

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



MOŽNOSTI SNIŽOVÁNÍ VNITŘNÍCH PNUTÍ
U Ti-SLITIN

POSSIBILITIES OF REDUCING INTERNAL STRESSES IN Ti-ALLOYS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR:	ANETA CRHANOVÁ
VEDOUCÍ PRÁCE:	Ing. ZDENĚK PITRMUC, Ph.D.
STUDIJNÍ PROGRAM:	VÝROBA A EKONOMIKA VE STROJÍRENSTVÍ
STUDIJNÍ OBOR:	TECHNOLOGIE, MATERIÁLY A EKONOMIKA STROJÍRENSTVÍ

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Crhanová** Jméno: **Aneta** Osobní číslo: **501487**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Možnosti snižování vnitřních pnutí u Ti-slitin

Název bakalářské práce anglicky:

Possibilities of reducing internal stresses in Ti-alloys

Pokyny pro vypracování:

1. Možnosti a principy snižování vnitřních napětí.
2. Literární rešerše doporučených parametrů mezioperačního žhání.
3. Návrh experimentu pro zjištění potřebných teplot a časů žhání.
4. Provedení řízeného zpevnění a testování parametrů žhání.

Seznam doporučené literatury:

DONACHIE, Matthew J. Titanium: a technical guide. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2004. ISBN 0-87170-686-5.
Wagner, L. (2006). Shot Peening. John Wiley & Sons.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2023** Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením pana Ing. Zdeňka Pitrmuce, Ph.D. a veškeré použité literární prameny a zdroje informací uvádím v přiloženém seznamu.

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

V Praze dne:

Podpis autora:

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu, panu Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi, Ph.D., za odborné vedení mé bakalářské práce, za jeho cenné profesionální rady, připomínky, postřehy a vstřícnost během tvorby bakalářské práce.

Chtěla bych také poděkovat mé rodině za jejich nekončící podporu.

Anotace

Bakalářská práce se zaměřuje na možnosti, jak docílit snižování vnitřních pnutí u titanových slitin.

V první části práce dochází k seznámení se s fakty týkající se titanových slitin, vnitřního pnutí a jeho rozdělení a informace o technologii tryskání. Zároveň se zde zmiňují možnosti, jakými způsoby se dá vnitřní pnutí snížit.

Na základě teoretické části, kde jsou důležitá fakta, se druhá část bakalářské práce zabývá ověřením jedné metody na snížení pnutí, a to u titanové slitiny Ti-6Al-4V. Procesem tryskání se docílí uměle vytvořeného pnutí, které se projeví u vzorků průhybem. Jednou z metod, konkrétně žíháním, proběhne zkoušení snížení či odstranění těchto pnutí. Poté se celý technologický postup ověří pomocí měření velikostí průhybů před a po tepelném zpracování a měření zbytkových napětí u vzorků.

Klíčová slova

Titanové slitiny, Ti-6Al-4V, vnitřní pnutí, žíhání, abrazivní tryskání, kuličkování, Almenův test, saturace

Annotation

The bachelor's thesis focuses on the possibilities of reducing internal stresses in titanium alloys.

In the first part of the work, the facts regarding titanium alloys, internal stress and its distribution, and information on the technology of jetting are introduced. At the same time, it mentions the ways in which internal tension can be reduced.

Based on the theoretical part, where the facts are important, the second part of the bachelor's thesis deals with the verification of one method for stress reduction, namely for the titanium alloy Ti-6Al-4V. Through the blasting process, an artificially created tension is achieved, which is manifested in the samples by deflection. One of the methods, namely annealing, will be used to test the reduction or elimination of these stresses. After that, the entire technological procedure is verified by measuring the deflections before and after heat treatment and measuring the residual stresses in the samples.

Key words

Titanium alloys, Ti-6Al-4V, internal stress, annealing, abrasive blasting, shot peening, Almen test, saturation

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Titan a jeho slitiny.....	10
2.1	Titan.....	10
2.2	Slitiny titanu	11
2.2.1	Rozdělení slitin titanu	12
2.2.2	Vlastnosti slitin titanu	12
2.2.3	Tepelné zpracování	14
2.2.4	Titanová slitina Ti-6Al-4V.....	14
2.3	Použití titanu a jeho slitin.....	15
3	Vnitřní pnutí.....	17
3.1	Vnitřní pnutí a jeho rozdělení.....	17
3.1.1	Okamžitá (dočasná) pnutí	17
3.1.2	Zbytková pnutí.....	17
3.2	Způsoby odstranění vnitřních pnutí	18
3.2.1	Žihání	19
3.2.2	Vibrační odlehčení pnutí.....	20
3.3	Měření vnitřních pnutí.....	20
3.3.1	Metoda vrtání otvorů.....	21
3.3.2	Metoda hlubokých děr	21
3.3.3	Metoda dělení.....	22
3.3.4	Rentgenová difrakční metoda	23
3.3.5	Neutronová difrakční metoda	23
3.3.6	Barkhausenova metoda šumu.....	23
4	Tryskání	25

