára dále absorbuje energii laseru, následuje její ionizace (vytvoření plazmy)
- plazma se začíná rychle roztahovat
- roztahující se plazma je zadržena mezi povrchem vzorku a průsvitnou vrstvou, díky narůstajícímu tlaku se začínají do vzorku šířit rázové vlny
- při tlaku několika GPa dochází k překročení meze kluzu a následným plastickým deformacím – vzniku mikrodůlků

2.4.6 Hlavní přínosy

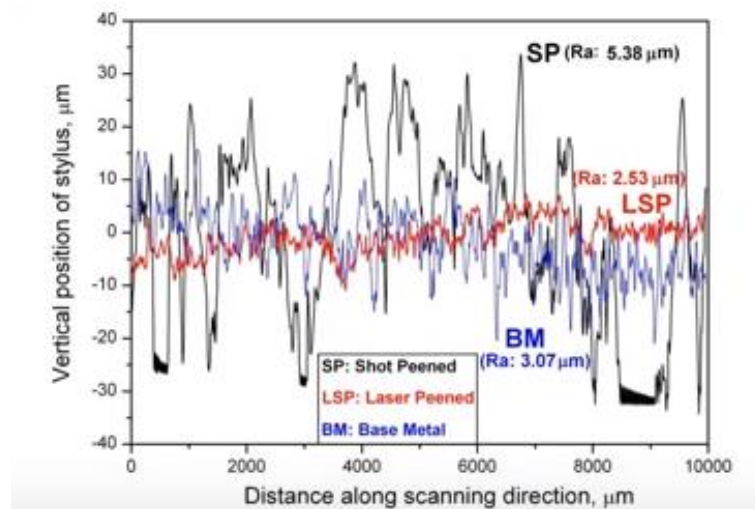
- zvýšení únavové odolnosti
- zvýšení odolnosti proti korozi
- zvýšení odolnosti proti opotřebení
- zvýšení pevnosti [24][25]

2.4.7 Využitím technologie LSP lze očekávat

- snížení nákladů na materiál
- zkrácení ztrátových časů
- snížení nákladů na pracovní sílu
- zvýšení bezpečnosti součásti
- zvýšení budoucích tržeb
- zlepšení pověsti firmy [26]

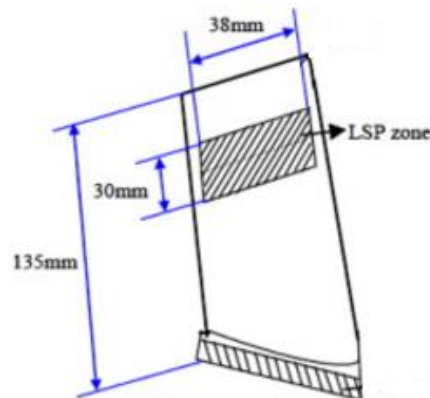


Obrázek 19: Proces LSP a ukázka zbytkového napětí po LSP [27]



Obrázek 20: Porovnání drsnosti povrchu (BM: bez technologie zpevňování, SP: po řízeném kuličkování, LSP) [25]

2.4.8 Nalezené výsledky měření zbytkových pnutí titanových lopatek po aplikaci LSP

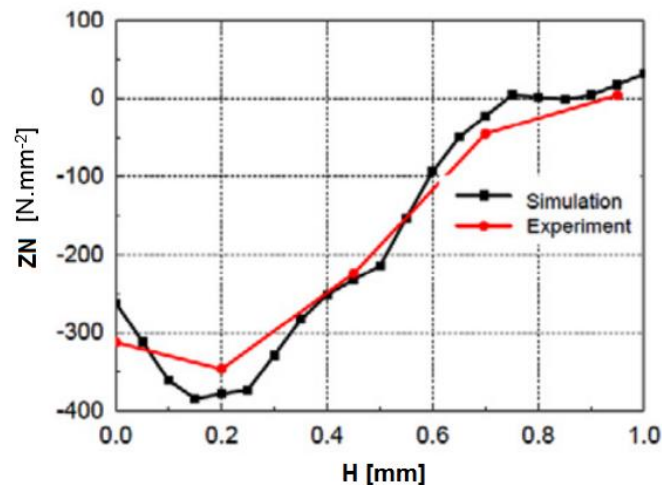


Obrázek 21: Malá lopatka z Ti-6Al-4V [28]

Informace o experimentu

- materiál: Ti-6Al-4V
- vzorek: malá lopatka
- průměr paprsku: 4 mm
- frekvence: 1 Hz
- tloušťka vody: 1 až 3 mm
- hustota výkonu: 1,79 GW.cm⁻²
- vlnová délka laseru: 1 064 nm
- metoda měření: rentgenografická difrakční metoda [28]

Zbytkové pnutí titanových lopatek po aplikaci technologie LSP



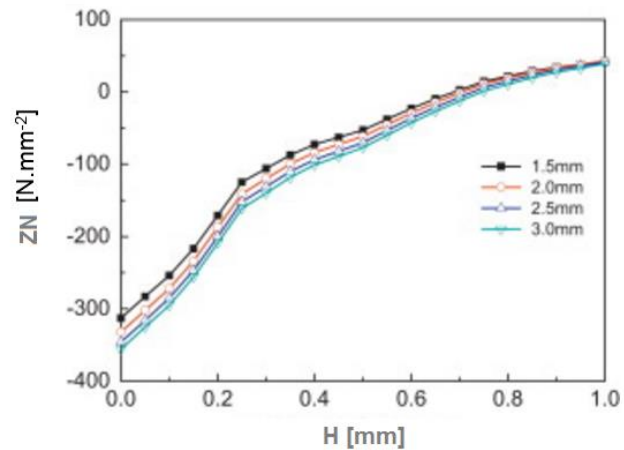
Obrázek 22: Zbytkové pnutí titanových lopatek po aplikaci LSP [28]

Parametry LSP matematicky vypočítaných hodnot zbytkových napětí

- hustota výkonu: 1,79 GW.cm⁻²
- průměr paprsku: 1,5 až 3 mm při době působení pulzu 20 ns

- doba působení pulzu: 15 až 30 ns [28]

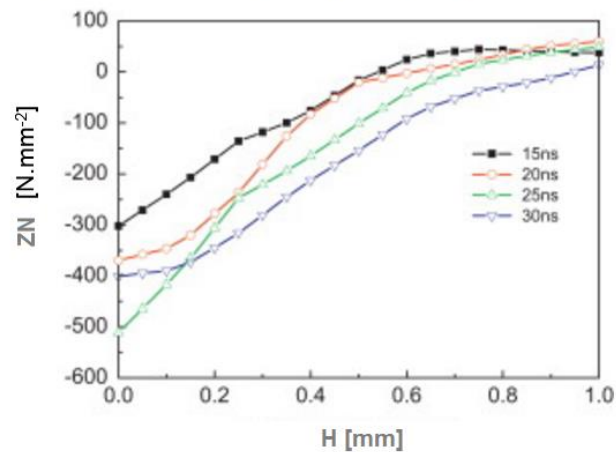
Zbytkové pnutí titanových lopatek po aplikaci technologie LSP



Obrázek 23: Zbytkové pnutí titanových lopatek po aplikaci LSP při různém průměru paprsku [28]

Z nalezeného grafu je patrné, že se změnou průměru paprsku nedochází k výraznému ovlivnění zbytkových napětí.

Zbytkové pnutí titanových lopatek po aplikaci technologie LSP



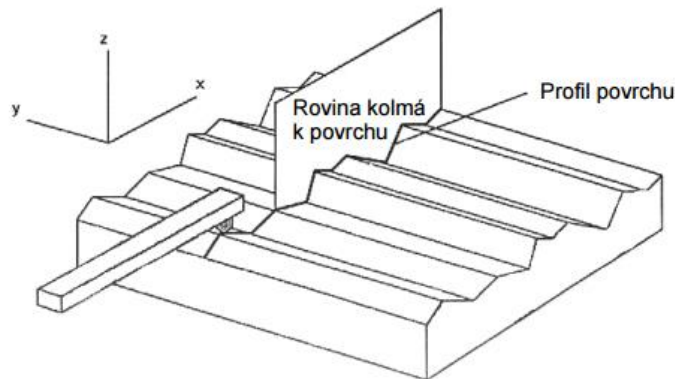
Obrázek 24: Zbytkové pnutí titanových lopatek po aplikaci LSP při různé době působení pulzu [28]

Z nalezeného grafu je patrné, jak ovlivňuje zbytková napětí volba doby pulzu. S vyšší dobou pulzu se dosahuje vyšší hodnoty zbytkových napětí.

2.5 Drsnost povrchu

Posuzování struktury povrchu součástí je řešeno redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu viz. obrázek 25. V rovině řezu je tímto způsobem získán profil povrchu, který je složen z profilu vlnitosti, profilu drsnosti a kratších a delších složek vln přítomných na povrchu. Jednotlivé složky je možné od sebe separovat filtrací,

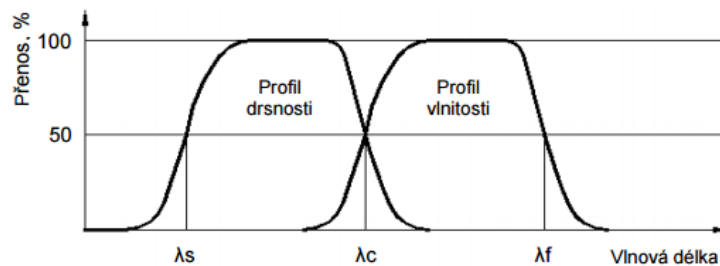
a to použitím různých druhů filtrů o rozličných vlnových délkách tak, jak je znázorněno jejich přenosovou charakteristikou na obrázku 26. [29][30]



Obrázek 25: Profil povrchu [29]

Používané filtry lze rozdělit na

- **λ_s filtr:** filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu
- **λ_c filtr:** filtr definující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti
- **λ_f filtr:** filtr definující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu [29][30][31]

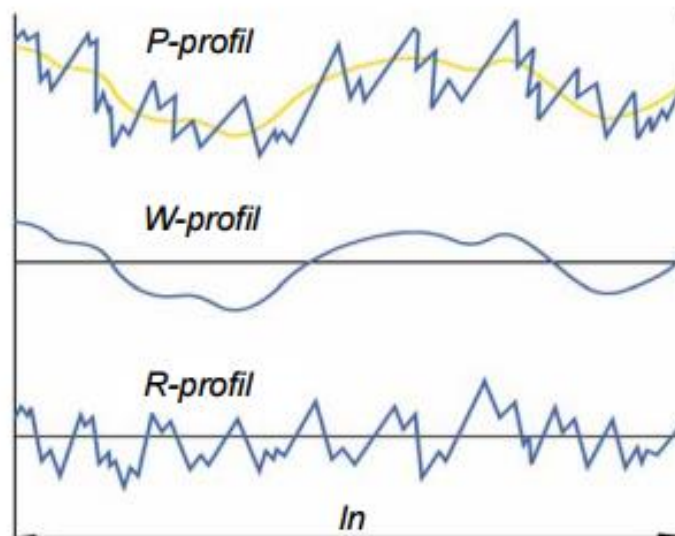


Obrázek 26: Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti [29]

2.5.1 Profil povrchu

Dle normy ČSN EN ISO 4287 lze rozlišit 3 typy profilů povrchu (graficky znázorněno na obrázku 27)

- **základní profil P-profil (primary profile):** profil vzniklý aplikací filtru λ_s pro odfiltrování krátkovlnných složek
- **profil vlnitosti W-profil (waviness profile):** profil odvozený postupnou aplikací λ_f filtru pro odstranění dlouhovlnných složek a λ_c filtru pro odstranění krátkovlnných složek
- **profil drsnosti R-profil (roughness profile):** profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek užitím filtru λ_c



Obrázek 27: Základní profil a z něho odvezené profily vlnitosti a drsnosti [32]

Pro objektivní měření a vyhodnocení jakosti povrchu má velký význam správný výběr jak základní, tak vyhodnocované délky. Základní délka musí být dostatečně velká, aby v jejím rozsahu byly měřené parametry statisticky významné, ale současně ne tolik, aby zahrnovala nepodstatné detaily povrchu či vlivy vlnitosti nebo úchylek tvaru. Vyhodnocovaná délka je dle normy složena z jedné nebo více délek základních, přičemž nejčastěji je užíváno násobku pěti viz. obrázek 28. Kromě vyhodnocované délky je do snímané dráhy měřicího přístroje také zahrnuta délka rozběhu a délka doběhu, z nichž nejsou parametry povrchu vyhodnocovány. [29][30][32]



Obrázek 28: Základní a vyhodnocovaná délka, délka rozběhu a doběhu [32]

2.5.2 Definice parametrů profilu drsnosti povrchu

Charakter drsnosti povrchu je možné vyjádřit celou škálou parametrů, které jsou dále uvedeny. Nejprve jsou vysvětleny používané termíny, které jsou užívány u určování parametrů drsnosti povrchu. [29][30][32]

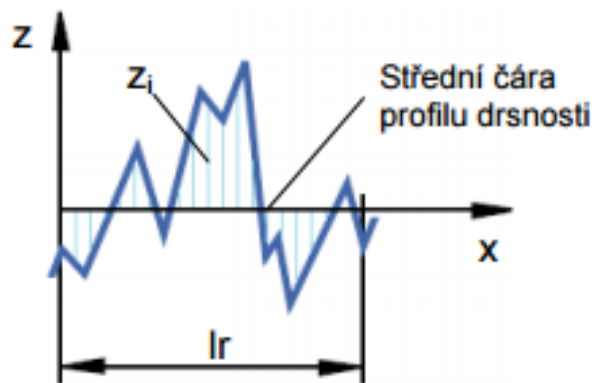
2.5.2.1 Používané termíny

Střední čára profilu drsnosti

Jedná se o čáru odpovídající dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem profilu λc . Má tvar jmenovitého profilu a rozděljuje skutečný profil tak, že v rozsahu základní délky je součet druhých mocnin jeho úchylek od této čáry nejmenší.

$$\int_0^{l_r} z(x)^2 dx = \min$$

Rovnice 2



Obrázek 29: Střední čára profilu drsnosti [30]

Prvek profilu

Je tvořen výstupkem profilu a přilehlou prohlubní. Výstupek profilu představuje část posuzovaného profilu z povrchu ven směřující, zatímco prohlubeň profilu část směřující dovnitř viz. obrázek 30.

Výška výstupku profilu Z_p

Vzdálenost mezi osou x a nejvyšším bodem výstupku viz. obrázek 30.

Hloubka prohlubně profilu Z_v

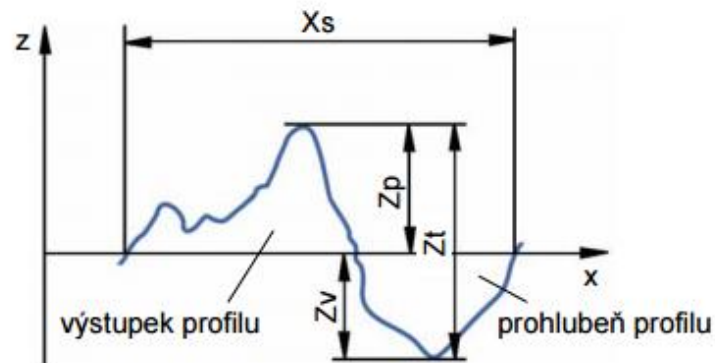
Vzdálenost mezi osou x a nejnižším bodem prohlubně profilu viz. obrázek 30.

Výška prvku profilu Z_t

Součet výšky výstupku profilu Z_p a hloubky prohlubně profilu Z_v viz. obrázek 30.

Šířka prvku profilu X_s

Délka úseku osy x protínající prvek profilu viz. obrázek 30.



Obrázek 30: Prvek profilu [30]

2.5.2.2 Výškové parametry – výstupky a prohlubně

Největší výška výstupku profilu R_p

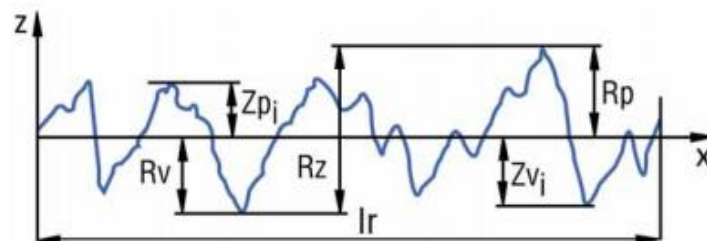
Výška Z_p nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky viz. obrázek 31.

Největší hloubka prohlubně profilu R_v

Hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky viz. obrázek 31.

Největší výška profilu R_z

Součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu (R_p) a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu (R_v) v rozsahu základní délky viz. obrázek 31.

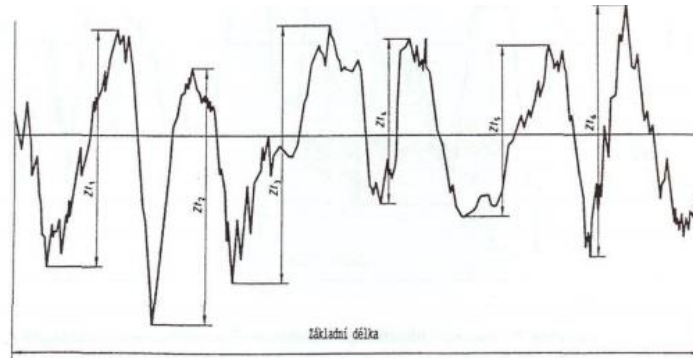
Obrázek 31: Parametry profilu drsnosti povrchu R_p , R_v a R_z [32]

Průměrná výška prvků profilu R_c

Průměrná hodnota výšek Z_t prvku profilu v rozsahu základní délky.

$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m_i} Z_{ti}$$

Rovnice 3



Obrázek 32: Výška prvků profilu (příklad profilu drsnosti) [29]

Celková výška profilu R_t

Součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky.

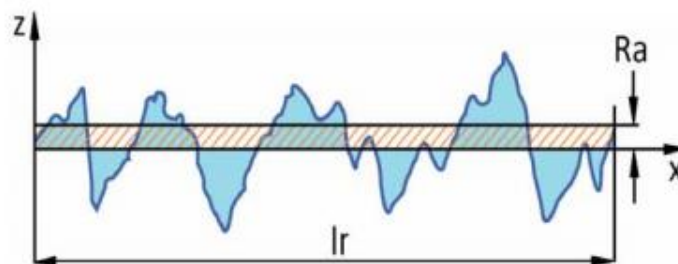
2.5.2.3 Výškové parametry – průměrné hodnoty pořadnic

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a

Je jednou z nejpoužívanějších charakteristik drsnosti povrchu ve strojírenské praxi. Jedná se o přednostní výškový parametr, jež je získáván jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ od střední čáry v rozsahu základní délky.

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx$$

Rovnice 4



Obrázek 33: Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a [30]

Je třeba si uvědomit, že parametr R_a je pouze statistickou hodnotou, jež udává střední hodnotu vzdáleností souřadnic jednotlivých bodů profilu zkoumaného povrchu od střední čáry. Nelze z něj však vyčíst, jak povrch vytvořený určitou technologií vlastně vypadá a při hodnocení profilu drsnosti členitých, pórovitých nebo hlubšími rýhami porušených povrchů může vést i k mylným představám. Navíc je dobře známo, že dva povrchy se stejnou hodnotou R_a mohou mít zcela rozdílné funkční vlastnosti.

Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu Rq

Kvadratický průměr pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^2(x)| dx}$$

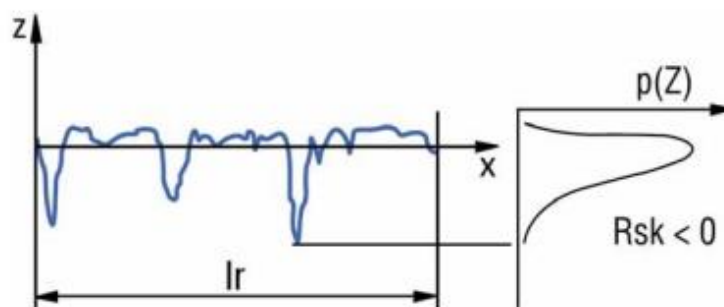
Rovnice 5

Šikmost posuzovaného profilu Rsk

Je vyjádřena podílem průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty Rq v rozsahu základní délky viz. obrázek 34.