4.1	Princip.....	25
4.2	Abraziva.....	25
4.2.1	Rozdělení abraziv.....	25
4.2.2	Vlastnosti tryskacích médií.....	27
4.3	Tryskání titanu	28
4.4	Kuličkování.....	28
4.5	Saturace	29
4.6	Almenův test.....	30
4.6.1	Almenovy pásky	31
5	Zkoušení odstranění vnitřního pnutí u titanové slitiny Ti-6Al-4V.....	32
5.1	Návrh experimentu.....	32
5.2	Samotný experiment	33
5.2.1	Tryskání vzorků.....	34
5.2.2	Žihání vzorků.....	36
5.2.3	Měření vzorků	39
6	Vyhodnocení výsledků	49
6.1	Vyhodnocení měření průhybů.....	49
6.2	Vyhodnocení měření zbytkových pnutí	51
6.3	Porovnání obou zvolených metod měření.....	52
7	Závěr.....	53
	Seznam použité literatury.....	54
	Seznam obrázků.....	57
	Seznam tabulek.....	59

1 Úvod

V současnosti se titanové slitiny uplatňují v různých odvětvích od lékařství až po letectví. Největší množství výrobků z těchto materiálů najdeme v leteckém a zbrojním průmyslu a v biomedicíně, protože pro tato odvětví je důležité, aby byly jednotlivé díly přesné a udržely si tvarovou stálost. Proto se v současnosti tyto materiály podrobují zkouškám a výzkumům, aby se o těchto materiálech vědělo více. Titan a jeho slitiny se řadí k materiálům, které nemají ve světě dlouhou historii, protože se začaly používat relativně nedávno. Nyní se však řadí k materiálům, bez kterých bychom se už nedokázali obejít.

Tato bakalářská práce se na tyto materiály zaměřuje, a to v oblasti snižování vnitřních pnutí, které se v materiálu mohou v průběhu výrobního procesu vyskytnout. Zároveň se tato práce bude snažit poskytnout bližší informace o vnitřních pnutí a jak je snížit či odstranit.

Součástí této práce je i praktická část, jejímž cílem bylo vyhodnocení zjištěných dat, jak docílit snížení či odstranění pnutí, z odborné literatury. Slitina Ti-6Al-4V byla podrobena experimentu, kdy se nejprve „uměle“ vytvořilo vnitřní pnutí, které se mělo jedním z možných způsobů snížit či odstranit.

2 Titan a jeho slitiny

2.1 Titan

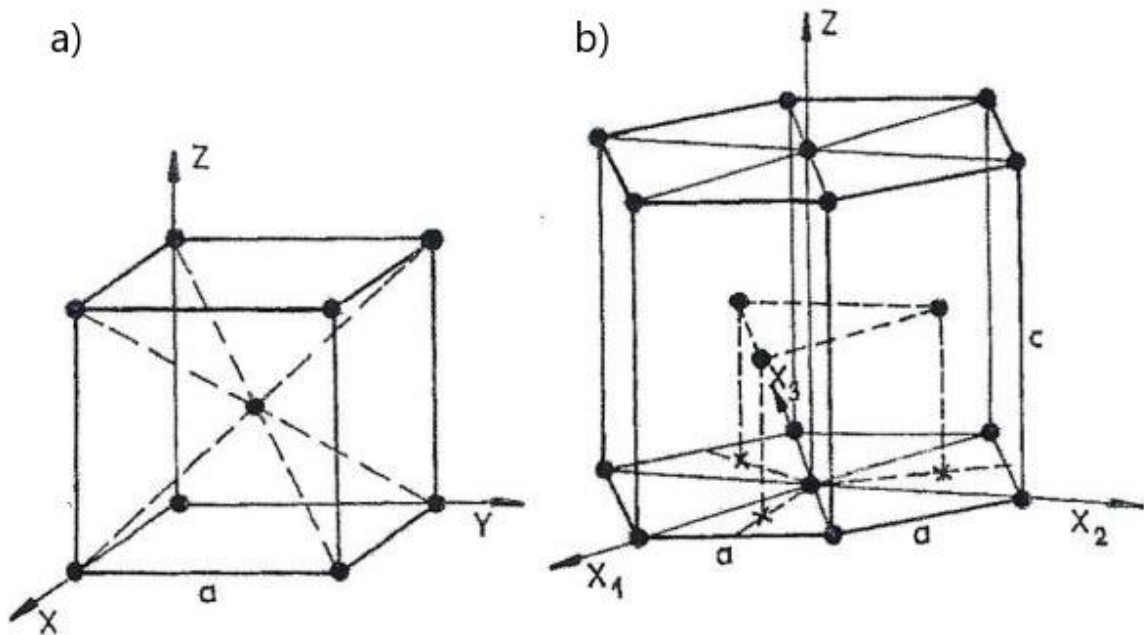
Titan byl objeven daleko dříve, než se začal vůbec ve světě používat. I když tento prvek, jehož chemická značka je Ti, spatřil světlo světa již v 18. století, konkrétně v roce 1791 a to díky Angličanu Williamu Gregorovi, který objevil titanovou rudu, a poté o čtyři roky později, nezávisle na Gregorově objevu, narazil na tu samou rudu i Němec Martin Heinrich Klaproth, který ji dal jméno, které známe dnes, titan, ryze čistý titan byl vyroben až na začátku 20. století, kdy pro něj lidé začali nacházet uplatnění. [1] [2]