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^3(x)| dx \right]$$

Rovnice 6



Obrázek 34: Šikmost posuzovaného profilu Rsk [30]

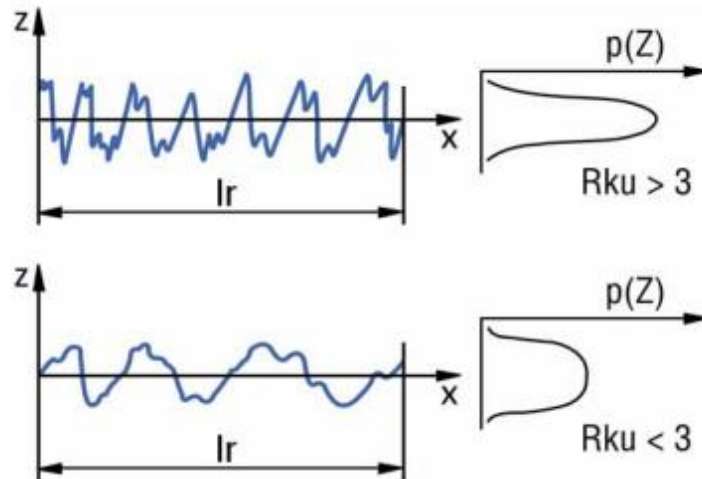
Tato veličina udává posunutí funkce hustoty pravděpodobnosti oproti Gaussovu normálnímu rozložení viz. obrázek 34 a umožňuje tak lépe rozlišit povrchy se stejnou hodnotou Ra z hlediska tvaru profilu. Je-li vrchol této funkce posunut směrem k výstupkům nerovností ($Rsk < 0$), vypovídá to o větších a hlubších prohlubních na povrchu, zatímco je-li vrchol posunut směrem k prohlubním ($Rsk > 0$), ukazuje to na povrch s více a členitějšími výstupky.

Špičatost posuzovaného profilu Rku

Je dána podílem průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty Rq v rozsahu základní délky a udává rozšíření nebo zúžení funkce hustoty pravděpodobnosti proti Gaussovu normálnímu rozložení.

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^4(x)| dx \right]$$

Rovnice 7

Obrázek 35: Špičatost posuzovaného profilu Rku [30]

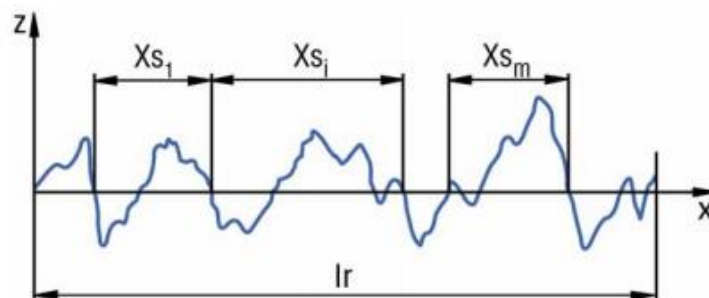
2.5.2.4 Délkový parametr

Průměrná šířka prvků profilu Rsm

Je základní charakteristikou drsnosti povrchu v podélném směru získaná jako aritmetický průměr šířek Xs prvků profilu v rozsahu základní délky.

$$Rsm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i$$

Rovnice 8

Obrázek 36: Průměrná šířka prvků profilu Rsm [32]

2.5.2.5 Tvarový parametr

Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu $R\Delta q$

Kvadratický průměr sklonů pořadnic dX / dX v rozsahu základní délky.

2.5.2.6 Křivky a odpovídající parametry

Materiálový poměr profilu (nosný podíl) $Rmr(c)$

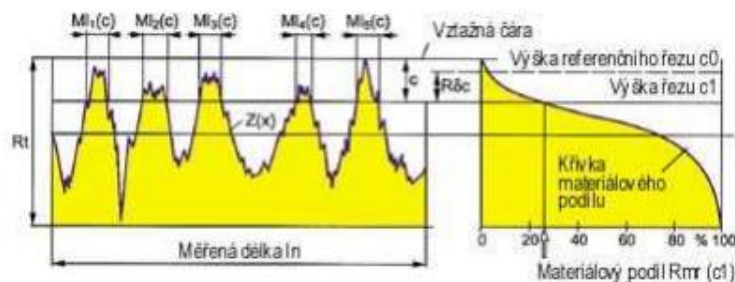
Poměr délky materiálu elementů profilu $MI(c)$ na dané úrovni c , k vyhodnocované délce.

$$Rmr(c) = \frac{MI(c)}{ln}$$

Rovnice 9

Křivka materiálového poměru profilu (nosná křivka)

Křivka představující materiálový poměr profilu v závislosti na výšce úrovně.



Obrázek 37: Křivka materiálového poměru [32]

Rozdíl výšky úseku profilu $R\delta c$

Svislá závislost mezi úrovněmi dvou úseků daného materiálového poměru.

$$R\delta c = C(Rmr1) - C(Rmr2)$$

Rovnice 10

$$(Rmr1 < Rmr2)$$

Rovnice 11

Vzájemný materiálový poměr Rmr

Materiálový poměr určený na úrovni části profilu $R\delta c$, vtažený k úrovni C_0 .

Empirické rozdělení výšek profilu

Hustota pravděpodobnosti pořadnic $Z(x)$ v rozsahu vyhodnocované délky. [29][30][31][32]

2.5.3 Metody měření drsnosti povrchu

Měření parametrů drsnosti povrchu je v dnešní době možno provádět mnoha různými metodami, z nichž každá má své výhody a nevýhody.

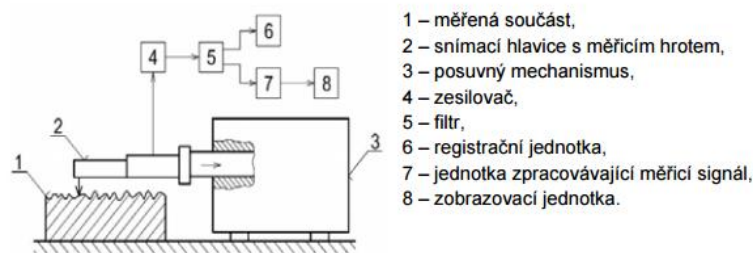
Měřicí zařízení lze rozdělit do 3 základních skupin

- dotykové měřicí přístroje
- bezdotykové (optické) měřicí přístroje

- ostatní měřicí přístroje [30][31]

2.5.3.1 Dotykové měřicí přístroje

V současnosti patří mezi nejrozšířenější měřicí prostředky, a to hlavně ve strojírenské praxi. Tyto přístroje zprostředkovávají přímé měření a hodnoty z nich získané často slouží ke komparaci s hodnotami obdrženy jinými metodami. Jejich hlavními výhodami jsou vysoká přesnost, citlivost, reprodukovatelnost měření, možnost převodu analogového signálu do digitální formy a také poskytnutí veškerých parametrů profilu drsnosti dle mezinárodních norem. Nicméně použitím těchto přístrojů, jejichž hrot je vyroben z velmi tvrdého materiálu (např. syntetický polykrystalický diamant), dochází v mnoha případech k částečnému poškození povrchové vrstvy měřené součásti, a tím i ke zkreslení naměřených údajů. Mezi další nevýhody lze zahrnout poměrně vysokou cenu těchto zařízení a jejich relativní křehkost. Na obrázku 38 je zobrazeno schéma dotykového měřicího přístroje. [30][31]



Obrázek 38: Schematické znázornění principu dotykového profilometru [30]

2.5.3.2 Bezdotykové měřicí přístroje

Jedná se o optická měřicí zařízení, v nichž je snímací hrot nahrazen paprskem elektromagnetického záření, čímž je vyloučeno poškození povrchu měřené součásti. Paprsek dopadající na povrch může být reflektován 3 různými způsoby: odrazem, rozptylem nebo jejich kombinací. Vzájemná interakce mezi paprskem a měřeným vzorkem závisí především od drsnosti povrchu a od použité vlnové délky záření. Hlavními výhodami těchto zařízení jsou bezkontaktnost, a tím nedestruktivnost, dále možnost kontinuální kontroly, měření větší části povrchu než u metod kontaktních a opakovatelnost procesu. Jejich ústřední nevýhodou ovšem je, že měření topografie povrchu je měření nepřímé. To má za následek nutnost porovnání experimentálně

získaných výsledků z těchto přístrojů s hodnotami obdrženými kontaktním profilometrem. [30][31]

2.5.3.3 Ostatní měřicí přístroje

Do této skupiny lze zahrnout celou řadu zařízení využívajících metod, jež fungují na jiném principu, než ty doposud zmíněné.

Mezi ně patří například

- **AFM (atomic force microscopy):** tato metoda využívá miniaturního velmi ostrého snímacího hrotu (tip), jež není v přímém kontaktu s měřeným povrchem; konstantní „přítlačná“ síla (10 N), která zajišťuje jeho stálou polohu nad vzorkem, je vyvozena piezoelektrickým článkem; proti ní působí meziatomární síly měřeného materiálu; vlivem nerovností je hrot vychylován a jeho pohyb zaznamenáván
- **SEM (scanning electron microscopy):** je založena na interakci vysoce energetického paprsku elektronů s povrchem vzorku a na měření energie elektronů povrchem odražených a emitovaných
- **pneumatické měření nerovností povrchu:** měřením průtoku nebo tlaku vzduchu na výstupu z trysky přitlačené k povrchu měřené součásti lze určit stupeň jejich nerovností [30][31]

2.6 Zbytková napětí

Zbytková napětí jsou napětí, která se vyskytují v materiálu bez působení vnějších sil (vnitřní pnutí). Zbytková napětí jsou jedním z parametrů celkového stavu materiálu. Vznikají v důsledku technologických postupů výroby materiálu a mají vliv na jeho pevnostní, únavové nebo korozní charakteristiky. Obecně se uvažuje, že tlaková zbytková napětí jsou výhodná a tahová zbytková napětí jsou nevýhodná např. podporují vznik a rozvoj trhlin. Při vysokých hodnotách vnitřních napětí ovšem může docházet k nežádoucím deformacím vlivem jejich uvolňování a degradací mechanických vlastností jak v případě tahových tak i tlakových napětí.

Vznik zbytkových napětí je v základním přiblížení spojen s výskytem plastické deformace. Zbytková napětí jsou rovna rozdílu mezi skutečnými napětími v pružně plastickém tělese a fiktivními napětími, které by v něm vznikly za předpokladu ideálně pružného materiálu. Z obecného hlediska však nemusí být zbytkové napětí nutně spojeno s plastickou deformací. [33]

2.6.1 Příčiny vzniku vnitřních napětí lze rozdělit do několika skupin

- **mechanické:** nehomogenní plastická deformace při mechanickém zpracování materiálu
- **tepelné:** tepelná plastická deformace v důsledku nehomogenního teplotního pole
- **chemické a strukturní:** změny objemu materiálu v důsledku chemických reakcí, fázových přeměn a rozdílných fyzikálních vlastností jednotlivých fází
- **vícevrstvé struktury:** rozdílné fyzikální vlastnosti jednotlivých vrstev
- **nové technologie:** nerovnovážné podmínky procesu ve speciálních technologiích vytváření a modifikace materiálů
- **konstrukční celky:** nepřesnosti jednotlivých součástí spojených v konstrukčních celcích [33][34]

2.6.2 Přehled experimentálních metod měření zbytkové napjatosti

Existují rozdílné metody a způsoby, určené ke stanovení velikosti zbytkového napětí v povrchových i hlubších vrstvách materiálu. Některé metody jsou praktičtější, levnější nebo jednodušší. Výběr té nejvhodnější metody závisí hlavně na typu zkoumaného materiálu, jeho geometrii, místech určených k měření a na požadované hloubce vyhodnocení zbytkové napjatosti, finančních možnostech a dostupnosti měřicích metod. Experimentální metody můžeme rozlišit pomocí dvou nejčastějších hledisek: dle míry narušení celistvosti zkoumaného tělesa a dle principu měření.

2.6.2.1 Dle míry narušení celistvosti zkoumaného tělesa

- **destruktivní:** dochází k celkovému znehodnocení tělesa
- **polodestruktivní (semidestruktivní):** lokální znehodnocení zkoušeného tělesa v místě, které lze následně odstranit nebo v místě, které nemá vliv na celkovou funkčnost a napjatost součásti
- **nedestruktivní:** nedochází k žádnému narušení celistvosti součásti, což je na druhou stranu ovlivněno vysokými nároky na měřicí zařízení [35][36]

Tabulka 7: Přehled nejdůležitějších nedestruktivních metod [37]

Metoda	Hodnocená veličina	Druh napětí
Rtg. difrakce	Homogenní deformace mřížky	I, II
Neutronová difrakce	Homogenní deformace mřížky	I, (II)
Ultrazvuk	např. časový rozdíl rychlosti šíření příčných nebo povrchových vln	I, II, III
Magnetická	např. amplitudy Barkhasenova šumu	I, II, III

2.6.2.2 Dle principu měření

- mechanické
- fyzikální RTG
- fyzikální ultrazvuk
- elektrické
- magnetické
- akustické
- chemické [36]

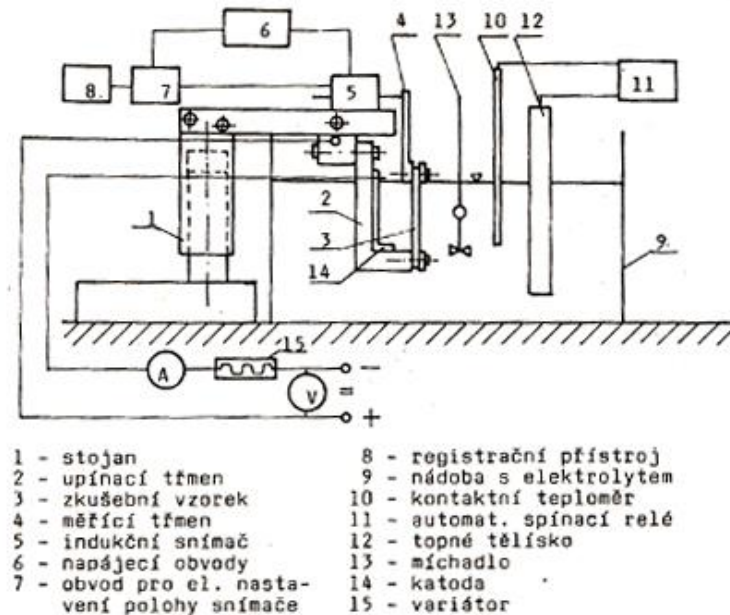
2.6.3 Elektrolytické odleptávání

Jedná se o mechanickou metodu. Tato metoda jako většina mechanickým metod je destruktivní.

Spočívá v kontinuálním měření deformace vzorku při postupném odleptávání povrchových vrstev materiálu z analyzované plochy. Smysl a velikost této deformace jsou úměrné rozložení zbytkových napětí v odleptané vrstvě.

Podle této metody se určuje velikost, gradient a smysl zbytkových pnutí. Funkce této metody je založena na plynulém elektrolytickém rozpouštění povrchové vrstvy vzorku, u něhož se napětí zjišťuje. Vzniklá deformace se automaticky registruje. Z ní se vypočte podle tvaru vzorku a jeho modulu pružnosti velikost napětí v příslušné hloubce pod povrchem.

Předností tohoto způsobu měření zbytkových pnutí je to, že umožňuje určování pnutí i pro materiály, kde např. rentgenický způsob selhává. Dále je přesná za podmínek pečlivého provedení. [37]



Obrázek 39: Schéma zařízení pro měření zbytkových pnutí pomocí elektrolytického odleptávání [37]

2.7 Tvrdost

Tvrdost je mechanická vlastnost, která je definována jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Zkoušky tvrdosti jsou rychlé a levné. Jedná se o nedestruktivní zkoušky, jejich výhodou je, že se mohou provádět na hotových výrobcích. [38][39][40]

2.7.1 Rozdělení zkoušek tvrdosti

- podle principu (vnikací, vrypové, odrazové a kyvadlové)
- podle rychlosti zatěžující síly (statické a dynamické)
- podle velikosti zatěžující síly (rozsah 0,1 mN až 500 N) a účelu měření [38]

Zkoušky dle velikosti zatěžující síly jde rozdělit

- zkoušky makrotvrdosti (síla > 10 N) zkouší se tvrdost materiálu jako celku
- zkoušky mikrotvrdosti (síla 0,1 N až 10 N)
- nanotvrdost (síla < 0,1 N) měří se tvrdost např. povlaků [38]

V oblasti měření tvrdosti se stále ještě lze setkat s údajem o velikosti zátěžné síly v kilopondech [kp], kde platí, že 1 kp = 9,81 N.

Tvrdost nelze jednoznačně definovat jako fyzikální veličinu, protože její hodnota závisí na zkušebních podmínkách, které se liší pro jednotlivé metody.

Nejčastěji se používají statické vnikací zkoušky (podle Rockwella, Vickerse a Brinella). Spočívají v pozvolném vtlačování tělesa vhodného tvaru (indentoru) do povrchu zkoušeného materiálu, v němž se vytvoří vtisk. [38][41][42]

2.7.2 Staticko-plastické zkoušky tvrdosti (vnikající)

2.7.2.1 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

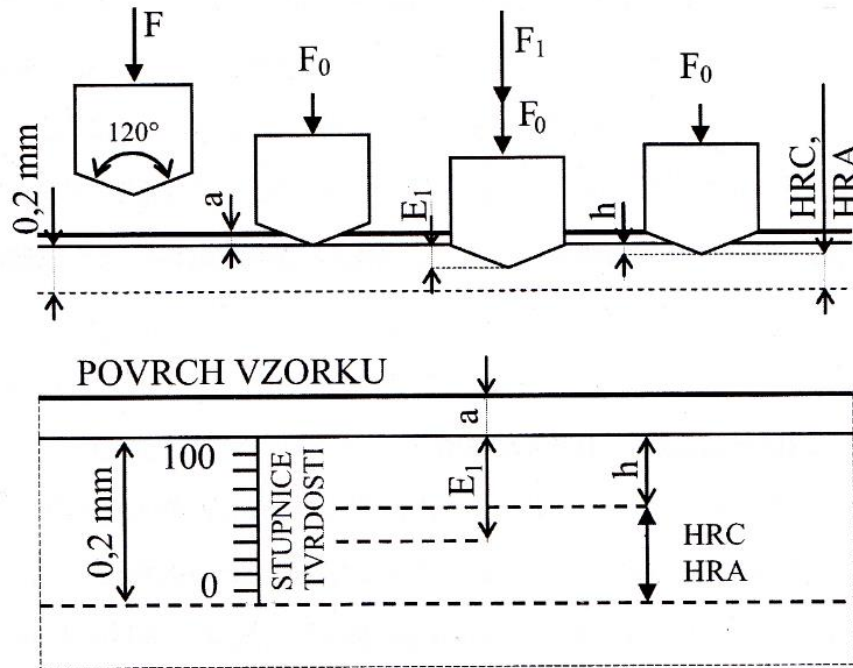
Princip spočívá ve vtlačování diamantového kuželu nebo kuličky z tvrdokovu do povrchu zkušební tělesa ve dvou krocích za předepsaných podmínek. Norma uvádí celkem 15 stupnic tvrdosti podle Rockwella, které se liší podle typu vnikacího tělesa a zkušebního zatížení.

Tabulka 8: Nejpoužívanější stupnice podle Rockwella [38]

Stupnice tvrdosti podle Rockwella	Značka tvrdosti	Typ vnikacího tělesa	Předběžné zkušební zatížení F_0 [N]	Přídavné zatížení F_1 [N]	Celkové zkušební zatížení F [N]	Oblast použití (tvrdost podle Rockwella)
A	HRA	diamantový kužel	98,07	490,3	588,4	20 až 88 HRA
B	HRB	kulička 1,587 mm	98,07	882,6	980,7	20 až 100 HRB
C	HRC	diamantový kužel	98,07	1373	1471	20 až 70 HRC

Určení tvrdosti dle Rockwella

Princip je patrný z obrázku 40. Po doteku hrotu na povrchu zkušební tělesa se hrot zatíží předběžným zkušebním zatížením F_0 a vnikne do hloubky a . Tím se odstraní vliv povrchové vrstvy a hloubkoměr na stupnici přístroje se nastaví do výchozí polohy. V dalším kroku se hrot přístroje zatíží přídavným zkušebním zatížením $F=F_0+F_1$ a hrot vznikne do hloubky E_1 .



Obrázek 40: Smluvní označení parametrů a schéma zatěžování při stanovení tvrdosti podle Rockwella (stupnice A, C) [38]

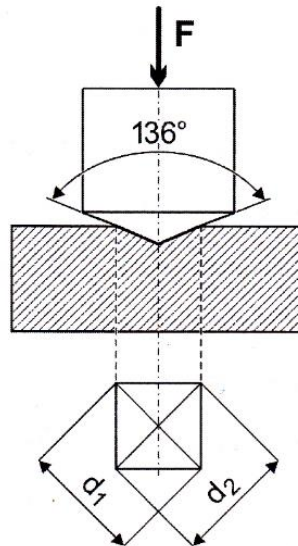
Po ustálení hloubkoměru se odlehčí hrot o zatížení F_1 a nechá se působit jen předběžné zatížení F_0 . Tím se hloubka E_1 zmenší o pružnou deformaci a hrot zůstane zatížený předběžným zatížením F_0 v plasticky deformovaném vtisku. Tvrdost dle Rockwella je dána rozdílem základní hloubky a hloubky trvalého vtisku po odlehčení na počáteční sílu.

Označení tvrdosti podle Rockwella

Tvrdost podle Rockwella se zapisuje hodnotou tvrdosti, za kterou následují písmena HR a označení použité stupnice, např. 48 HRC. [38][42]

2.7.2.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Princip zkoušky spočívá ve vlačování diamantového pravidelného čtyřbokého jehlanu do povrchu tělesa zkušebním zatížením F . Po odlehčení se změří délky úhlopříček vtisku d_1 a d_2 , viz obrázek 41 a vypočte se jejich aritmetický průměr d .



Obrázek 41: Smluvní označení parametrů a zatěžování při zkoušce tvrdosti dle Vickerse [38]

Tvrdot podle Vickerse se vypočítá jako poměr zátěžné síly a plochy vtisku

$$HV = 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad \text{Rovnice 12}$$

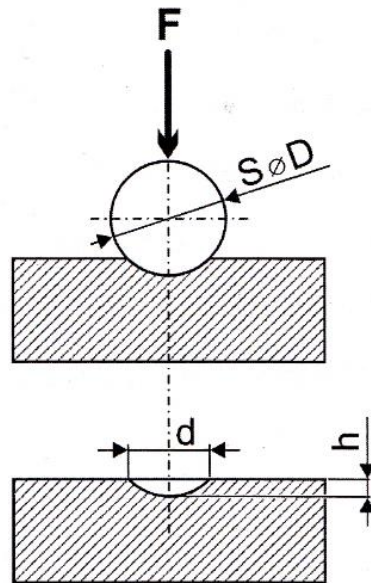
kde F [N] je zkušební zatížení a d [mm] je aritmetický průměr délek úhlopříček.

Označení tvrdosti podle Vickerse

Tvrdot podle Vickerse se zapisuje hodnotou tvrdosti, za kterou následují písmena HV a číslice charakterizující velikost zkušebního zatížení v kilopondech. Pokud byla použita jiná doba zatížení než 10 až 15 s, následuje za lomítkem ještě použitá doba zátěže v sekundách. [38][41][42]

2.7.2.3 Zkouška podle Brinella

Princip zkoušky spočívá ve vtačování tvrdokovové kuličky (dříve se používala také kalená, ocelová) o průměru D do povrchu zkoušeného materiálu působením zkušebního zatížení F viz. obrázek 42.



Obrázek 42: Smluvní označení parametrů a zatěžování při zkoušce tvrdosti podle Brinella [38]

Po odlehčení se změří průměr vtisku ve dvou navzájem kolmých směrech a vypočítá se střední průměr vtisku d .

Průměr kuličky D může být 10; 5; 2,5 a 1 mm, jeho hodnota se volí podle rozměrů zkušební tělesa. Jestliže to rozměry zkoušeného tělesa dovolují, přednostně se volí kulička o průměru 10 mm.

Zkušební zatížení F se musí volit tak, aby se průměry vtisku d nacházely mezi hodnotami $0,24D$ až $0,6D$.

Tvrdot podle Brinella se označuje HBW a vypočítá se jako poměr zátěžné síly a plochy vtisku.

$$HBW = 0,102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \text{Rovnice 13}$$

kde F [N] je zkušební zatížení, D [mm] je průměr kuličky a d [mm] je střední průměr vtisku.

Označení tvrdosti podle Brinella

Označení HBW předchází hodnota tvrdosti a za ním následují číslice charakterizující podmínky zkoušky v pořadí: průměr kuličky v milimetrech, zkušební zatížení v kilopondech. Pokud je doba působení zkušebního zatížení jiná než 10 až 15 s, následuje informace o době zátěže v sekundách. [38]

2.7.2.4 Srovnání vnikacích zkoušek tvrdosti

Každá ze tří dnes nejvíce rozšířených zkoušek tvrdosti má své opodstatnění a výhody pro určité případy. Zkouška Brinellova užívá velkých zatížení, a tedy velkých vtisků, což má určité výhody. Zkoušce se podrobuje větší množství materiálu, a tím se získávají lepší průměry. Proto se zvláště dobře hodí na kovy lité, které mají zpravidla hrubší a nestejněměnější krystalizaci. Druhou výhodou je, že nevyžaduje tak čisté obrobení povrchu, a že není tak citlivá na přesné dodržování správných zkušebních podmínek. Také indentor je levný a snadno nahraditelný. Hodí se dobře jako zkouška dílenská ke kontrole správné volby materiálu, tepelného zpracování apod. Hlavní význam zkoušky Rockwellovy je rychlost a jednoduchost provedení, takže se stala typickou metodou pro zkoušky hromadné. U nás je nejčastější zkouška diamantovým kuželem ke kontrole tepelného zpracování, a to jak na nástroje, tak i na části konstrukční. Ani tato metoda neklade zvláštní požadavky na bezvadné obrobení povrchu. Zvláště dobře se hodí Rockwellova metoda pro kontrolu při automatické výrobě. Zkouška Vickersova je vysloveně zkouškou laboratorní, vhodnou pro přesnější práce kontrolní, přijímací, výzkumné apod. Proto musí být povrch vzorku velmi čistě vyhlazen. Je stejně dobře použitelná pro kalené ocele, jako pro měkké kovy neželezné. Nehodí se však na kovy s hrubou krystalizací, protože jsou vtisky příliš malé. [43]

2.7.2.5 Přesnost vnikacích zkoušek tvrdosti

Nejpřesnější je svou podstatou zkouška Vickersova. Jestliže je tvrdoměr bezvadně udržován a pravidelně kontrolován, můžeme při zatížení aspoň 10 kg a provedení tří vtisků dosáhnout přesnosti u menších tvrdostí asi ± 2 ; s rostoucí tvrdostí stoupá nepřesnost až na asi ± 4 až 5. Při menších zatíženích se přesnost přiměřeně zmenšuje. U zkoušky Brinellovy je možno počítat u tří vtisků za podmínek 10/3 000/10 podle konstrukce stroje a pečlivosti měření s přesností ± 2 až 4. Při menších kuličkách a technických zkouškách méně. Různé přenosné tvrdoměry nedovolují přesnost větší než ± 10 . Metoda Rockwellova je již svou podstatou jen hrubší metodou technickou, u níž nelze spolehlivě počítat s větší přesností než asi ± 2 jednotky Rockwellovy stupnice u diamantového kužele a ± 3 jednotky u kuličky. Při malých tvrdostech jsou to již chyby značné. U automaticky pracujících strojů jsou poměry příznivější. [43][42]

2.7.3 Zkoušky mikrotvrdomosti

Název mikrotvrdomost se ustálil pro tvrdost určenou použitím zcela malých zatížení tak, aby vznikly vtisky nepatrné velikosti. Mikrotvrdomost nelze určovat obvyklými tvrdoměry, neboť vyžaduje nesrovnatelně větší přesnost jak při zatěžování, tak i při proměřování vtisku. K proměřování vtisku slouží přesná optika. Pro zkoušky mikrotvrdomosti jsou použitelné jedině vnikací metody s diamantovým indentorem. Zkouškami mikrotvrdomosti jsou Vickersova, Knoopova a Berkovičova metoda. Měření mikrotvrdomosti se používá k vyhodnocování tvrdosti velmi slabé vrstvy (povlaky) nebo i tvrdost jednotlivých zrn mikrostruktury materiálu. Problémem měření mikrotvrdomosti je drsnost měřeného povrchu a měření je výrazně ovlivněno vzájemnou polohou indentoru a povrchu. [43]

2.7.3.1 Zkouška mikrotvrdomosti dle Vickerse

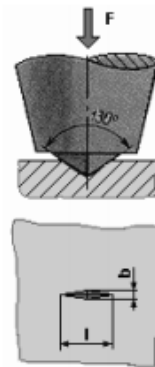
Zkouška se provádí stejně jako klasická zkouška tvrdosti dle Vickerse. Je zde pouze rozdíl ve velikosti zatížení. Zatímco při měření tvrdosti se používá zatížení od 1,96 N (0,2 kp) výše, měření mikrotvrdomosti se stanovuje zatížením v rozmezí 0,098 N až 1,96 N (0,01 kp až 0,2 kp). [38][43]

2.7.3.2 Zkouška mikrotvrdomosti dle Knoopa

Indentorem je čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovými úhly 130° a $172,5^\circ$ (poměr úhlopříček je 7:1). Tvrdost se vyhodnocuje měřením délky delší úhlopříčky vtisku. [43]

$$HK = 1,4509 \cdot \frac{F}{l^2}$$

Rovnice 14

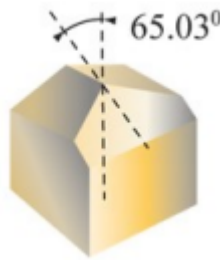


Obrázek 43: Zobrazení vtisku při zkoušce tvrdosti dle Knoopa[43]

Otisky u metody dle Knoop jsou při stejném zatížení téměř trojnásobně delší a mělčí než u zkoušky dle Vickerse. [43]

2.7.3.3 Zkouška mikrotvrdosti dle Berkoviče

Indentorem je trojboký diamantový jehlan s velikostí úhlu $65,03^\circ$ nebo $65,27^\circ$ mezi osou indentoru a stěnou indentoru viz. obrázek 44, tvrdost se vyhodnocuje opět měřením délky úhlopříček.



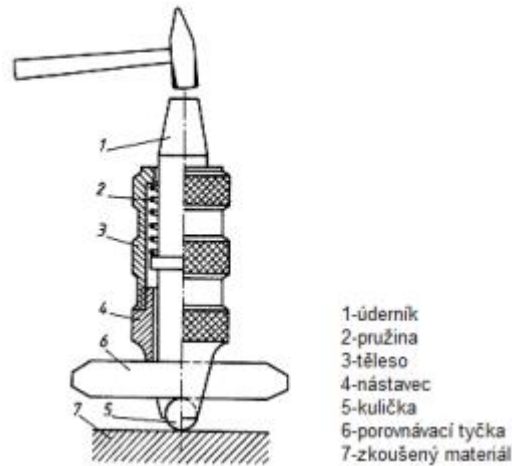
Obrázek 44: Indentoru dle Berkoviče [43]

Všechny zkoušky se provádí na povrchu, který je hladký, bez okujené vrstvy, cizích tělísek a bez mazadel. Obecně platí, že při těchto zkouškách na protilehlé straně zkušebního tělesa nesmí být po zkoušce patrné viditelné stopy deformace. [42][43]

2.7.4 Dynamicko – plastické zkoušky tvrdosti

2.7.4.1 Poldi kladívko

Mobilní tvrdoměrné zařízení, často používané ve výrobních procesech. Součástí kladívka je etalonová tyč vyrobená z materiálu o známé tvrdosti. Zkouška se provádí úderem dílenského kladiva do Poldi kladívka, kdy dojde k současnému vtlačení vnikacího tělíska jak do měřeného materiálu, tak do etalonové tyče. Na základě známé tvrdosti etalonové tyče dochází k porovnání rozměrů vtisku do etalonové tyče a měřeného vzorku a určení tvrdosti pomocí tabulek. Vnikajícím tělískem je ocelová kalená kulička. Zatížení je libovolné, vyvolané ručně úderem dílenského kladiva. [42][43]



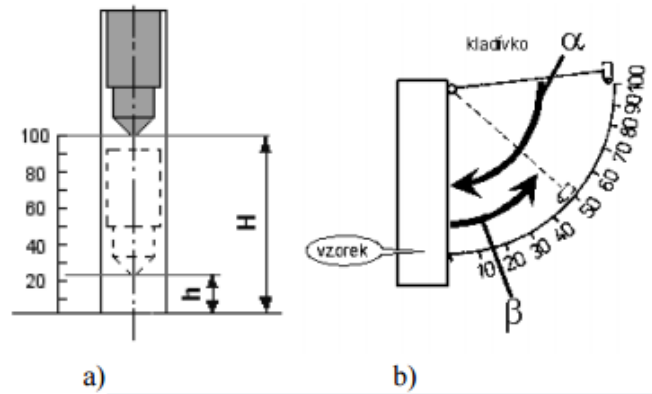
Obrázek 45: Schematický obrázek provedení měření tvrdosti Poldi kladívkem [43]

2.7.4.2 Baumannovo kladívko

Mobilní tvrdoměrné zařízení často používané ve výrobních procesech. Podstata zkoušky spočívá v odjištění pružiny, která je součástí kladívka. Úderem kladívka na vnikající tělísko, kterým je ocelová kalená kulička, dojde ke vtlačení do povrchu měřeného tělesa. Tvrdost se určuje jako poměr zatížení a kolmému průmětu vtisku, získaného ze změřené průměrné velikosti průmětu vtisku. Síla nárazu je vždy stejná a známá. Na tomto principu měření je založena většina přenosných dynamických tvrdoměrů. [42][43]

2.7.5 Dynamicko – elastické zkoušky tvrdosti

Podstata těchto zkoušek je založena na odrazu vnikacího tělíska od měřeného materiálu. Vnikající těleso je pouštěno z určité výšky H – Shoreho skleroskop, nebo určitého úhlu α – Durosokop, a tvrdost se určuje z naměřené výšky h nebo úhlu β , do kterých míst vnikající těleso vystoupá viz. obrázek 46. Shoreho skleroskopem se měří vzorky v horizontální poloze. Durosokopem jsou měřeny plochy ve svislé poloze. Tyto metody nejsou ovšem už tak spolehlivé a jsou tedy nepřesné. [42][43]



Obrázek 46: Schematický obrázek provedení měření tvrdosti: a) Shoreho skleroskopem
b) Durosopem [43]

2.7.6 Vrypové zkoušky tvrdosti

Tyto zkoušky se těžko začleňují do jedné ze tří výše uvedených kategorií, proto jsou zde uvedeny samostatně. Dnes jsou používány jen pro tvrdé a křehké materiály, jako jsou sklo a porcelán. V technické praxi se používá zkouška podle Martense. Podstata této zkoušky spočívá v podobě přitlačování kuželového diamantového hrotu měnitelným tlakem na leštěný povrch měřeného vzorku, který se pohybuje danou rychlostí. Mírou tvrdosti je pak síla F , potřebná ke vzniku vrypu širokého 0,01 mm. [42][43]

2.8 Metalografie

Optickou metalografií rozumíme pozorování metalografických vzorků pomocí optických mikroskopů. Metalografický vzorek je vzorek připravený ke studiu struktury jeho materiálu, která není obvykle bez předchozí úpravy sledovaného vzorku pozorovatelná. K jejímu zviditelnění je nutné provést sérii kroků. Příprava metalografických vzorků má svá pravidla, která musí být dodržena, aby nedošlo ke změně struktury vzorku během jeho přípravy. Slouží například k identifikaci a zjištění poměrného zastoupení metalurgických fází u kovů, měření mikrotvrdosti materiálu, případně jeho jednotlivých fází atd. Konkrétní analýzy či pozorovací techniky mohou vyžadovat specifický postup přípravy vzorků a rovněž různé druhy materiálů není možné připravovat stejným způsobem. [44]

2.8.1 Používané definice

- **Výbrus** je plocha na metalografickém vzorku, která je připravena k metalografické analýze.
- **Tenké řezy** jsou určeny k pozorování průchodnosti světla. [38][45]

2.8.2 Postup přípravy metalografických výbrusů

2.8.2.1 Odběr vzorku

Vzorky z měkkých a snadno obrobitelných materiálů jsou obvykle odebrány za použití řezání či odfrézování. Tvrdé a těžko obrobitelné materiály se dělí odlamováním nebo rozbrušováním pod chladicí kapalinou nebo pomocí elektrojiskrových řezaček. Při odběru vzorku nesmí dojít k mechanickému ani tepelnému ovlivnění jeho struktury. Vzorek proto nesmí být plasticky deformován a jeho teplota nesmí dosáhnout teploty případných fázových transformací.

Velikost vzorku volíme podle možností mikroskopu, pomocí něhož jej budeme následně pozorovat, a zohledňujeme i plánovaný postup přípravy vzorku. [38][45]

2.8.2.2 Preparace vzorku

V případě, že je vzorek tak malých rozměrů, že by nebylo pohodlné a především bezpečné jej držet při ruční přípravě, přistupuje se k zalévání vzorku za studena nebo jeho zalisování za tepla. Tato procedura je rovněž nezbytná při přípravě vzorků, u nichž je požadavek na dodržení ostroty hran nebo zachování povrchových vrstev. Důvodem preparace vzorků pro poloautomatickou přípravu je zajištění jednotného tvaru vzorků, který je určen tvarem držáku přístroje. [38][45]

2.8.2.3 Broušení vzorku

Broušení vzorků má za cíl minimalizovat povrchové nerovnosti vzorku. Lze jej provádět ručně nebo mechanizovaně. [38][45]

2.8.2.4 Leštění vzorku

Leštění je dalším krokem při přípravě kvalitního výbrusu. Na rozdíl od broušení materiál z povrchu vzorku neubývá, ale dochází pouze k deformaci vrcholů povrchové

drsnosti, příp. jen minimálním úbytkům. V metalografii se leštění provádí mechanicky nebo elektrolyticky. [38][45]

2.8.2.5 Leptání vzorku

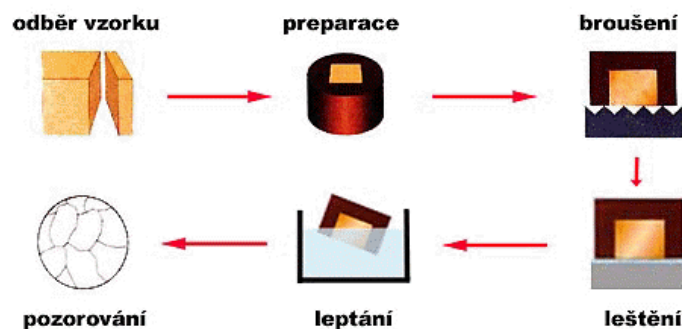
Leptání vzorků slouží k vyvolání jejich mikrostruktury. V závislosti na materiálu výbrusu a konkrétních požadavcích pro následné pozorování je možné aplikovat různé metody leptání vzorků. Leptání je nejcitlivější operací při přípravě metalografických vzorků. Každý materiál vyžaduje speciální techniku leptání včetně volby leptadla.

Druhy leptání

- chemické leptání
- plošné leptání
- selektivní leptání
- elektrolytické leptání
- tepelné leptání [38][45]

2.8.3 Hodnocení metalografických vzorků

Metalografické vzorky lze hodnotit makroskopicky nebo mikroskopicky v neleptaném nebo naleptaném stavu (naleptáním se zviditelní mikrostruktura). Při makroskopickém hodnocení jsou vzorky pozorovány ve skutečné velikosti nebo při malém zvětšení. K mikroskopickému pozorování se obvykle používají světelné mikroskopy (zvětšení do 1 000x), nově také laserové konfokální mikroskopy (zvětšení do 10 000x). Je-li požadováno vyšší zvětšení, přechází se k elektronové mikroskopii (vzorek musí být vodivý). [38][45]



Obrázek 47: Schéma přípravy metalografického výbrusu [45]

3 Experiment

3.1 Úvod

Cílem experimentu je zanalyzování kvality povrchové vrstvy lopatkové součásti axiálního kompresoru turbovrtulového motoru (blisk 1°). V současné době není aplikována žádná zpevňovací technologie a konečnou operací je frézování v 5-ti osách ze zápusťkového výkovku. Dalším cílem je zanalyzování kvality povrchové vrstvy destiček, na které je aplikována jedna z technologií zpevnění povrchu. Destičky jsou ze stejného materiálu, z kterého je vyroben blisk 1°. Jsou tedy vyrobeny ze slitiny titanu Ti-6Al-4V. Zkoumány budou dvě technologie zpevnění povrchu Shot peening (SP) a Laser peening (LSP). Jedná se o technologie, které by mohly být použity na blisk 1° za účelem zvýšení živostnosti. Díky vysoké ceně dílu blisku 1° a uzpůsobení technologií pro lopatkové díly nejsou zpevňovací technologie aplikovány a poté zkoumány přímo na blisku 1°, ale jsou aplikovány a zkoumány na destičkách. Pro zanalyzování povrchové vrstvy byly měřeny parametry drsnosti, zbytková napětí odleptávací metodou, mikrotvrdość dle Vickerse a byla zkoumána metalografie.

3.2 Vzorky

K dispozici byl jeden blisk 1°. Na blisku 1° byla měřena zbytková napětí, mikrotvrdość a byla vyhodnocena metalografie. Dále byly k dispozici destičky ze stejného materiálu, z kterého je vyroben blisk 1°. Destičky byly frézovány za obdobných podmínek jak blisk 1°. Poté byly na destičky aplikovány 2 technologie zpevnění povrchu SP a LSP. Některé destičky zůstaly ve frézovaném stavu a byl hodnocen základní stav drsnosti povrchu. U destiček s aplikací zpevňovací technologie byla vyhodnocena zbytková napětí, mikrotvrdość, drsnost povrchu a metalografie. U vzorků s aplikací zpevňovací technologie LSP byl navíc měřen profil povrchu.