Tento tmavě šedý kov má atomové číslo 22, jehož tepelná vodivost dosahuje hodnot 11,4 W/m.K. Při teplotě 1668 °C dochází k tání tohoto neželezného kovu. Kov se vyznačuje hustotou, jejíž hodnota činí 4,51 g/cm³, takže se řadí do skupiny lehčích kovů. V porovnání s hustotou oceli, má titan přibližně o 40 % hodnotu nižší. Zároveň se řadí do skupiny netoxických prvků. [1]

Hlavními přednostmi titanu jsou výborná odolnost proti korozi a biologická kompatibilita, a to k lidským kostem i tkáním. Tento lehký kov se vyznačuje zároveň zápornějšími vlastnostmi, a tou je špatná zpracovatelnost procesem obrábění. [1]

Čistý titan se do teploty 882,5 °C vyskytuje v alotropické modifikaci zvané alfa, která právě po překročení zmíněné teploty se mění na jinou modifikaci, která se označuje beta. Každá z těchto modifikací titanu se vyznačuje odlišnou krystalovou mřížkou (obrázek 1):

- Alfa – hexagonální těsně uspořádaná mřížka (zkráceně značena jako h. c. p.) – obrázek 1 b)
- Beta – krychlová prostorově centrovaná mřížka (zkráceně značena jako b. c. c.) – obrázek 1 a) [1] [3] [4]



Obrázek 1 - Krystalové mřížky - a) krychlová prostorově centrovaná, b) hexagonální těsně uspořádaná [4]

2.2 Slitiny titanu

K titanu se pro tvorbu různých druhů titanových slitin přidávají přísadové prvky.

Ty se dělí do třech skupin, a to podle jejich vlastností na:

- Stabilizátory alfa – patří sem například uhlík, dusík, hliník.
- Stabilizátory beta – patří sem například niob, vanad, molybden.
- Neutrální přísadové prvky – řadí se sem například zirkonium nebo cín. [1]

[3]

Přísadové prvky mohou mít vliv na teplotu fázové přeměny, týká se to stabilizátorů alfa a beta, anebo tuto teplotu vůbec neovlivňují (neutrální prvky). Pro zvýšení této teploty je vhodné použít první skupinu stabilizátorů (alfa). Abychom docílili snížení teploty, je zapotřebí např. vanad, který se řadí do skupiny přísadových prvků beta.

[3]

2.2.1 Rozdělení slitin titanu

Slitiny titanu se dělí do pěti kategorií, a to dle jejich struktury na:

- Slitiny alfa
 - Obsahují pouze alotropickou modifikaci alfa.
- Slitiny pseudo alfa
 - Dominantní modifikací je alfa, kterou doplňuje malé procento bety.
- Slitiny alfa + beta
 - Jedná se o slitiny, které mají namixované obě alotropické modifikace v přibližně stejném poměru.
- Slitiny beta
 - U těchto slitin se ve struktuře lze setkat pouze s betou.
- Slitiny pseudo beta
 - Vyznačují se tím, že modifikace beta má výrazné zastoupení v těchto slitinách a přidává se k ní malé procento alfy. [1] [3]

Zároveň lze slitiny rozdělit i podle toho, kde se používají. Můžeme se setkat se slitinami, které jsou vhodné pro tváření nebo pro odlévání. [3]