3.2.1 Parametry zpevňovacích technologií

3.2.1.1 Parametry SP

Pro aplikaci technologii SP bylo použito lité tryskací médium ASR 170. Tryskací médium ASR 170 má tvrdost v rozsahu 45 až 52 HRC a jedná se o kuličky vyráběné litím. Tlak vzduchu v trysce byl nastaven na 1,7 bar a průtok média byl $7 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$. Pokrytí SP plochy bylo 200 %.

3.2.1.2 Parametry LSP

Pro aplikaci technologie LSP byl použit laser s průměrem paprsku 1,5 mm a byla nastavena energie jednoho pulzu na 2,5 J při době trvání pulzu 10 ns. Překrytí LSP plochy je 90,5 % a hustota pulzů je $5\,000 \text{ pulzů}\cdot\text{cm}^{-2}$. Z těchto parametrů se dá vypočítat hustota výkonu, která vychází $1,5 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$.



Obrázek 48: Frézované destičky a destičky po aplikaci SP před rozřezáním



Obrázek 49: Nařezané destičky pro měření zbytkových napětí zleva frézované destičky, destičky po SP a destičky po LSP



Obrázek 50: Frézovaný blisk 1°

3.3 Drsnost a profil povrchu

Měření bylo provedeno ve škole. V laboratoři metalografie na profiloměru Mahr XCR 20.

3.3.1 Měřené vzorky

Frézované destičky

Měření drsnosti nebylo provedeno na frézovaném dílu blisku 1°, ale bylo provedeno na destičce, která byla ze stejného materiálu a byla obráběna za obdobných podmínek.

- vzorky F1, F2 a F3

Destička po aplikaci SP

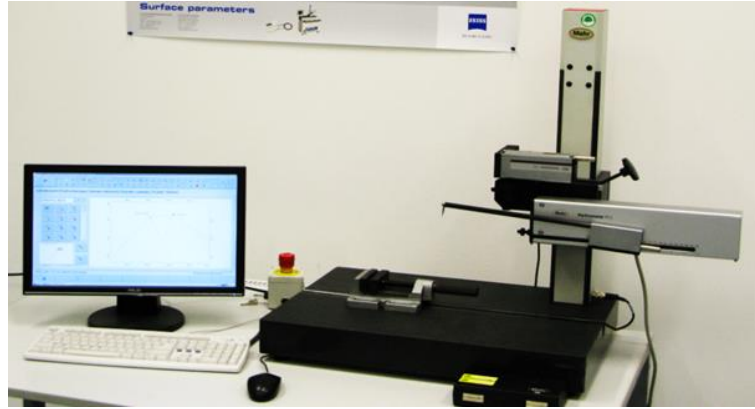
- vzorky J1, J2 a J3

Destička po aplikaci LSP

- vzorky 1A a 2A

3.3.2 Použité zařízení

- profiloměr Mahr XCR 20



Obrázek 51: Profiloměr Mahr XCR 20 [47]

3.3.3 Měřené parametry

- průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a
- největší výška profilu R_z
- největší výška nerovností R_{max}
- celková výška profilu R_t
- největší výška výstupku profilu R_p
- největší hloubka prohlubně profilu R_v
- průměrná šířka prvků profilu R_{Sm}

3.3.4 Naměřené hodnoty

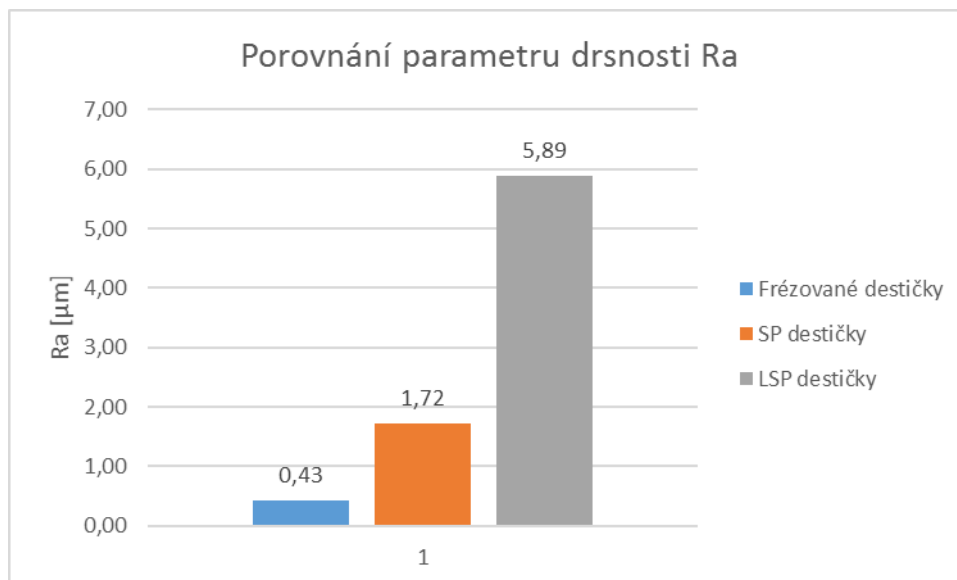
Výsledkem měření každého vzorku, je protokol z měření. Ukázky protokolu měření drsnosti i profilu povrchu, jsou vloženy v příloze číslo 1 a 2. V příloze číslo 1 jsou zpracovány i všechna měření do tabulek. Zde je uvedena tabulka průměrných hodnot a do sloupcového grafu jsou zpracovány 2 parametry drsnosti (R_{max} a R_a) pro názorné srovnání.

3.3.5 Zhodnocení výsledků

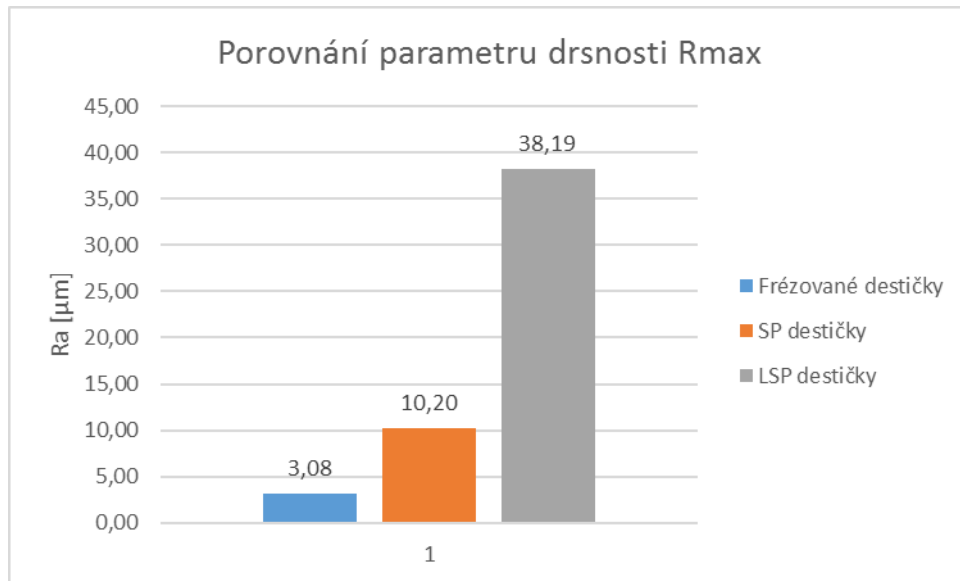
3.3.5.1 Drsnost povrchu

Tabulka 9: Porovnání naměřených parametrů drsnosti

Parametr [μm]	Frézované destičky	SP destičky	LSP destičky
Ra	0,43	1,72	5,89
Rz	2,54	8,17	32,69
Rmax	3,08	10,20	38,19
Rt	3,37	10,38	39,56
Rp	1,27	4,28	16,51
Rv	1,28	3,89	16,18
RSm	185	269	198



Obrázek 52: Graf porovnání parametru drsnosti Ra

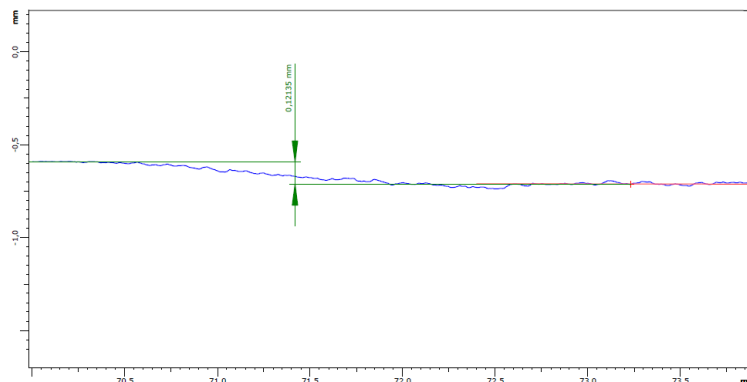


Obrázek 53: Graf porovnání parametru drsnosti Rmax

Z grafů jednoznačně vyplývá, že nejhorší povrch je u vzorků po aplikaci zpevňovací technologie LSP. Po aplikaci zpevňovací technologie SP je zhoršení povrchu oproti frézovanému stavu také velmi výrazné.

3.3.5.2 Profil povrchu u destiček po aplikaci LSP

U vzorků po aplikaci LSP byla měřena nejen drsnost povrchu i profil povrchu.



Obrázek 54: Naměřený profil povrch vzorku LSP 1A

Jelikož jen přejetím prstu po povrchu byl cítit jasný přechod mezi oblastí bez aplikace LSP a oblastí kde byla aplikována technologie LSP, tak byl změřen profil povrchu, pomocí záznamu z konturografu. Na křivku povrchu byly napojeny dvě rovnoběžné přímky a kolmá vzdálenost těchto přímek je zjišťovaný propad materiálu. U vzorku LSP 1A byl naměřen propad o 0,12 mm. U vzorku LSP 2A byl naměřen propad o 0,07 mm.

3.4 Zbytkové pnutí

Měření bylo provedeno v laboratoři FS ČVUT v Praze pro zjišťování zbytkových napětí. Byla použita metoda elektrolytického odleptávání vzorku. Tuto metodu vyvinul doc. Ing. Ferdinand Neckář, CSc. a za její další aplikací na lopatkové díly stojí doc. Ing. Jindřich Kafka, CSc.

3.4.1 Příprava vzorků

Vzhledem k technologickým vlastnostem titanových slitin a nutnosti bezsilového vyřezání vzorku vhodných rozměrů bylo zvoleno drátové řezání, které bylo provedeno externí firmou.

3.4.2 Měřené vzorky

Frézovaná lopatka

- vzorky 1M, 2M, 4M, 5M, 11M, 12M, 16M, 18M a 21M
- vzorky 6R, 8R, 9R, 10R, 13R, 14R, 15R, 19R a 20R

Destička po aplikaci SP

- vzorky J1A, J1B, J2A, J2B, J3A a J3B

Destička po aplikaci LSP

- vzorek LSP B1 a LSP B2

3.4.3 Použité zařízení a přípravky

- soustava zařízení pro odleptávání
- speciální držák na vzorky
- stolní počítač
- posuvné měřítko
- mikrometr
- lepicí páska
- vosk
- indukční plotýnka
- technický benzín

3.4.4 Podstata metody

Zbytkové napětí se vyhodnocuje z deformace uvolněné při odleptávání vymezené plochy. Elektrolytické rozpouštění probíhá kontinuálně na jedno upnutí za současného

snímání deformace. Dosažená hloubka pod povrchem se řídí časem rozpouštění. Závislost deformace v čase je nejprve převedena na průběh deformace v závislosti na hloubce pod povrchem. Přepočet deformace na zbytková napětí se provede pomocí základních vztahů teorie pružnosti a pevnosti.

3.4.5 Postup měření

1. Oblepit měřený vzorek lepicí páskou kolem místa odleptání.
2. Upevnit měřený vzorek do speciálního držáku pro měření.
3. Nanést vosk na vzorek a na držák v okolí vzorku. Vosk se nenanáší na místo, které chceme odleptat. Vosk i lepicí páska slouží jako ochrana před odleptáním.
4. Po zaschnutí vosku se držák připevní na zařízení pro měření zbytkového pnutí a nanese vosk pro ochranu. Dále musíme nastavit mezeru mezi čidlem a držákem (ideální mezera je 1 až 2 mm).
5. Vosk se musí nechat dostatečně vychladnout. Jelikož měřící zařízení je velmi citlivé na jakoukoliv deformaci.
6. Po vychladnutí můžeme vzorek ponořit do připravené nádoby.
7. Vypneme odvětrávání a snažíme se minimalizovat jakékoliv otřesy.
8. Zapneme záznam měření.
9. Pokud nedochází na záznamu k deformaci (vyrovnané teplota a žádné otřesy), tak můžeme nastavit parametry na zdroji napětí a proudu a poté ho zapnout. Po zapnutí dochází k odleptávání.
10. Po skončení měření musíme vzorek očistit, zvážit a změřit rozměry odleptané plochy.



Obrázek 55: Pracoviště na měření zbytkového pnutí

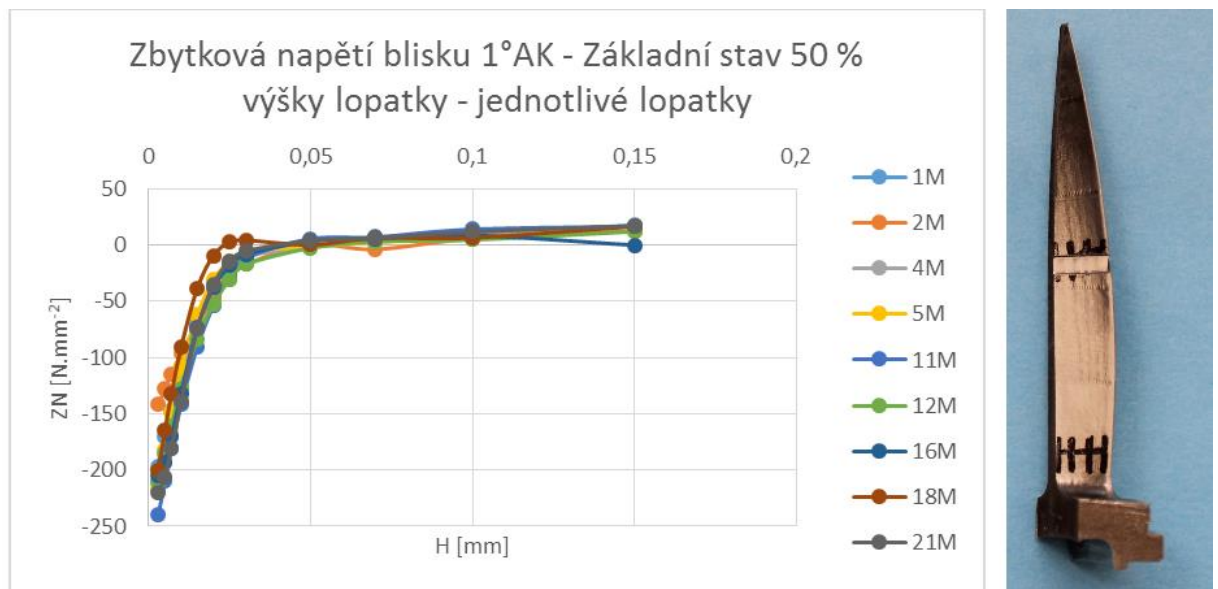
3.4.6 Naměřené hodnoty

Vzhledem k velkému počtu naměřených dat, jsou přiloženy jen už finální grafy závislosti zbytkového napětí na hloubce. Ukázka grafu závislosti deformace na čase, jež je výstupem z měření zbytkových napětí a lze jej sledovat přímo při měření je vložena v příloze číslo 3. V příloze číslo 3 je také sumarizace výsledků zbytkových pnutí v jednotlivých hloubkách pro všechny měřené vzorky.

3.4.6.1 Lopatky blisku 1°

Měření lopatek axiálního kompresoru probíhalo v 50 % výšky lopatky a v 10 % výšky lopatky. Tyto místa by měla být podle informací nejkritičtější. V blízkosti vetknutí, v 10 % výšky lopatky, je zakrytí okolní neleptané plochy obtížnější a hrozí vznik nerovnoměrných okrajů a nerovnoměrného rozpouštění při hraně vzorku. Tento problém se projevil u dvou vzorků (6R a 10R). Díky této skutečnosti je tedy vyhodnoceno 9 měření zbytkových pnutí v 50 % výšky lopatky a 7 měření v 10 % výšky lopatky.

V 50 % výšky lopatky:

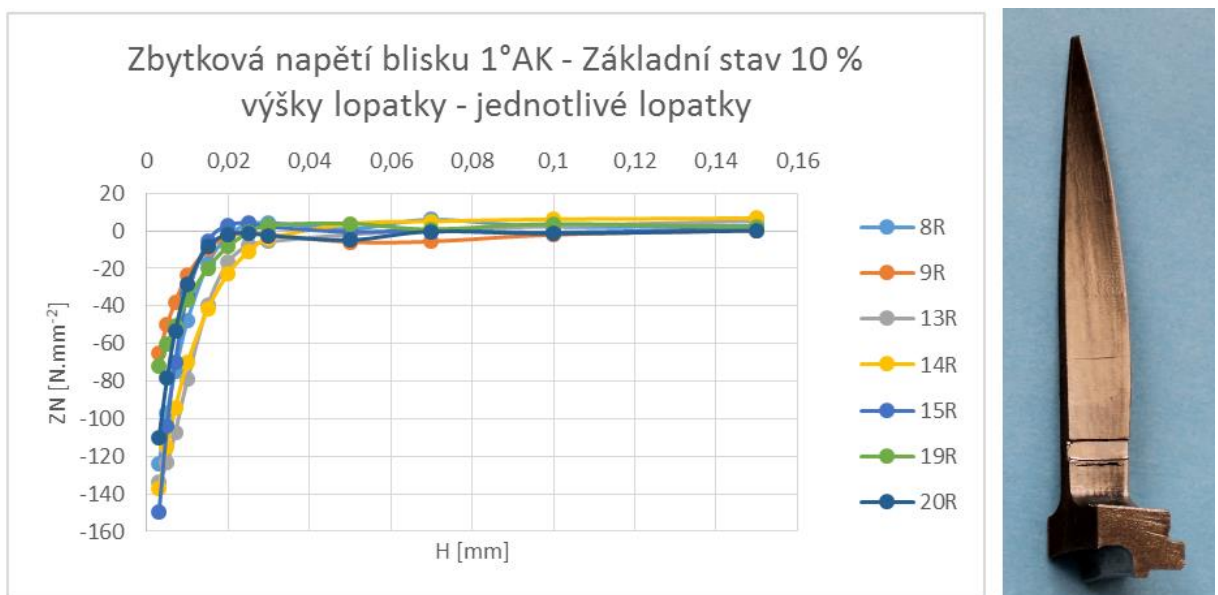


Obrázek 56: Zbytková napětí blisku 1° – jednotlivé lopatky a odleptaná plocha v 50 % výšky lopatky

U všech vzorků byla naměřena tlaková zbytková pnutí. V těsné blízkosti povrchu v hloubce 0,005 mm bylo naměřeno zbytkové pnutí v rozsahu

-210 N.mm⁻² až -128 N.mm⁻². Průměrná hodnota zbytkových napětí z 9 měření v hloubce 0,005 mm vychází -181 N.mm⁻². S rostoucí hloubkou zbytková napětí výrazně klesají. Například v hloubce 0,015 mm bylo naměřeno zbytkové pnutí v rozsahu -42 N.mm⁻² až -6 N.mm⁻². Průměrná hodnota zbytkových napětí v hloubce 0,015 mm vychází -20 N.mm⁻². Přechod zbytkových napětí z tlakových na velmi nízká tahová je v hloubce 0,025 až 0,050 mm. Průměrná hloubka přechodu je 0,045 mm. V hloubce 0,15 mm byla zjištěna zbytková napětí v rozmezí +12 až +18 N.mm⁻² (průměrně +16 N.mm⁻²).