2.2.2 Vlastnosti slitin titanu

Pro slitiny, kde je skoro polovina a více množství bety, dochází ke zvýšení hustoty, zlepšení zpracovatelnosti titanových slitin, ale tím se získá i zvýšená citlivost na rychlost deformací. Zatímco u slitin, kde tvoří polovinu a více modifikace alfa, se setkáme s podstatně lepší svařitelností či vyšší pevností při tečení. U slitin alfa se jako výhody mohou zmínit jejich dobrá pevnost a také to, že se vyznačují tepelnou stabilitou. Slitiny pseudo alfa mají jako hlavní přednost tvářitelnost při teplotách odpovídající pokojové hodnotě, která je podstatně lepší než u ostatních druhů. U slitin alfa + beta, do které se řadí i Ti-6Al-4V, která se použila v praktické části, se můžeme setkat s dobrou tvářitelností, které se ale zajistí až tím, že slitiny projdou žháním, v porovnání se slitinami, které označujeme jako pseudo alfa. Zbylé druhy slitin se vyznačují zejména korozní odolností. [1] [3]

Jedna z hlavních vlastností, která se řadí do kategorie záporných je, že se titanové slitiny oproti klasickým materiálům (např. ocel) opracovávají na obráběcích strojích náročněji. Během procesu nabývají řezné síly vyšších hodnot než při tom samém procesu, kde je ale jako materiál použita ocel. Zejména na to mají vliv vlastnosti samotných materiálů, především vlivem metalurgie. [1]

Při porovnání obrábění oceli a titanu (i jeho slitin), které dosahují stejných parametrů tvrdosti, se dospělo k závěru, že obrobená ocel je z hlediska výroby levnější, než když se bude obrábět titan, případně jeho slitiny, protože se výrobní náklady pro zpracování titanu a jeho slitin na strojích zvýší s použitím nástrojů, které se na tyto materiály dají použít. [1]

Pro dobrý výsledek obrábění titanu a jeho slitin je důležité znát hned několik důležitých věcí:

- vedení tepla
- modul pružnosti materiálu
- náchylnost k možnému poškození povrchu [1]

Tabulka 1 - Porovnání oceli C45 s titanovou slitinou Ti-6Al-4V, hodnoty pro C45 z [5] a Ti-6Al-4V z [6]

materiál	C45	Ti-6Al-4V
hustota [g.cm ⁻³]	7,85	4,43
mez kluzu [MPa]	275	830
modul pružnosti [GPa]	205	114
koeficient tepelné roztažnosti [K ⁻¹ · 10 ⁻⁶]	11,5	8,7
tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	34,2	7,1

Při porovnání oceli C45 a titanové slitiny Ti-6Al-4V (viz. tabulka 1) se ukazuje, že hodnota tepelné vodivosti a koeficient tepelné roztažnosti dosahují nižších hodnot než pro ocel C45. Titanová slitina má výraznou mez kluzu, ale nižší hodnotu modulu pružnosti ve srovnání s ocelí. Slitina dosahuje nižší hodnoty hustoty (cca o 40 %) než u oceli.

Při obrábění těchto materiálů, které se řadí do kategorie těžkoobrobitelných, se upravují i klasické metody. Např. pro frézování drážky v materiálu z titanové slitiny se namísto klasického frézování, používá frézování, které se nazývá trochoidní a liší se v dráze nástroje. [7]

2.2.3 Tepelné zpracování

Pro tyto materiály se zavádí tepelné zpracování hned z několika důvodů. Jedná se hlavně o:

- snížení vnitřních pnutí, které během procesu výroby v součásti vznikly.
- zvýšení pevnosti.
- vytvoření ideální kombinace tří vlastností: tažnosti, obrobitelnosti a dobré stability (a to u rozměrů a materiálové struktury).
- optimalizaci dalších vlastností, ke kterým se řadí zejména lomová houževnatost i únavová pevnost. [1]

Používá se hned několik tepelných zpracování, kterými docílíme různých změn u materiálů. Především se jedná o různé druhy žíhání. Pro titanové slitiny se často lze setkat zejména s rekrytalizačním žíháním, žíháním na odstranění pnutí, stabilizačním, dvojitém a izotermickým žíháním. Pro každou slitinu se parametry těchto procesů mohou nepatrně lišit. [1] [3]

2.2.4 Titanová slitina Ti-6Al-4V

Označována bývá i jako Titan Grade 5. Řadí se do skupiny alfa + beta slitin. Z této skupiny patří k nejpoužívanějším slitinám a lze se s ní setkat u různých aplikací, zejména v leteckém průmyslu (prstence turbín, lopatky, konstrukční díly pro letadla). [1] [8]