V 10 % výšky lopatky:

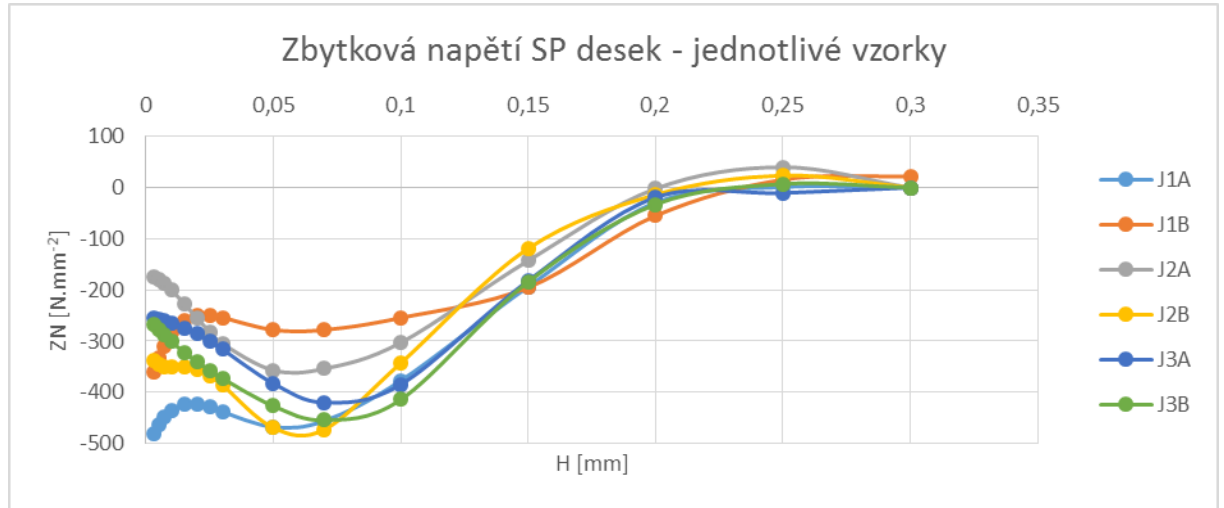


Obrázek 57: Zbytková napětí blisku 1° – jednotlivé lopatky a odleptaná plocha v 10 % výšky lopatky

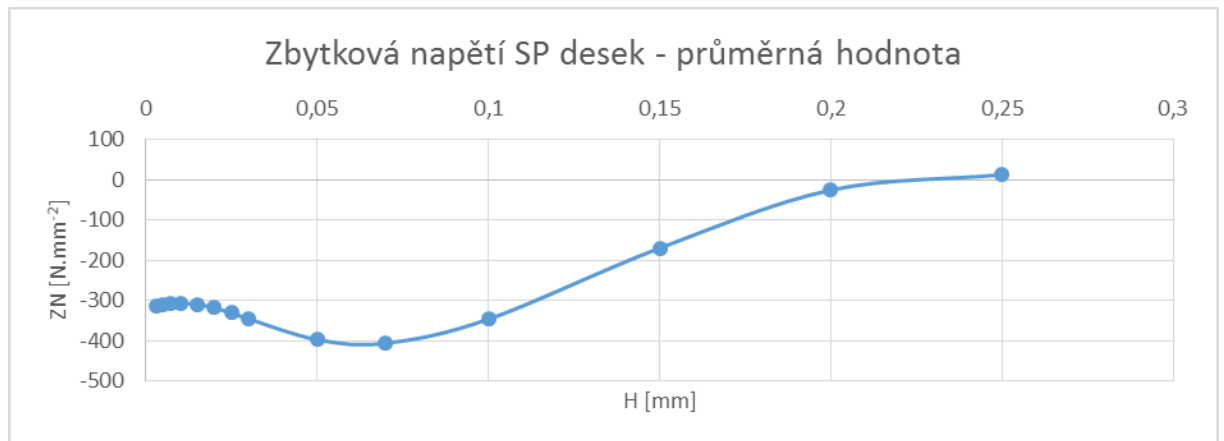
Také v 10 % výšky lopatky bylo naměřeno u všech vzorků tlakové zbytkové pnutí. V těsné blízkosti povrchu v hloubce 0,005 mm bylo naměřeno zbytkové pnutí v rozsahu -123 N.mm⁻² až -50 N.mm⁻². Průměrná hodnota zbytkových napětí ze 7 měření v hloubce 0,005 mm vychází -90 N.mm⁻². S rostoucí hloubkou zbytková napětí výrazně klesají. Například v hloubce 0,015 mm bylo naměřeno zbytkové pnutí v rozsahu -91 N.mm⁻² až -38 N.mm⁻². Průměrná hodnota zbytkových napětí v hloubce 0,015 mm vychází -71 N.mm⁻². Přechod zbytkových napětí z tlakových na velmi nízká tahová je v hloubce 0,020 až 0,050 mm. Průměrná hloubka přechodu je 0,030 mm. V hloubce 0,15 mm byla zjištěna zbytková napětí v rozmezí 0 až +7 N.mm⁻² (průměrně +16 N.mm⁻²).

3.4.6.2 SP destičky

Bylo měřeno 6 destiček s aplikací zpevňovací technologie SP. Tloušťka destiček byla přibližně 4 mm a šířka 8 mm.



Obrázek 58: Zbytková napětí SP destiček - jednotlivé vzorky



Obrázek 59: Zbytková napětí SP destiček - průměrná hodnota

Také u destiček, na které byla aplikována zpevňovací technologie SP, byla naměřena u všech vzorků tlaková zbytková pnutí. V těsné blízkosti povrchu v hloubce 0,005 mm bylo naměřeno zbytkové pnutí v rozsahu -463 N.mm⁻² až -181 N.mm⁻². Průměrná hodnota zbytkových napětí z 6 měření v hloubce 0,005 mm vychází -313 N.mm⁻². Tlaková pnutí se s hloubkou mírně zvyšují až do hloubky 0,07 mm, kde průměrná hodnota vychází -406 N.mm⁻². Za hloubkou 0,07 mm se tlaková rovnoměrně snižují. Například v hloubce 0,015 mm bylo naměřeno zbytkové pnutí v rozsahu -423 N.mm⁻² až -227 N.mm⁻². Průměrná hodnota zbytkových napětí v hloubce 0,015 mm vychází -309 N.mm⁻². Přejít zbytkových napětí z tlakových na velmi nízká

tahová je přibližně v hloubce 0,22 mm. Hloubka zpevnění povrchu po aplikaci zpevňovací technologie SP je u naměřených i nalezených výsledků velice podobná. U nalezených výsledků je maximální hodnota tlakového napětí znatelně větší, přibližně dvojnásobně, ale maximální hodnota tlakového napětí vychází přibližně podobně. Rozdílnost maximální hodnoty tlakových pnutí může být jednak příčinou lehce odlišných parametrů zpevňovací technologie SP, ale také tím, že měření zbytkových napětí bylo u nalezených výsledků zjištěno pomocí rentgenografické difrakční metody.

3.4.6.3 LSP destičky

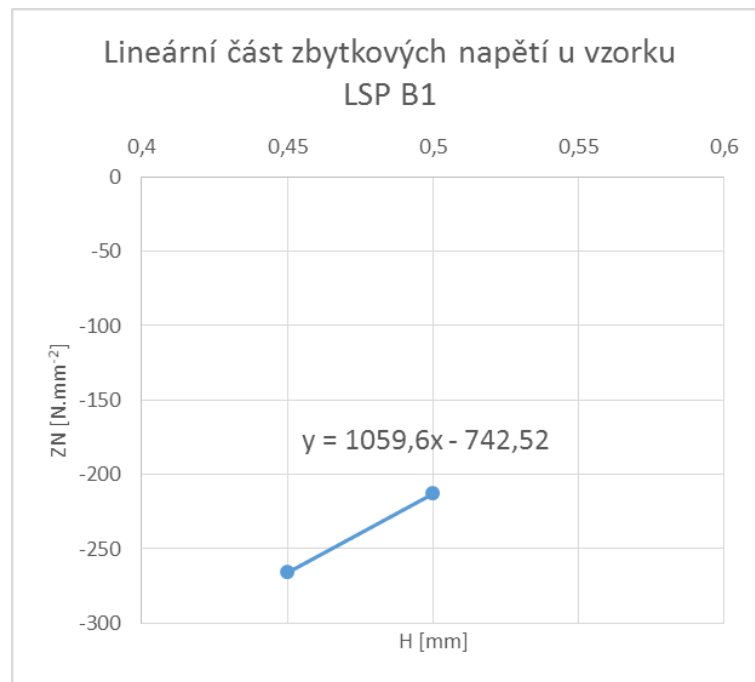
U destiček s aplikací zpevňovací technologie LSP byl průběh zbytkového napětí měřen na dvou destičkách. Tloušťka destiček byla přibližně 4 mm a šířka 8 mm.

Jelikož u LSP vzorků zasahují tlaková zbytková napětí do značné hloubky, přibližně 0,6 až 0,9 mm, je odleptávání do takové hloubky velice obtížné. Takto musela být hodnota přechodu tlakových zbytkových napětí na tahová dopočítána.

Maximální hloubka odleptané plochy byla přibližně 0,5 mm. Při překročení této hloubky dochází k nerovnoměrnému odleptávání. Díky tomu už není křivka záznamu deformace hladká, ale začínají se na ní tvořit výstupky. Jelikož křivka po dosažení maximálního tlakového napětí klesala rovnoměrně, bylo usouzeno, že bude lepší odleptávání zastavit a hodnotu přechodu dopočítat.

Příklad výpočtu přechodu

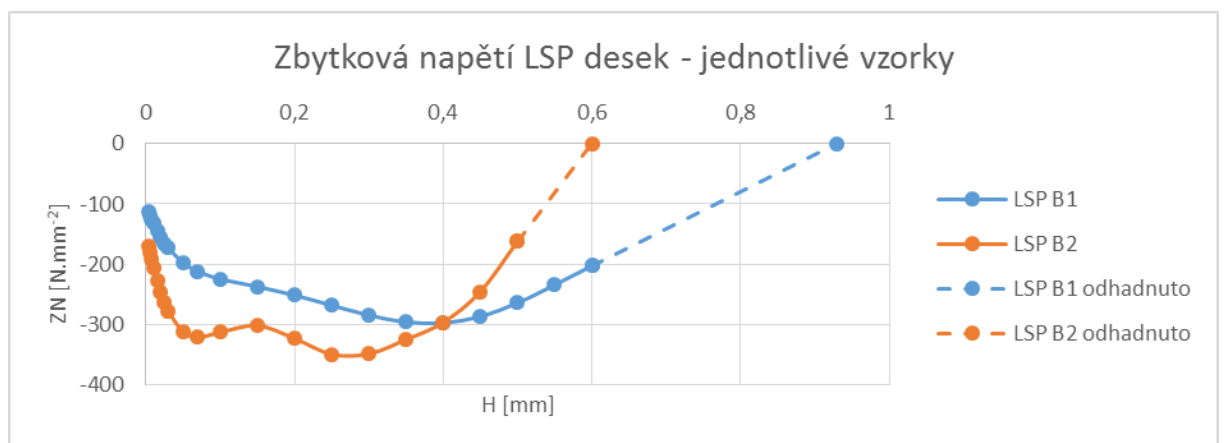
Lineární část křivky vyneseme do samostatného grafu, pomocí rovnice této křivky se dopočítá průsečík křivky s osou x. Vypočítaná hodnota je tedy teoreticky přechodem tlakových napětí do tahových napětí.



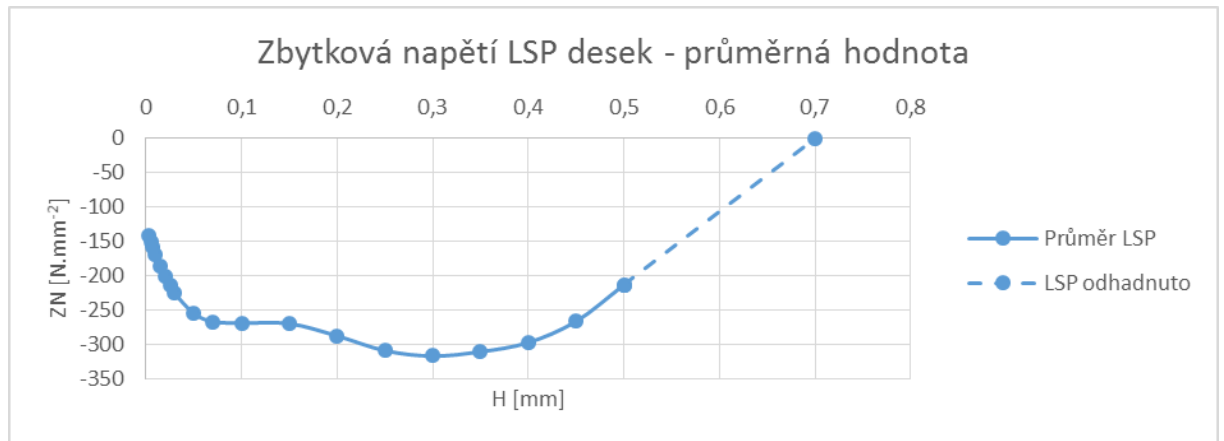
Obrázek 60: Lineární část zbytkových napětí u vzorku LSP B1

$$y = 1059,6x - 742,52 \rightarrow x = \frac{y + 742,52}{1059,6} = \frac{0 + 742,52}{1059,6} = 0,93 \text{ mm} \quad \text{Rovnice 15}$$

Příklad výpočtu je uveden pro vzorek LSP B1, ale obdobně se dopočítala hodnota přechodu pro vzorek LSP B2. Hodnota přechodu pro vzorek LSP B2 vyšla 0,6 mm.



Obrázek 61: Zbytková napětí LSP destiček - jednotlivé vzorky

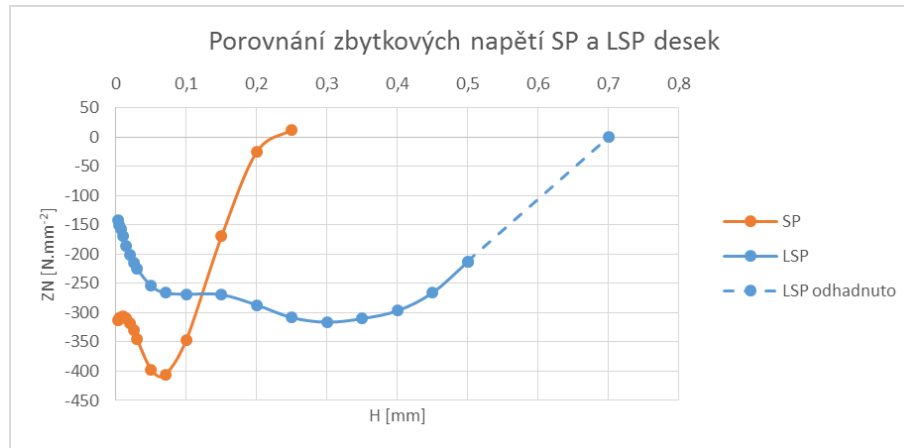


Obrázek 62: Zbytková napětí LSP destiček - průměrná hodnota

Také u destiček, na které byla aplikována zpevňovací technologie LSP, byla u obou měřených vzorků naměřena tlaková zbytková pnutí. V těsné blízkosti povrchu v hloubce 0,005 mm bylo naměřeno zbytkové pnutí -181 N.mm^{-2} a -120 N.mm^{-2} . Průměrná hodnota zbytkových napětí v hloubce 0,005 mm tedy vychází -150 N.mm^{-2} . Tlaková pnutí se s hloubkou zvyšují. Maximální tlakové napětí bylo u prvního vzorku naměřeno v hloubce 0,4 mm a naměřená hodnota tlakového napětí byla -297 N.mm^{-2} . U druhého vzorku bylo maximální tlakové pnutí naměřeno v hloubce 0,3 mm. Naměřená hodnota tlakového napětí byla -316 N.mm^{-2} . Za tímto maximem zbytkové napětí začíná lineárně klesat. Například průměrná hodnota zbytkových napětí v hloubce 0,45 mm vychází -266 N.mm^{-2} . Jak už bylo, uvedeno přechod zbytkových napětí z tlakových na tahová, musel být odhadnut. U prvního vzorku přechod zbytkových napětí vychází přibližně v hloubce 0,9 mm a u druhého vzorku v hloubce 0,6 mm. Při porovnání s nalezenými výsledky, kde byla technologie LSP s obdobnými parametry aplikována na lopatky z titanové slitiny Ti-6Al-4V lze konstatovat, že průběh nalezeným i naměřených hodnot je velice podobný. Tlaková pnutí zasahují u nalezených výsledků do 1 mm a maximální hodnota zbytkových tlakových pnutí -380 N.mm^{-2} je lehce vyšší. Rozdílnost výsledků může být jednak příčinou lehce odlišných parametrů zpevňovací technologie LSP, ale také tím, že měření zbytkových napětí bylo u nalezených výsledků zjištěno pomocí rentgenografické difrakční metody.

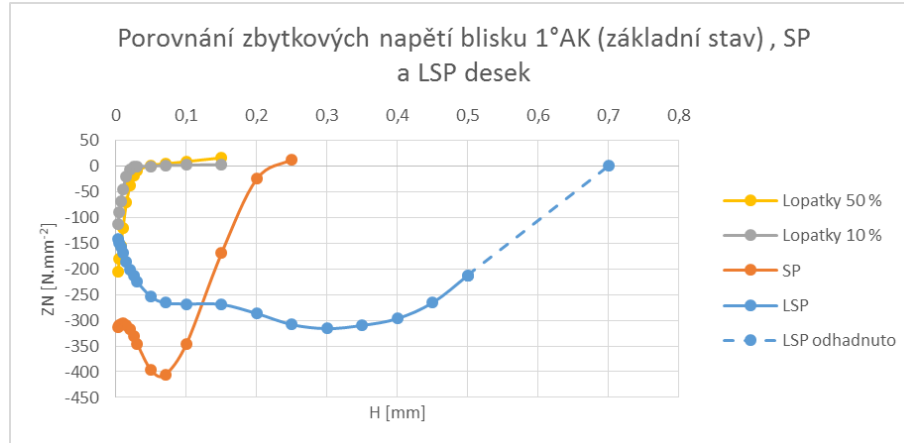
3.4.7 Zhodnocení výsledků

3.4.7.1 Porovnání zbytkových napětí u různých technologií



Obrázek 63: Porovnání zbytkových napětí SP a LSP destiček

Z grafu je patrné, že žádané tlakové pnutí u vzorků, na které byla aplikována technologie zpevnění povrchu LSP, zasahuje mnohem hlouběji než po zpevňovací technologii SP. U vzorků po aplikaci SP byla naměřena lehce vyšší maximální hodnota tlakových napětí.



Obrázek 64: Porovnání zbytkových napětí blisku 1°, SP a LSP destiček

Z grafu je patrné, že po aplikaci zpevňovací technologie dochází k výraznému vzniku tlakových zbytkových napětí do značné hloubky oproti základnímu stavu kde je pozitivní, že byla naměřena v povrchové jen tlaková zbytková napětí, tyto napětí ale zasahují jen do malé hloubky.

3.5 Příprava vzorků pro mikrotvrdot a metalografii - řezání

Řezání vzorků pro přípravu metalografických vzorků bylo provedeno v dílně FS ČVUT v Praze. Na tomto pracovišti byly upraveny vzorky tak, aby bylo možné vzorky zalít do metalografických vzorků o průměru 30 mm a 40 mm. Metalografické vzorky budou sloužit pro měření mikrotvrdoti a vyhodnocení metalografie.

3.5.1 Použité zařízení

- zařízení Struers Labotom- 3



Obrázek 65: Vlevo Struers Labotom- 3 a vpravo Struers CitoPress- 10

3.6 Příprava vzorků pro mikrotvrdot a metalografii - výroba metalografických vzorků

Výroba metalografických vzorků byla provedena v laboratoři mikrotvrdoti a metalografie FS ČVUT v Praze. Výroba metalografických vzorků byla provedena dvěma způsoby a to za tepla nebo za studena. Za tepla byly vyrobeny metalografické vzorky, ve kterých byl blisk 1° a za studena byly vyrobeny metalografické vzorky ve kterých byly vloženy destičky s aplikací zpevňovací technologie SP nebo LSP.

3.6.1 Zalítí a lisování za tepla

3.6.1.1 Použité zařízení a přípravky

- zařízení Struers CitoPress- 10
- pryskyřice DuroFast od firmy Struers

- pryskyřice ClaroFast od firmy Struers
- přípravek AntiStick od firmy Struers
- identifikační lístečky od firmy Struers
- podložka
- vteřinové lepidlo
- podložka



Obrázek 66: Použité přípravky: DuroFast, ClaroFast, AntiStick a identifikační štítek

Hmota DuroFast je velice tvrdá. Byla zvolena s ohledem na maximální schopnost udržení ostrých hran při leštění a broušení metalografických výbrusů. Hmota ClaroFast byla zvolena díky její průhlednosti. Díky tomu mohl být použit identifikační štítek a nemusel se metalografický vzorek popisovat permanentním popisovačem. Zařízení CitoPress- 10 umožňuje vyrábět metalografické vzorky o průměru 30 mm.

3.6.1.2 Postup přípravy

1. Vložit vzorek spojený pomocí vteřinového lepila k podložce.
2. Zasypat vzorek vrstvou DuroFast.
3. Vložit označený štítek.
4. Nasypat vrstvu ClaroFast.
5. Nanést AntiStick na závit uzávěru a zavřít uzávěr.
6. Zapnout program pro výrobu vzorku.



Obrázek 67: Vzorek zalisovány a zalitý za tepla po broušení

3.6.2 Zalévání za studena

3.6.2.1 Použité zařízení a přípravky

- formy na výrobu metalografických vzorků o průměru 30 mm a 40 mm od firmy Struers
- přípravek DuroCit Powder od firmy Struers
- přípravek DuroCit- 3 Liquid I od firmy Struers
- přípravek DuroCit- 3 Liquid II od firmy Struers
- úhelník od firmy Struers



Obrázek 68: Použité přípravky: DuroCit, DuroCit- 3 Liquid I, DuroCit- 3 Liquid II



Obrázek 69: Formy pro výrobu metalografických vzorků za studena



Obrázek 70: Úhelník od firmy Struers vhodný pro výrobu metalografických vzorků za studena

3.6.2.2 Postup přípravy

1. Vložit vzorky na podložkách do forem FixiForm. Byly použity formy o průměru 30 mm a 40 mm, aby se mohly udělat všechny vzorky na jednou.
2. Namíchat hmotu z DuroCit Powder + DuroCit- 3 Liquid I + DuroCit- 3 Liquid II v poměru 7 : 4 : 2.
3. Nechat vytvořenou hmotu 1 minutu odstát, poté zalít připravené formy.
4. Za jeden den jsou metalografické vzorky dostatečně vytvrzené a dají se vytáhnout z forem a popsat (nejlépe z boku, jelikož se budou metalografické vzorky z obou stran brousit).



Obrázek 71: Vybroušené metalografické vzorky zalité za studena

3.7 Broušení

Broušení metalografických vzorků bylo provedeno v laboratoři mikrotvrdosti a metalografie FS ČVUT v Praze a zařízení Tegramin-25 od firmy Struers.

3.7.1 Použité zařízení a přípravky

- zařízení Struers Tegramin-25
- brousící kotouč se zrnitostí 80 o průměru kotouče 250 mm od firmy Struers
- brousící kotouč se zrnitostí 320 o průměru kotouče 250 mm od firmy Struers
- leštící kotouč MD Largo o průměru 250 mm od firmy Struers
- emulze MD Lupo od firmy Struers
- diamant ve spreji s velikostí zrn 9 μm od firmy Struers
- leštící kotouč MD CHEM o průměru 250 mm od firmy Struers
- OP-S emulze od firmy Struers
- Peroxid vodíku od firmy Penta



Obrázek 72: Struers Tegramin-25

3.7.2 Postup broušení metalografických vzorků

1. Broušení je prováděno za mokra pomocí brousícího kotouče se zrnitostí 80. Nejprve se zbrousí horní strana. Toto se provádí jen u metalografických vzorků vyrobených za studena. Slouží jen pro srovnání plochy. Poté se brousí spodní část metalografického vzorku. Brousíme přibližně 3 minuty, až do doby kdy máme téměř požadovanou velikost plochy zkoumaného vzorku (odbroušení přibližně o 0,5 až 1,5 mm).
2. Druhá fáze je provedena pomocí kotouče se zrnitostí 320. Broušení probíhá za mokra a slouží už jen k dobroušení.
3. V třetím kroku byl použit leštící kotouč MD Largo, na který je nastříkán diamant ve spreji s velikostí zrn 9 μm . Menší velikost zrn diamantu nelze použít. Díky nižší tvrdosti titanu mají menší částice tendenci ulpívat ve výbrusu a způsobují jednak chybné interpretace při vyhodnocování čistoty materiálu v leštěném stavu a také mají tendence se uvolňovat na posledním leštícím plátnu. Ani několikanásobným cyklem leštění se nepodaří škrábance odstranit. Dále je na kotouč v průběhu leštění přiváděna emulze MD Lupo.
4. V posledním kroku se provádí leštění pomocí kotouče MD Dac. Na tento kotouč se nanáší vrstva roztoku. Roztok je namíchan z OP-S emulze (koloidní roztok siliky) a peroxidu vodíku v poměru 1 ku 9.

Poznámka

Pro vyhodnocování přítomnosti aflatizovaných vrstev a vrstev oxidů je velmi důležité minimalizovat doby posledního kroku leštění z důvodu zaoblování hran a následné chybné detekce vrstev, kdy se rozostřený (světlý) okraj mezi pryskyřicí a vzorkem jeví jako vrstva. Ideální doba leštění vzorku je přibližně 1 minuta při přítlaku 20 N na vzorek. Zároveň je potřebné dostatečné dávkování koloidního roztoku siliky (OP-S). Roztok je třeba namíchat těsně před použitím. Při překročení obsahu peroxidu má vzorek tendenci naleptávat matrici a zmatnět a je třeba se vrátit až k poslednímu kroku broušení na papíře hrubosti 320. Zatížení při leštění by nemělo překročit 25 N na vzorek o průměru 30 mm, jelikož hrozí vznik plasticky deformované vrstvy výbrusu viditelné v leštěném stavu.



Obrázek 73: DP-Spray s velikostí zrn 9 μm od firmy Struers



Obrázek 74: Přípravky použité pro konečnou operaci broušení (OP-S Suspension a Peroxid vodíku 30% p.a.)

3.8 Mikrotvrdost

Měření mikrotvrdosti bylo provedeno v laboratoři mikrotvrdosti a metalografie FS ČVUT v Praze. Pro měření bylo využito zařízení Future-Tech FM100. Díky zařízení Future-Tech ARS 9 000 s plně automatickým systémem zatěžování, pohonů, měření polohy, CCD kamerou a odečtem vpichu. Provedení měření profilu mikrotvrdosti není z pohledu zajištění vzdáleností mezi vpichy a kraji možné na příčném výbrusu a bylo tedy zvoleno zhotovení na šikmém výbrusu.

3.8.1 Měřené vzorky

Frézované lopatky

- vzorky GE Blisk 1, GE Blisk 2, GE Blisk 3, GE Blisk 4 a GE Blisk 5

SP destičky

- vzorky J1A a J2A

LSP destičky

- vzorky 1B a 2B

3.8.2 Použité zařízení a přípravy

- mikrotvrdoměr Future-Tech FM100
- zařízení Future-Tech ARS 9 000
- stolní počítač
- technický líh



Obrázek 75: Zařízení pro měření mikrotvrdomsti

3.8.3 Postup měření

1. Připravené metalografické vzorky otřít technickým.
2. Upevnit metalografický vzorek do měřícího zařízení.
3. Poté provést měření pomocí programu HDPS - ARS.

3.8.4 Nastavené parametry měření

Po odzkoušení různých kombinací objektivů a zatížení a také vzhledem k velikosti zkušební vzorku byla vyhodnocena jako nejvýhodnější kombinace objektiv x100 a zatížení 100 gf. Při tomto zatížení byl vtisk dostatečně velký pro vyhodnocení. Vzhledem k velikosti zkušebních vpichů a tloušťce vzorku bylo zvoleno zatížení

100 g → HV 0,1 se standardní dobou zatěžování 10 s v souladu s normou ČSN EN ISO 6507.

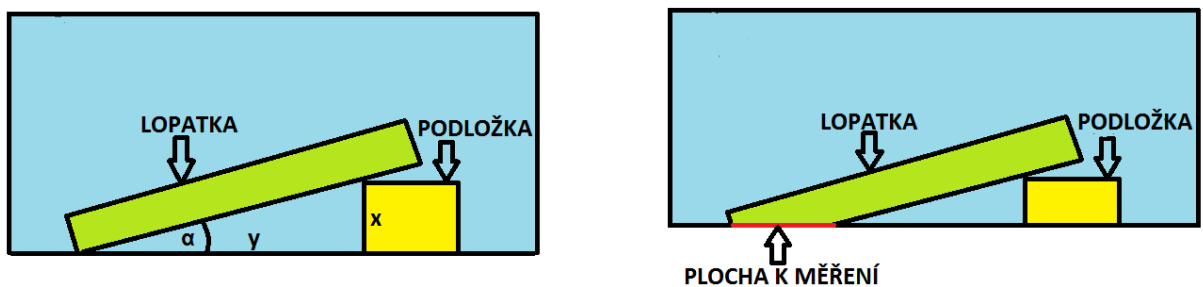
Parametry měření:

- čočka Lens X100
- čas zatížení 10 s
- velikost zatížení 100 gf → HV 0,1

3.8.5 Měření mikrotvrlosti lopatek

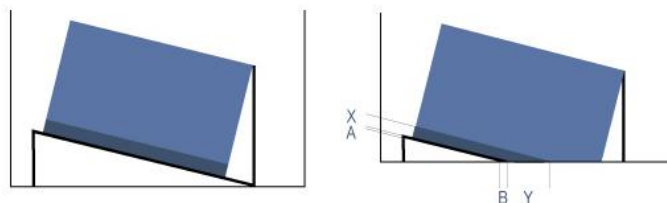
Byla vyříznuta rovinná část lopatky v blízkosti náběžné hrany, podložena o 0,5 mm a následně zalita za tepla do pryskyřice se zvýšenou schopností udržení hrany. Povrch vzorku byl vyhotoven v kvalitě metalografického výbrusu. Ze znalosti výšky podložky (x) a délky podložení (y) jsme schopni dopočítat úhel (α). Díky znalosti úhlu, jsme pak schopni dopočítat, v jaké hloubce měříme mikrotvrdot a také díky znalosti jsme byli schopni zvolit vhodný krok mezi vpichy na výbrusu.

Na každém výbrusu bylo zaměřeno rozhraní a následně se měřila matice 3x15 (3 linie po 15 měřeních do hloubky).



Obrázek 76: Schématické zobrazení lopatky v metalografickém vzorku

3.8.6 Měření mikrotvrlosti destiček



Obrázek 77: Zobrazení vzorku v metalografickém vzorku při použití speciálního úhelníku [48]

Úhelník je ve tvaru "N" se dvěma rozdílnými výškami ve „vertikální“ poloze. To poskytuje možnost nastavení dvou úhlů (10° a 20°), podle toho, kterým směrem je

úhelník otočen. V našem případě byl u všech vzorků využit úhel nastavení sklonu 10°. Díky znalosti tloušťky úhelníku (0,5 mm) jsme schopni velice přesně dopočítat, v jaké hloubce vzorku měříme.

Na každém výbrusu bylo zaměřeno rozhraní a následně se měřila dvakrát matice 2x15 (2 linie po 15 měřeních do hloubky).

Výpočet hloubky měření při použití speciálního úhelníku

$$X = \frac{Y \cdot 0,5}{B}$$

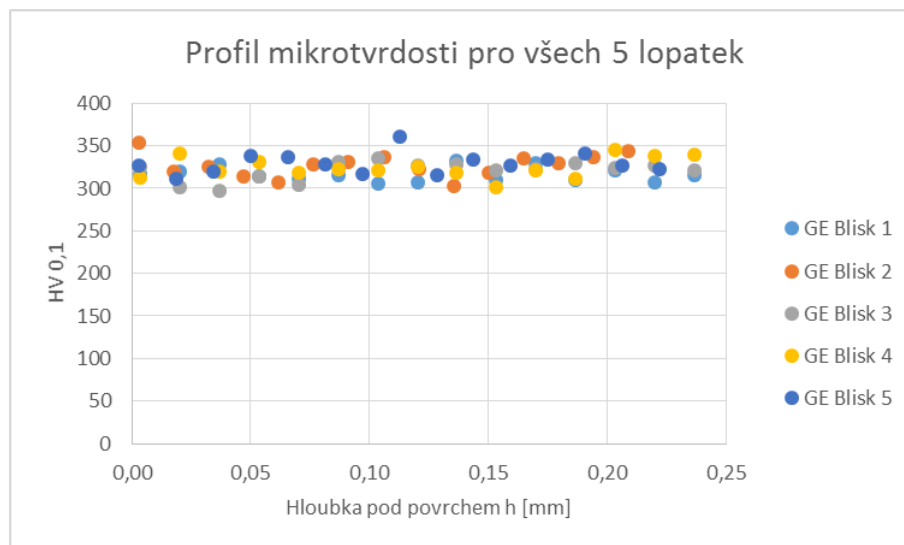
Rovnice 16

3.8.7 Naměřené hodnoty mikrotvrlosti

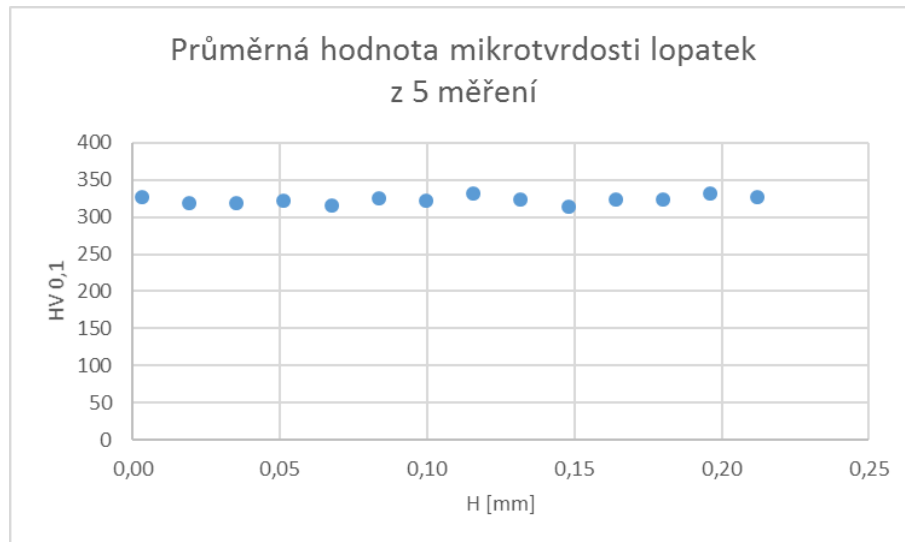
Vzhledem k velkému počtu naměřených dat, jsou přiloženy jen už finální grafy závislosti mikrotvrlosti na hloubce. Naměřená data jsou shrnuta do tabulky a jsou vložena v příloze číslo 4.

3.8.7.1 Frézované lopatky blisku 1°

Mikrotvrdot byla vyhodnocována na 5-ti sousedních lopatkách. Na každé lopatce byla měřena matice 3x15 vpichů. U většiny lopatek se při 0,5 mm docílilo zešikmení o 1 až 2°. Při tomto zešikmení se dosahovalo měření do reálné hloubky 0,2 až 0,25 mm. Jednotlivé body v grafech jsou průměrem ze 3 měření na jedné hloubce.



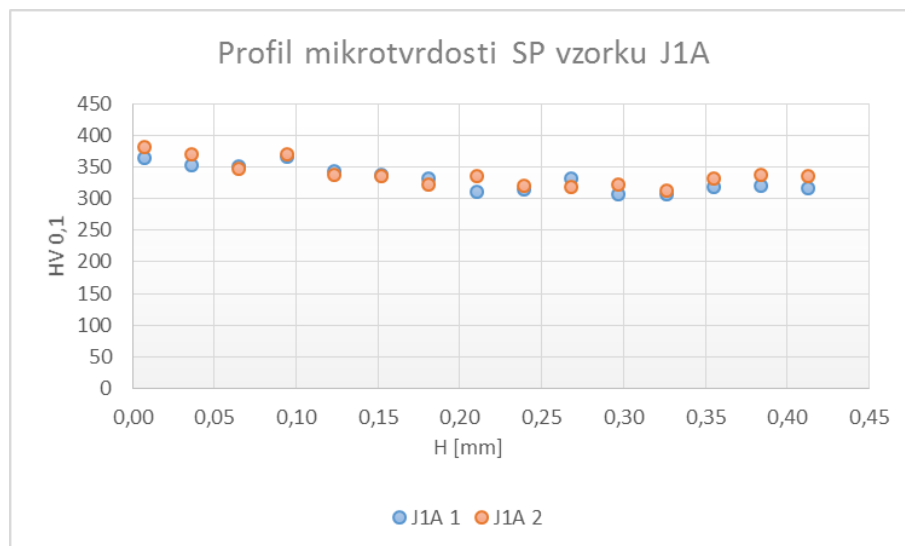
Obrázek 78: Profil mikrotvrlosti pro všech 5 lopatek



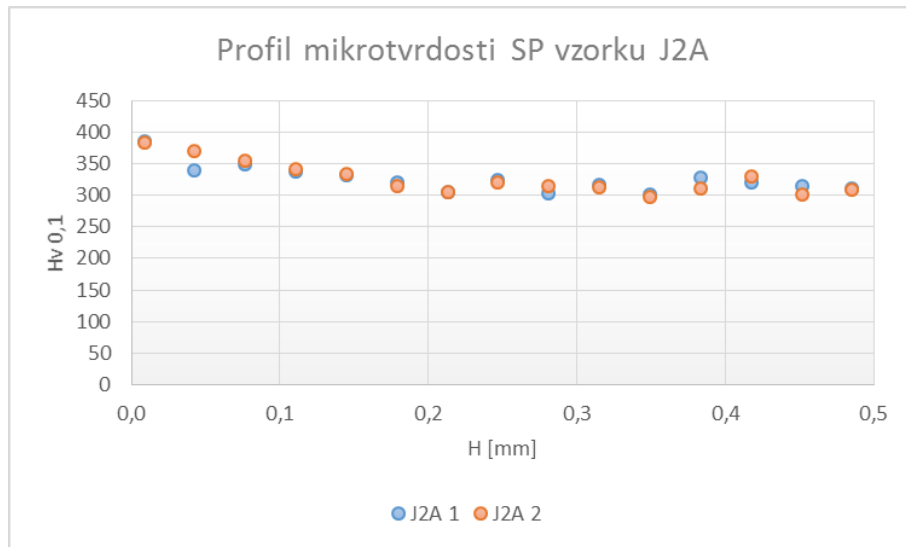
Obrázek 79: Průměrná hodnota mikrotvrlosti lopatek z 5 měření

Z výsledků měření mikrotvrlosti vyplývá, že frézované lopatky blisku 1° z titanové slitiny Ti-6Al-4V nemají tendenci k deformačnímu zpevnění. Nárůst mikrotvrlosti nebyl zachycen ani u jednoho vzorku. Vzhledem k většímu zatížení HV 0,1 mají výsledky velmi dobrou opakovatelnost. Průměrná hodnota mikrotvrlosti ze všech měření je 324 HV 0,1. Velikosti úhlopříček vtisků se pohybovaly v rozmezí 23 až 25 mikrometrů.

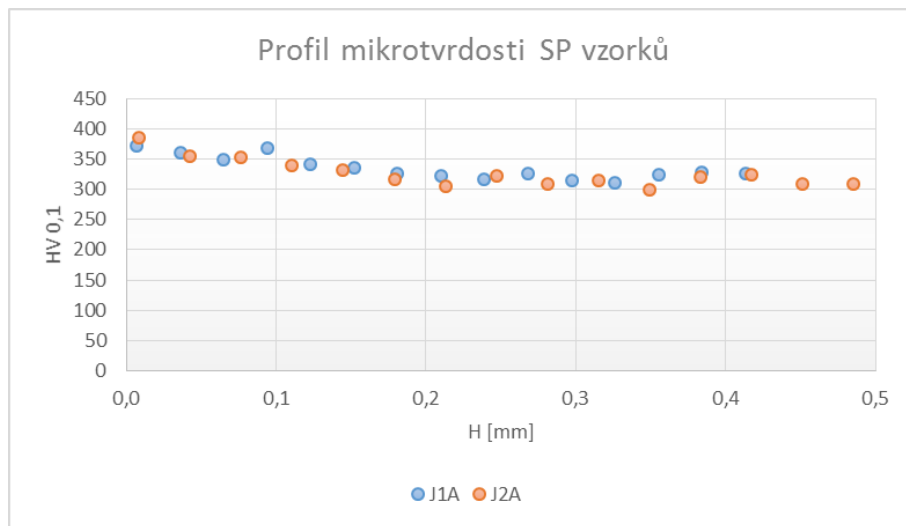
3.8.7.2 Destičky po aplikaci SP



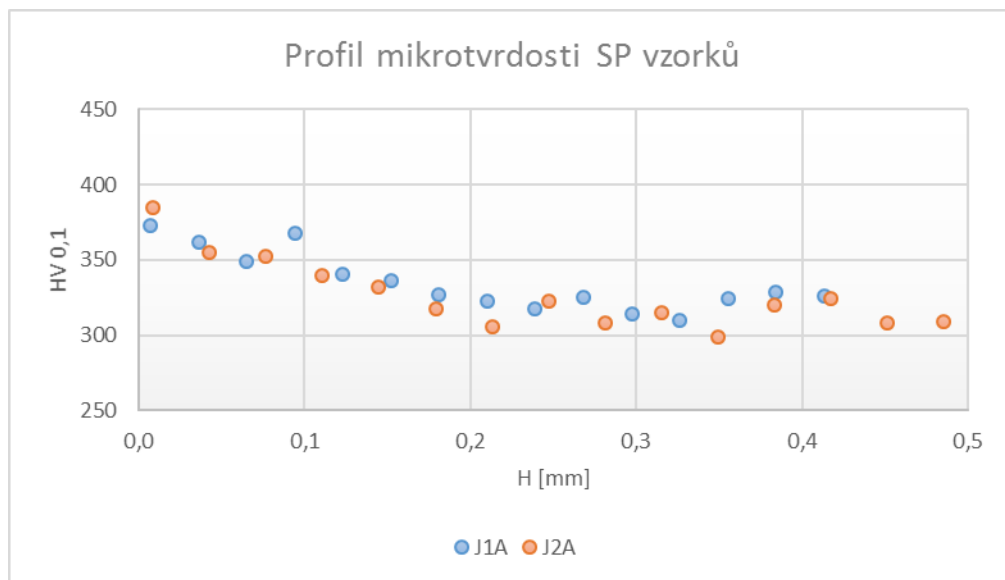
Obrázek 80: Profil mikrotvrlosti SP vzorku J1A



Obrázek 81: Profil mikrotvrdosti SP vzorku J2A



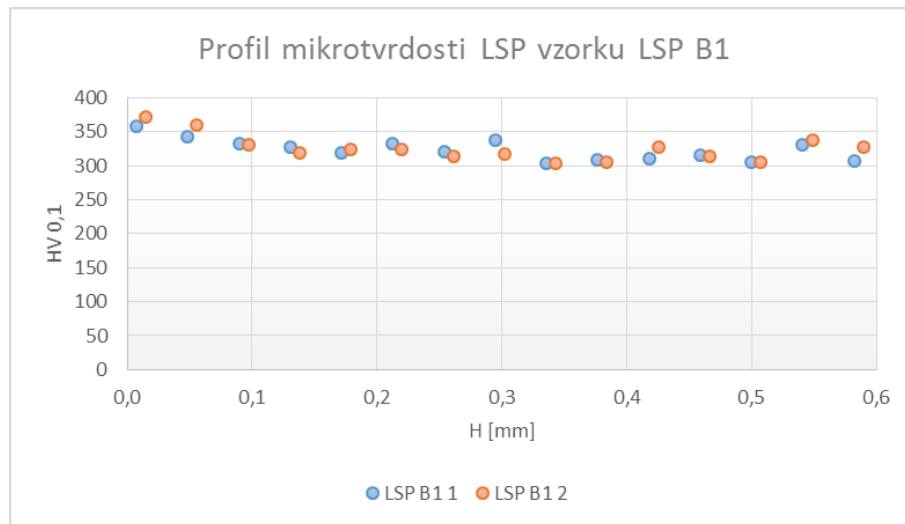
Obrázek 82: Profil mikrotvrdosti SP vzorků



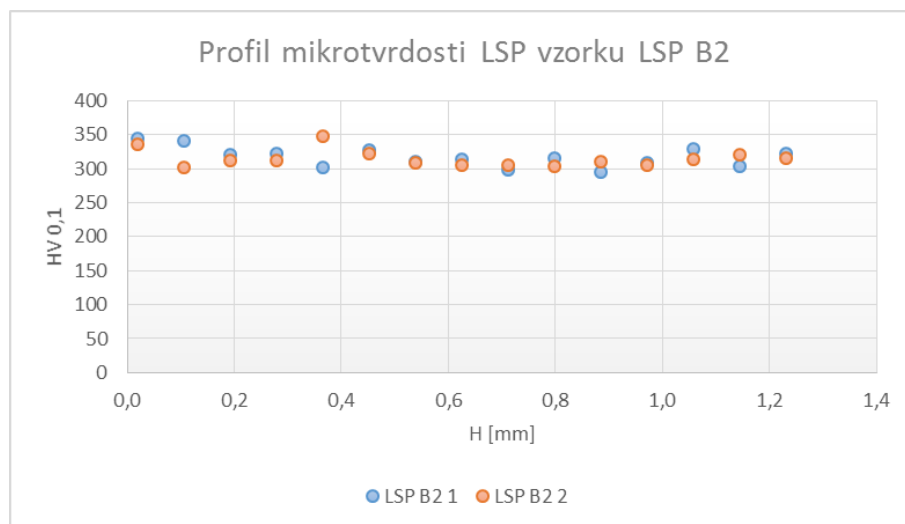
Obrázek 83: Profil mikrotvrdosti SP vzorků

Z výsledků měření mikrotvrdosti vyplývá, že vzorek z titanové slitiny Ti-6Al-4V po aplikaci technologie SP má tendenci k deformačnímu zpevnění. Nárůst mikrotvrdosti byl zjištěn přibližně do hloubky 0,13 mm. Nárůst mikrotvrdosti těsně pod povrchem byl přibližně o 50 HV oproti základnímu stavu. Vzhledem k většímu zatížení HV 0,1 mají výsledky velmi dobrou opakovatelnost.

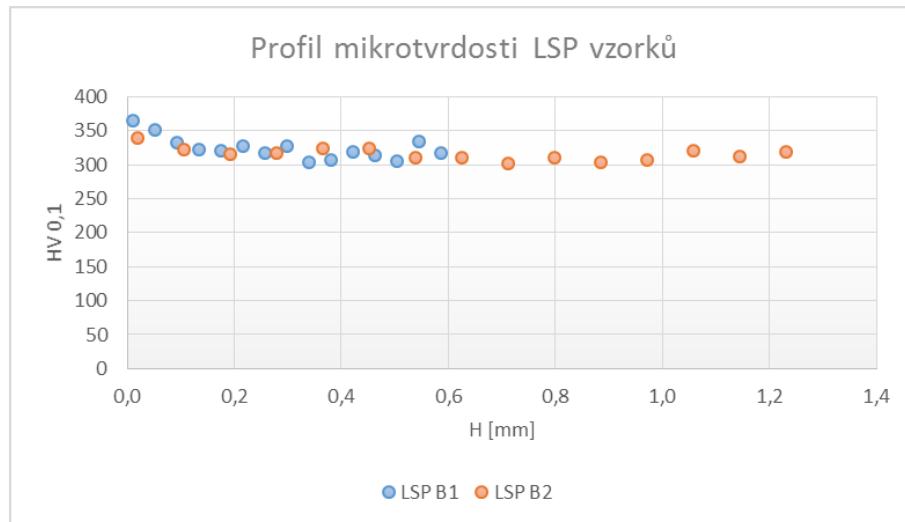
3.8.7.3 Destičky po aplikaci LSP



Obrázek 84: Profil mikrotvrdosti LSP vzorku LSP B1



Obrázek 85: Profil mikrotvrdosti LSP vzorku LSP B2



Obrázek 86: Profil mikrotvrdosti LSP vzorků

Z výsledků měření mikrotvrdosti vyplývá, že vzorek z titanové slitiny Ti-6Al-4V po aplikaci technologie LSP nemá tendenci k deformačnímu zpevnění. Vzhledem k většímu zatížení HV 0,1 mají výsledky velmi dobrou opakovatelnost.

3.9 Metalografie

Metalografie byla provedena v laboratoři mikrotvrdosti a metalografie FS ČVUT v Praze. Pozorování probíhalo na metalografickém světelném mikroskopu Neophot 2 od firmy Carl Zeiss. Na mikroskop byl napojen digitální fotoaparát. Fotoaparát byl propojen s počítačem a díky tomu šlo vzorek pozorovat přímo na monitoru a pořídit digitální snímky.

Metalografické vzorky se leptaly 2 leptadly (Kroll a bifluorid amonný). Krollovo leptadlo je jednoznačně nejpoužívanější pro titanové slitiny, avšak nedává při detekci alfatizovaných vrstev spolehlivé výsledky. Díky této skutečnosti jsme použili druhé leptadlo (bifluorid amonný).

3.9.1 Měřené vzorky

Blisk 1°

- vzorek přechodu lopatky a disku TACR 1
- vzorky GE BLISK 1 až 5
- vzorek z oblasti disku TACR D1

Destičky po aplikaci SP

- vzorky J1A a J2A

Destičky po aplikaci LSP

- vzorky LSP B1 a LSP B2

3.9.2 Použité zařízení a přípravky

- destilovaná voda
- kyselina dusičná
- kyselina fluorovodíková
- bifluorid amonný
- stolní počítač
- fotoaparát
- metalografický světelný mikroskop Carl Zeiss Neophot 2



Obrázek 87: Mikroskop Neophot 2

3.9.3 Příprava leptadel

3.9.3.1 Kroll

Leptadlo Kroll bylo použito na vodné bázi ve složení: 92 obj. % destilovaná voda, 6 obj. % kyselina dusičná, 2 obj. % kyselina fluorovodíková.

3.9.3.2 Bifluorid amonný

Leptadlo bifluoridu amonného bylo namícháno v poměru 5 g bifluoridu amonného na 100 ml vody.

3.9.4 Postup měření

1. Namíchat leptadlo.

2. Leptadlem naleplat připravené metalografické vzorky. U leptání leptadlem Kroll průběžně přibližně po 10 s zkontrolovat stupeň naleptání pomocí mikroskopu. Naopak při leptání leptadlem bifluoridu amonného se přepleptání obávat až tak nemusíme, jelikož pro bezpečné zviditelnění alfatizované vrstvy je vhodné leptat výbrus ponořením a cíleně ho přepleptat. Jádru vzorku tvořené oběma fázemi ($\alpha+\beta$) má výraznou tendenci ke ztmavnutí (přepálení), kdežto alfatizovaná vrstva zůstává bílá.
3. Pomocí soustavy zařízení (mikroskop, fotoaparát a stolní počítač) pořídit potřebné metalografické snímky.

3.9.5 Výsledky měření

3.9.5.1 Blisk

Pozorování v nenaleptaném stavu

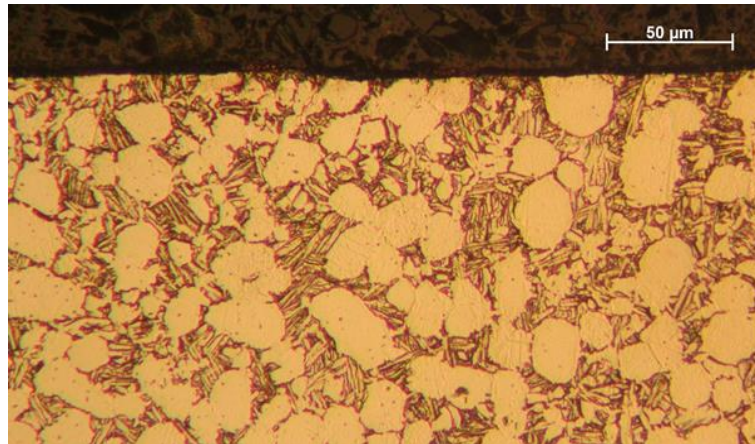
Pro ověření, zda v povrchové vrstvě nejsou přítomny trhliny, mikrotrhliny po frézování, cizorodé vměstky či částice, byly vzorky blisku 1° připravené pro metalografii zkoumány na mikroskopu ještě v nenaleptaném stavu. Ani jedna z těchto nežádoucích anomálií nebyla pozorována. Materiál se nelišil svojí čistotou v místě lopatek a blízkosti středu výkovku, proto nadále nebyla leštěnému stavu věnována další pozornost.

Pozorování v naleptaném stavu

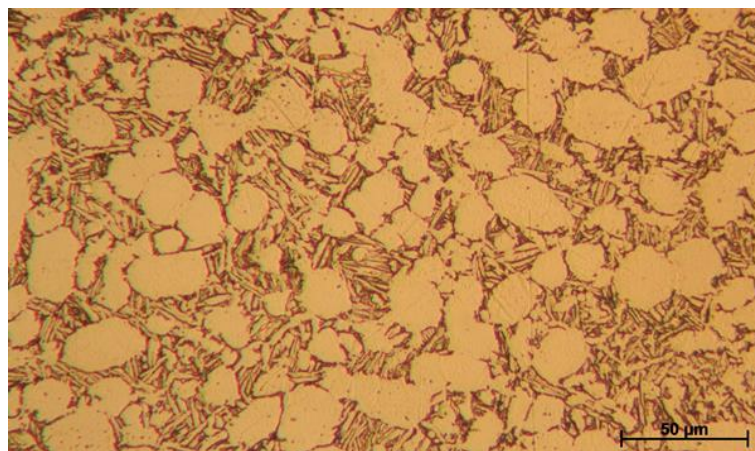


Obrázek 88: Makrostruktura v oblasti vetknutí lopatky – Kroll, 25x

Ze snímku je patrné, že lopatka a disk vykazují stejnou strukturu při zvětšení 25x.

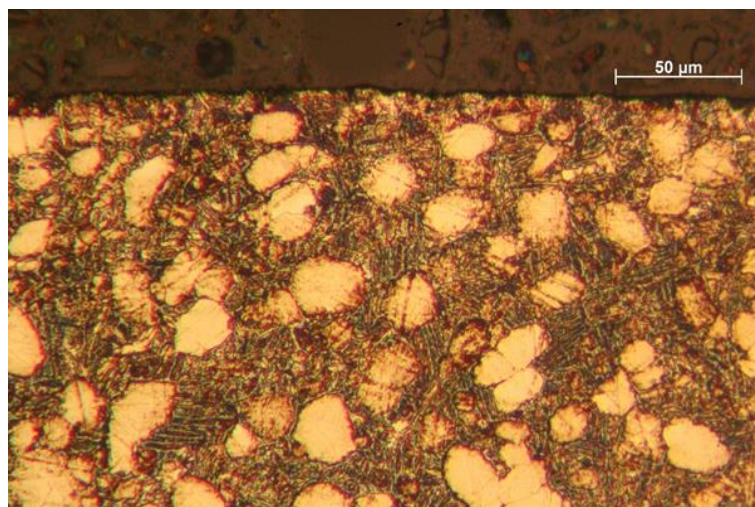


Obrázek 89: Mikrostruktura v oblasti lopatky – Kroll, 400x



Obrázek 90: Mikrostruktura v oblasti disku – Kroll, 400x

Při porovnání snímků se zvětšením 400x disku a lopatky, naleptaných leptadlem Kroll, nepozorujeme rozdíl mikrostruktury ani fázového složení. V obou případech jsou jasně patrná rovnoosá zrna alfa fáze (bílá) v transformované beta matici (tmavá) obsahující acikulární alfa fázi.

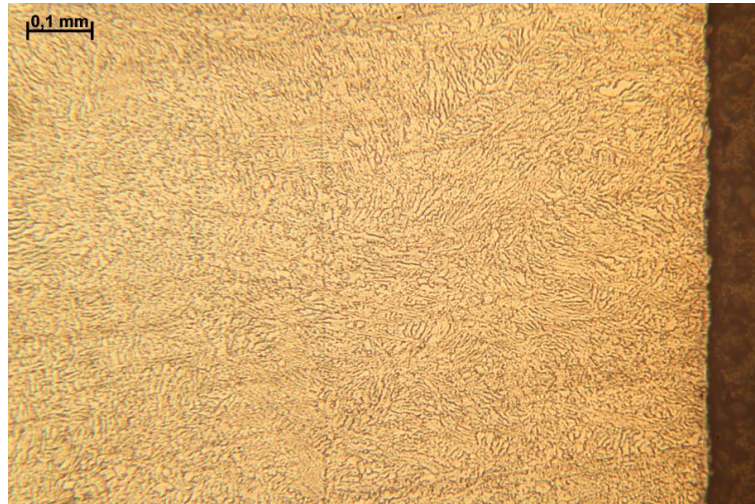


Obrázek 91: Negativní zkouška na přítomnost alfatizované vrstvy – bifluorid amonný, 400x

Ze snímku je patrné, že ani po naleptání leptadlem bifluoridu amonného, nepozorujeme alfatizovanou vrstvu.

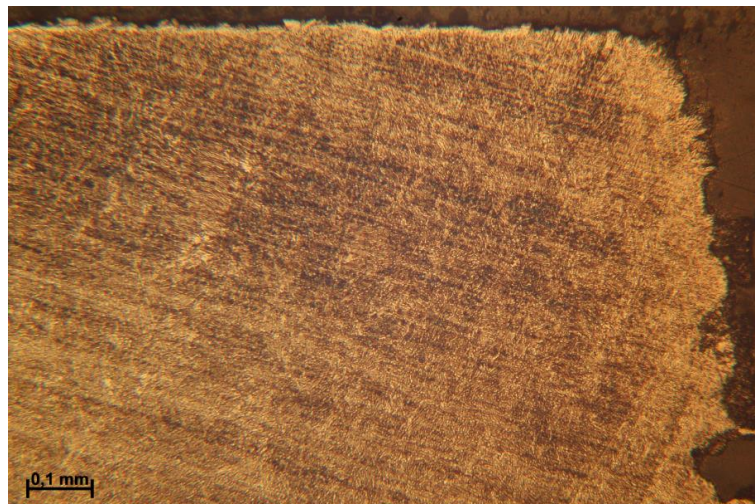
V leptaném i neleptaném stavu nebylo pozorováno natváření povrchu po frézování. Zrna nebyla protažena ve směru odchodu třísky.

3.9.5.2 SP destičky



Obrázek 92: Struktura SP destičky – Kroll, 100x

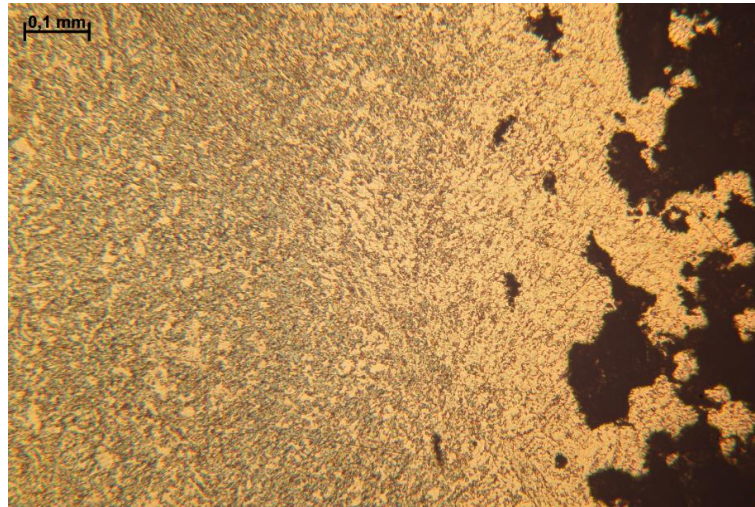
Metalografický vzorek byl naleptán leptadlem Kroll a byl pozorován při zvětšení 100x. Zvětšení 100x bylo zvoleno s ohledem na to, že vzorky jsou pozorovány na šikmém výbrusu.



Obrázek 93: Struktura SP destičky – bifluorid amonný, 100x

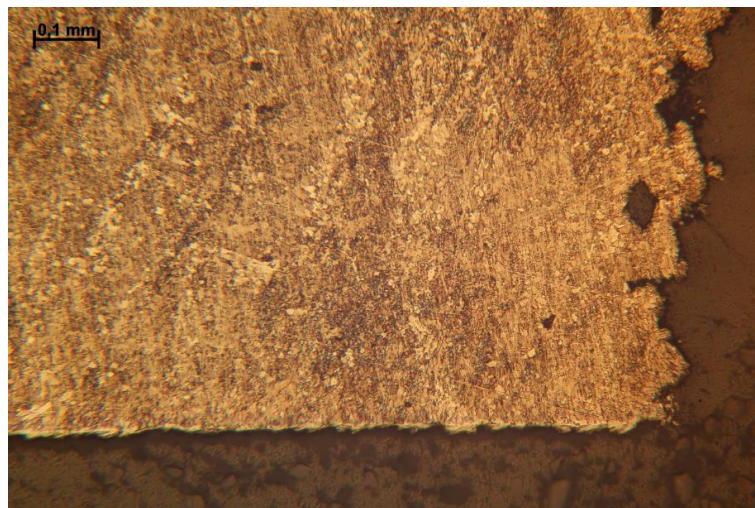
Ze snímku je patrné, že ani po naleptání leptadlem Bifluoridu amonného, nepozorujeme v povrchové vrstvě alfatizovanou vrstvu.

3.9.5.3 LSP destičky



Obrázek 94: Struktura LSP destičky – Kroll, 100x

Metalografický vzorek LSP B1 byl naleptán leptadlem Kroll a byl pořízen při zvětšení 100x. Zvětšení 100x bylo zvoleno s ohledem na to, že vzorky jsou pozorovány na šikmém výbrusu Z předchozího měření drsnosti bylo zjištěno, že povrch titanových destiček se po aplikaci zpevňovací technologie LSP rapidně zhoršil. Tuto skutečnost můžeme jen potvrdit při pozorování snímku vzorku LSP B1.



Obrázek 95: Struktura LSP destičky – bifluorid amonný, 100x

Ze snímku vzorku LSP B2 je patrné, že ani po naleptání leptadlem bifluoridu amonného nepozorujeme v povrchové vrstvě alfatizovanou vrstvu.

4 Závěr

Teoretická část diplomové práce je věnována problematikou kvality povrchové vrstvy a metodami jejího zkoumání. Dále titanem a titanovou slitinou Ti-6Al-4V. V neposlední řadě zpevňovacími technologiemi Shot peening a Laser peening. Jedná se o technologie, které se využívají nebo mají velký potenciál využití převážně na součásti v leteckém průmyslu, kde je požadována vysoká trvanlivost a spolehlivost. V této části jsou také, přiloženy nalezené výsledky z vědeckých publikací, které slouží pro porovnání s naměřenými výsledky.

Cílem experimentální části diplomové práce bylo navržení metod hodnocení povrchové vrstvy a jejich využití k analýze lopatek axiálního kompresoru zjištění u lopatkového dílu axiálního kompresoru a destiček s aplikací zpevňovací technologie.

Z experimentální části lze formulovat následující závěry

- Z měření drsnosti povrchu vyplývá, že po aplikaci obou zpevňovacích technologií dochází ke zhoršení parametrů drsnosti. Po aplikaci technologie Laser peening je zhoršení parametrů drsnosti citelnější.
- Z měření zbytkových napětí lopatek dílu axiálního kompresoru lze doporučit místo měření v polovině výšky lopatky, jelikož ve výšce 10 % lopatky se nezdařila dvě měření z důvodu nerovnoměrného rozpouštění při hraně vzorku. Také maskování plochy v této výšce je obtížnější.
- Z výsledků měření zbytkových napětí lze konstatovat, že lopatky vykazují po frézování tlakový charakter zbytkových napětí v těsné blízkosti povrchu. Přechod do nevýrazných nízkých vyrovnávacích tahových napětí je průměrně v hloubkách 0,03 mm (10 % výšky) a 0,045 mm (50 % výšky).
- Při měření zbytkových pnutí bylo zjištěno, že maximální hloubka odleptané plochy je 0,5 mm. Při překročení této hloubky dochází k nerovnoměrnému odleptávání.
- Z měření zbytkových napětí destiček s aplikací Shot peening vychází maximální tlakové napětí $-406 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ v hloubce 0,07 mm. Za hloubkou 0,07 mm se tlaková zbytková napětí rovnoměrně snižují. Přechod zbytkových napětí z tlakových na velmi nízká tahová je přibližně v hloubce 0,22 mm.
- U měření zbytkových napětí destiček s aplikací Laser peening muselo být leptání předčasně ukončeno přibližně v hloubce leptané plochy 0,5 mm. Díky této skutečnosti musel být přechod zbytkových napětí z tlakových na tahová dopočítán. Jelikož po dosažení maximální hodnoty klesají zbytková napětí rovnoměrně, nemusela by být dopočítaná hodnota výrazně zkreslena.

Dopočítaná hodnota vychází přibližně v hloubce 0,75 mm. Maximální tlakové napětí vychází $-307 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ v hloubce 0,35 mm.

- Z měření mikrotvrdosti vyplývá, že k zvýšení tvrdosti dochází jen u vzorků po aplikaci Shot peening. Nárůst mikrotvrdosti byl zjištěn přibližně do hloubky 0,13 mm. Nárůst mikrotvrdosti těsně pod povrchem byl přibližně o 50 HV oproti základnímu stavu.
- Z výsledků metalografie je zřejmé že po aplikaci zpevňovací technologie se struktura nemění.
- Alfatizovaná vrstva nebyla pozorována ani u jednoho vzorku. Takže při dalších zkoumáních struktury nebo zkoumání vzorků odlišnými parametry by mělo být dostačující pozorování po naleptání leptadlem Kroll.

Pro zvýšení životnosti a tím i bezpečnosti bych na lopatky axiálního kompresoru doporučil aplikaci technologie Shot peening. A to zejména s ohledem na rozměry lopatek a nižší náklady na tuto technologii.

Vzhledem k ceně lopatkového dílu axiálního kompresoru turbovrtulového motoru bych doporučil, zanalyzování povrchové vrstvy destiček při různých parametrech zpevňovacích technologií. Až poté bych zkoumal stav povrchové vrstvy na reálných lopatkách s aplikací zpevňovací technologie s aplikací zpevňovací technologie.

5 Zdroje

- [1] KHODAEI, Mohammad, Mahmood MERATIAN, Omid SAVABI a Mehdi RAZAVI. *The effect of pore structure on the mechanical properties of titanium scaffolds* [online]. 2016 [cit. 2016-06-29]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0167577X16302658>
- [2] ŠLAIS, Miroslav. *Studium vlivu rychlostních a teplotních parametrů na tvářitelnost Ti slitin* [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-02-13]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=46688. Dizertační práce. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Forejt, Csc.
- [3] *Titan a jeho slitiny, Nikl a jeho slitiny: 2. přednáška* [online]. In: . [cit. 2016-02-13]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Nikl_titan.pdf
- [4] BÁRTKOVÁ, DENISA BÁRTKOVÁ. *VYSOKOCYKLOVÁ ÚNAVA TITANOVÉ SLITINY Ti6Al4V* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-02-13]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65907. Diplomová práce. Vedoucí práce PROF. ING. STANISLAV VĚCHET, CSC.
- [5] ZHANG, Wensheng, Zhaowu ZHU a Chu Yong CHENG. *A literature review of titanium metallurgical processes* [online]. [cit. 2016-02-13]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X11000922>
- [6] *Slitiny titanu* [online]. In: . [cit. 2016-02-13]. Dostupné z: www.users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/05_Slitiny%20Ti.ppt
- [7] ZHAO, Yixiang. *Effects of Laser Shock Peening on Residual Stress, Texture and Deformation Microstructure of Titanium-6Aluminum-4Vanadium Alloy* [online]. 2012 [cit. 2016-02-13]. Dostupné z: <http://search.proquest.com.ezproxy.techlib.cz/docview/1316886055?pq-origsite=summon>. University of Cincinnati.
- [8] SEDLÁČEK, Vladimír. *Únava hliníkových a titanových slitin*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství techn. lit., 1989.
- [9] VALÁŠEK, Antonín. *Aplikace metod využívajících iontové svazky k modifikaci slitiny Ti6Al4V* [online]. [cit. 2016-02-13]. Dostupné z: http://www1.fs.cvut.cz/stretech/2015/sbornik_2015/0340.pdf

- [10] TOLKNER, Josef. *ANALÝZA VLIVU OBRÁBĚNÉHO MATERIÁLU NA OPOTŘEBENÍ A TRVANLIVOST NÁSTROJE* [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-02-13]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52653. Diplomová práce. Vedoucí práce Prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.
- [11] *Tryskání - Pískování - Leštění* [online]. [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://www.tryskani-piskovani.com/zpusob_piskovani.htm
- [12] *CURTISS - WRIGHT: Shot Peening* [online]. [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <http://cwst.com/shot-peening/overview/>
- [13] LIPKA, ONDŘEJ. *DOKONČOVACÍ TECHNOLOGIE VYUŽÍVAJÍCÍ PLASTICKOU DEFORMACI POVRCHU* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64667. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D.
- [14] *Povrcháři* [online]. 2009, (7) [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://www.povrchari.cz/kestazeni/200907_povrchari.pdf
- [15] Technologie tryskání jako konečná úprava povrchu (kuličkování). *TechPark* [online]. Ing. Vladimír Marek, 1. Toušeňská s. r. o. [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://www.techpark.sk/technika-9102014/Prvni_tousenska_povrchove_upravy_tryskani_casopis_Technika.html
- [16] 1. Toušeňská s.r.o.: *Technologie tryskání* [online]. [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <http://www.1tousenska.cz/sluzby.php>
- [17] 1. Toušeňská s.r.o.: *Tryskací zařízení* [online]. [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <http://www.1tousenska.cz/vyroba.php>
- [18] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ - 3. část: Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program* [online]. 2005 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
- [19] SHEPARD, M. J. *Relaxation of Shot Peening Induced Residual Stresses in Ti-6Al-4V: IN.mm-2ct on Damage Tolerant Design* [online]. [cit. 2016-06-14]. Dostupné z:

<http://cwst.com/extend/premium/PDF/Relaxation%20of%20Shot%20Peening%20Induced%20Residual%20Stresses%20in%20Ti-6Al-4V%20IN.mm-2ct%20on%20Damage%20Tolerance.pdf>

- [20] CURTISS-WRIGHT: *Laser Peening* [online]. [cit. 2016-02-05]. Dostupné z: <http://cwst.com/laser-peening/overview/>
- [21] LSP Technologies: *LASER PEENING PROCESS* [online]. [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.lsptechnologies.com/laser-peening-process.php>
- [22] Leonardo technology: *Laser i-learning - Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů* [online]. [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning?limit=1&start=12>
- [23] LSP technologies: *LASER PEENING EQUIPMENT* [online]. [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.lsptechnologies.com/laser-peening-cell-sales.php>
- [24] SubsTech: *Laser peening* [online]. [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=laser_peening
- [25] YouTube: *Studies on laser peening of spring steel for automotive applications* [online]. [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=iGi-s-Oh4T8>
- [26] LSP technologies: *SHOT PEENING* [online]. [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.lsptechnologies.com/shot-peening.php>
- [27] LSP technologies: *HOW LASER PEENING WORKS* [online]. [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.lsptechnologies.com/how-laser-peening-works.php>
- [28] FANG, Y.W., Y.H. LI, W.F. HE a P.Y. LI. *Effects of laser shock processing with different parameters and ways on residual stresses fields of a TC4 alloy blade* [online]. [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0921509312013214>
- [29] ČSN EN ISO 4287:1997. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha : Český normalizační institut, 1999. 24 s.
- [30] PECHÁČEK, MARTIN. *HODNOCENÍ KVALITY POVRCHU PŘI ŘEZÁNÍ U TECHNOLOGIE AWJ A WJM* [online]. Brno, 2010 [cit. 2016-02-

- 10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30527.
DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce ING. MARTIN SLANÝ.
- [31] BUMBÁLEK, B.; ODVODY, V.; OŠŤÁDAL, B. Drsnost povrchu. 1. vydání. Praha : SNTL, 1989. 340 s. typ. č.: L13-B2-IV-41/22881.
- [32] *JENOPTIK: Systém měření drsnosti - parametry drsnosti* [online]. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: http://www.hommel-etamic.cz/files/094_14-hommel-plakat-drsnost-1000x700mm.pdf
- [33] *Nové technologie výzkumné centrum: Zbytková napětí* [online]. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: <http://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/zbytkova-napeti/zbytkova-napeti>
- [34] *CENTRUM VZDĚLÁVÁNÍ PEDAGOGŮ ODBORNÝCH ŠKOL: Drsnost povrchů a rychlé děje v objektivu vysokorychlostního kamerového systému* [online]. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: <http://int.spsoa-ub.cz/ccv/projekty/vzdelavanipedagogu/dokumenty/skripta/kurz11.pdf>
- [35] CIVÍN, Adam. *KOMPLEXNÍ TEORETICKÁ ANALÝZA METODY SLOUPKU PRO ZJIŠŤOVÁNÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ*[online]. Brno, 2012 [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=59574.
DIZERTAČNÍ PRÁCE . VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ . Vedoucí práce Doc. Ing. MILOŠ VLK, CSc.
- [36] ZBYTKOVÁ POVRCHOVÁ NAPĚTÍ PO OBRÁBĚNÍ [online]. s. 7 [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_12.pdf
- [37] NECKÁŘ, Ferdinand a Ivo KVASNIČKA. *Vybrané statě z úběru materiálu*. První. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1991.
- [38] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [39] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Strojírenské materiály: cvičení*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2798-8.

- [40] PTÁČEK, Luděk a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu II: cvičení*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
- [41] PŘIBIL, E. *Technická příručka* [online]. Bohdan Bolzano, s.r.o., 2014 [cit. 2016-06-22]. Dostupné z: <http://bolzano.cz/cz/technicka-prirucka>
- [42] *Mechanické zkoušení kovů - teoretická část: Zkoušky tvrdosti* [online]. [cit. 2016-06-22]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_mechanicke_zkouseni/teorie.htm
- [43] STODOLA, Ing. Martin. *STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ SVAROVÉHO SPOJE NA ZÁKLADĚ MĚŘENÍ TVRDOSTI*[online]. Brno, 2016 [cit. 2016-06-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=11410
4. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [44] ŠEBESTOVÁ, Hana. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii* [online]. [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>
- [45] *Metalografie I.: Příprava vzorku pro pozorování mikroskopem* [online]. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm
- [46] *Struers: Know How* [online]. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: http://struers.com/default.asp?top_id=5&doc_id=73
- [47] *Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie: Strojírenská metrologie* [online]. [cit. 2016-06-15]. Dostupné z: <http://technologie.fs.cvut.cz/provide/mereni>
- [48] *Struers Ensuring Certainty: Products* [online]. [cit. 2016-06-15]. Dostupné z: http://www.struers.com/default.asp?doc_id=610

6 Seznam obrázků

Obrázek 1: Hexagonální mřížka fáze α a bcc mřížka fáze β čistého titanu [7]	15
Obrázek 2: Pseudobinární diagram Ti - β -stabilizátor [4]	16
Obrázek 3: Vliv přísadových prvků na fázový diagram titanu [2]	17
Obrázek 4: Struktura Ti-6Al-4V po tváření [10]	20
Obrázek 5: Widmannstättenova jehlicovitá struktura Ti-6Al-4V jehlice β (světlé) ve fázi α (tmavé) [10].....	21
Obrázek 6: Rovnoosá struktura Ti-6Al-4V [10]	21
Obrázek 7: Lamelární struktura Ti-6Al-4V [10]	21
Obrázek 8: Princip metody Shot peening [11].....	22
Obrázek 9: Shot peening v praxi [12].....	22
Obrázek 10: Rozložení zbytkového napětí v průřezu součásti po jednostranném SP [15]	24
Obrázek 11: Výsledné rozložení napětí [15]	24
Obrázek 12: Injektorový systém [17].....	26
Obrázek 13: Tlakový systém [17]	26
Obrázek 14: Stroj s metacími koly [17]	27
Obrázek 15: Zbytková napětí malých desek po aplikaci SP [19].....	28
Obrázek 16: Princip metody LSP [20].....	29
Obrázek 17: Proces LSP u lopatek [20]	29
Obrázek 18: Zařízení pro Laser peening [23]	30
Obrázek 19: Proces LSP a ukázka zbytkového napětí po LSP [27].....	31
Obrázek 20: Porovnání drsnosti povrchu (BM: bez technologie zpevňování, SP: po řízeném kuličkování, LSP) [25]	31
Obrázek 21: Malá lopatka z Ti-6Al-4V [28]	32
Obrázek 22: Zbytkové pnutí titanových lopatek po aplikaci LSP [28]	32
Obrázek 23: Zbytkové pnutí titanových lopatek po aplikaci LSP při různém průměru paprsku [28].....	33
Obrázek 24: Zbytkové pnutí titanových lopatek po aplikaci LSP při různé době působení pulzu [28]	33

Obrázek 25: Profil povrchu [29].....	34
Obrázek 26: Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti [29]	34
Obrázek 27: Základní profil a z něho odvezené profily vlnitosti a drsnosti [32]	35
Obrázek 28: Základní a vyhodnocovaná délka, délka rozběhu a doběhu [32].....	35
Obrázek 29: Střední čára profilu drsnosti [30]	36
Obrázek 30: Prvek profilu [30].....	37
Obrázek 31: Parametry profilu drsnosti povrchu R_p , R_v a R_z [32]	37
Obrázek 32: Výška prvků profilu (příklad profilu drsnosti) [29]	38
Obrázek 33: Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a [30].....	38
Obrázek 34: Šikmost posuzovaného profilu R_{sk} [30]	39
Obrázek 35: Špičatost posuzovaného profilu R_{ku} [30].....	40
Obrázek 36: Průměrná šířka prvků profilu R_{sm} [32]	40
Obrázek 37: Křivka materiálového poměru [32]	41
Obrázek 38: Schematické znázornění principu dotykového profilometru [30]	42
Obrázek 39: Schéma zařízení pro měření zbytkových pnutí pomocí elektrolytického odleptávání [37].....	46
Obrázek 40: Smluvní označení parametrů a schéma zatěžování při stanovení tvrdosti podle Rockwella (stupnice A, C) [38]	48
Obrázek 41: Smluvní označení parametrů a zatěžování při zkoušce tvrdosti dle Vickerse [38]	49
Obrázek 42: Smluvní označení parametrů a zatěžování při zkoušce tvrdosti podle Brinella [38].....	50
Obrázek 43: Zobrazení vtisku při zkoušce tvrdosti dle Knoopu[43]	52
Obrázek 44: Indentoru dle Berkoviče [43].....	53
Obrázek 45: Schematický obrázek provedení měření tvrdosti Poldi kladívkem [43].....	54
Obrázek 46: Schematický obrázek provedení měření tvrdosti: a) Shoreho skleroskopem b) Durosopem [43].....	55
Obrázek 47: Schéma přípravy metalografického výbrusu [45]	57
Obrázek 48: Frézované destičky a destičky po aplikaci SP před rozřezáním.....	59
Obrázek 49: Nařezané destičky pro měření zbytkových napětí zleva frézované destičky, destičky po SP a destičky po LSP.....	59

Obrázek 50: Frézovaný blisk 1°	60
Obrázek 51: Profiloměr Mahr XCR 20 [47]	61
Obrázek 52: Graf porovnání parametru drsnosti Ra	62
Obrázek 53: Graf porovnání parametru drsnosti Rmax	63
Obrázek 54: Naměřený profil povrch vzorku LSP 1A	63
Obrázek 55: Pracoviště na měření zbytkového pnutí.....	65
Obrázek 56: Zbytková napětí blisku 1° – jednotlivé lopatky a odleptaná plocha v 50 % výšky lopatky.....	66
Obrázek 57: Zbytková napětí blisku 1° – jednotlivé lopatky a odleptaná plocha v 10 % výšky lopatky.....	67
Obrázek 58: Zbytková napětí SP destiček - jednotlivé vzorky	68
Obrázek 59: Zbytková napětí SP destiček - průměrná hodnota	68
Obrázek 60: Lineární část zbytkových napětí u vzorku LSP B1.....	70
Obrázek 61: Zbytková napětí LSP destiček - jednotlivé vzorky.....	70
Obrázek 62: Zbytková napětí LSP destiček - průměrná hodnota	71
Obrázek 63: Porovnání zbytkových napětí SP a LSP destiček.....	72
Obrázek 64: Porovnání zbytkových napětí blisku 1°, SP a LSP destiček	72
Obrázek 65: Vlevo Struers Labotom- 3 a vpravo Struers CitoPress- 10	73
Obrázek 66: Použité přípravky: DuroFast, ClaroFast, AntiStick a identifikační štítek	74
Obrázek 67: Vzorek zalisovaný a zalitý za tepla po broušení	75
Obrázek 68: Použité přípravky: DuroCit, DuroCit- 3 Liquid I, DuroCit- 3 Liquid II	75
Obrázek 69: Formy pro výrobu metalografických vzorků za studena	76
Obrázek 70: Úhelník od firmy Struers vhodný pro výrobu metalografických vzorků za studena	76
Obrázek 71: Vybroušené metalografické vzorky zalité za studena	77
Obrázek 72: Struers Tegramin-25	77
Obrázek 73: DP-Spray s velikostí zrn 9 µm od firmy Struers	79
Obrázek 74: Přípravky použité pro konečnou operaci broušení (OP-S Suspension a Peroxid vodíku 30% p.a.)	79
Obrázek 75: Zařízení pro měření mikrotvrdosti	80
Obrázek 76: Schématické zobrazení lopatky v metalografickém vzorku	81

Obrázek 77: Zobrazení vzorku v metalografickém vzorku při použití speciálního úhelníku [48]	81
Obrázek 78: Profil mikrotvrdosti pro všech 5 lopatek	82
Obrázek 79: Průměrná hodnota mikrotvrdosti lopatek z 5 měření	83
Obrázek 80: Profil mikrotvrdosti SP vzorku J1A	83
Obrázek 81: Profil mikrotvrdosti SP vzorku J2A	84
Obrázek 82: Profil mikrotvrdosti SP vzorků	84
Obrázek 83: Profil mikrotvrdosti SP vzorků	84
Obrázek 84: Profil mikrotvrdosti LSP vzorku LSP B1	85
Obrázek 85: Profil mikrotvrdosti LSP vzorku LSP B2	85
Obrázek 86: Profil mikrotvrdosti LSP vzorků	86
Obrázek 87: Mikroskop Neophot 2	87
Obrázek 88: Makrostruktura v oblasti vetknutí lopatky – Kroll, 25x	88
Obrázek 89: Mikrostruktura v oblasti lopatky – Kroll, 400x	89
Obrázek 90: Mikrostruktura v oblasti disku – Kroll, 400x	89
Obrázek 91: Negativní zkouška na přítomnost alfatizované vrstvy – bifluorid amonný, 400x	89
Obrázek 92: Struktura SP destičky – Kroll, 100x	90
Obrázek 93: Struktura SP destičky – bifluorid amonný, 100x	90
Obrázek 94: Struktura LSP destičky – Kroll, 100x	91
Obrázek 95: Struktura LSP destičky – bifluorid amonný, 100x	91

7 Seznam tabulek

Tabulka 1: Srovnání některých vlastností titanu s jinými prvky [4]	15
Tabulka 2: Příklady titanových rud [5]	15
Tabulka 3: Chemické složení slitiny Ti-6Al-4V [9]	19
Tabulka 4: Mechanické vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V [9]	19
Tabulka 5: Fyzikální vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V [9]	19
Tabulka 6: Nejčastější použití řízeného kuličkování [15]	27
Tabulka 7: Přehled nejdůležitějších nedestruktivních metod [37]	44
Tabulka 8: Nejpoužívanější stupnice podle Rockwella [38]	47
Tabulka 9: Porovnání naměřených parametrů drsnosti	62