U této slitiny je hliník alfa stabilizátorem a beta stabilizátorem je vanad. Ti-6Al-4V má hodnotu hustoty $4,429 \text{ g/cm}^3$, což je tedy výrazně nižší než hodnoty u různých ocelí. Pokud slitina projde tepelným zpracováním ve formě žíhání, lze ji využít do prostředí, kde teploty mohou dosahovat hodnot 400 °C . [1] [8]

Pro snížení pnutí, které vzniklo během výroby, se využívá žíhání na odstranění pnutí. Vhodné teploty pro toto tepelné zpracování právě u titanové slitiny Ti-6Al-4V se v různých literaturách a podkladech liší (viz. tabulka 2). [3]

Tabulka 2 - Varianty tepelného zpracování pro snížení pnutí u Ti-6Al-4V, data pro 1. variantu z [1] a pro 2. variantu z [9]

varianta	1. varianta	2. varianta
teploty žíhání [°C]	480 až 650	538 až 649
čas žíhání [hod]	1 až 4	1 až 8

2.3 Použití titanu a jeho slitin

I když se může zdát, že titan a jeho slitiny se dají použít v prostředích, kde mohou být teploty daleko vyšší než např. 800 °C, protože teplota tání tohoto kovu se pohybuje až kolem hodnoty 1668 °C, běžně se dávají do prostředí, kde se teploty nevyšplhají k hranici 538 °C. Pro některé slitiny se tato hranice může pohybovat na hodnotě 595 °C, ale důležité je zde chemické složení dané titanové slitiny. [1]

U slitin titanu, kde je dominantním přísadovým prvkem hliník (chemická značka Al), se teploty, pro které se doporučuje tento materiál využít, šplhají k hodnotě 760 °C, což oproti ostatním slitinám činí výrazný rozdíl v teplotě pro možné aplikace o více jak 200 °C. [1]

Vzhledem k výborným vlastnostem, zejména odolností vůči korozi, nízké hustotě, biokompatibilitě a mnoho dalších, tyto materiály našly uplatnění zejména v lékařství (pro různé implantáty), v chemickém a petrochemickém průmyslu, ale i v letectví a kosmickém průmyslu (např. lopatky, konstrukční díly). [1] [8]

V minulém století vznikl letoun, u kterého se použila titanová slitina beta. V leteckém průmyslu se jednalo o premiéru této slitiny. Jednalo se o letoun SR-71 Blackbird, který je možno vidět na obrázku 2. [1]



Obrázek 2 - Tři letouny SR-71 Blackbird [10]

3 Vnitřní pnutí

3.1 Vnitřní pnutí a jeho rozdělení

Během procesu výroby součástí se stává, že se v materiálu vytvoří vnitřní pnutí (dalším označením je vnitřní napětí). Vznikají např. kvůli obrábění (soustružení, frézování, ...), svařování, tváření za studena, případně tím, že chlazení součástí neproběhlo rovnoměrně. Vnitřní pnutí lze rozdělit dle několika hledisek. [3][11][12]

Hlavní rozdělení je dle časového působení:

- Okamžitá (dočasná) vnitřní pnutí
- Trvalá (zbytková) vnitřní pnutí [11] [12]

3.1.1 Okamžitá (dočasná) pnutí

Tato skupina vnitřních pnutí obvykle po ukončení toho, co zapříčinilo vznik těchto napětí, zanikne. Příkladem může být to, když teplota v celém objemu součásti není konstantní, čímž dojde právě ke vzniku dočasných pnutí. Když se ale teplota v součásti dostane do rovnováhy, toto pnutí zanikne. [11] [12]

3.1.2 Zbytková pnutí

Tento druh se od přechozího liší v tom, že když dojde k odstranění vnějšího působení, tak napětí, které díky tomu vzniklo, v materiálu zůstane i nadále. [11] [12]

Zbytková neboli trvalá pnutí se dále dělí dle několika hledisek. Jedno z nich, jak je rozdělit, je dle příčiny jejich vzniku, a to do následujících kategorií:

- Tepelná – mohou být způsobena z několika příčin, jedním z možných způsobů je to, že různé části výrobku dosahují rozdílných hodnot teplotních koeficientů roztažnosti
- Deformační – obvykle se jedná o pnutí, které je způsobeno různě deformovanými jednotlivými částmi výrobku, kdy např. během třískového

obrábění dochází k tomu, že deformace v povrchové vrstvě jsou výrazně vyšší než uvnitř součásti.

- Strukturální – u tohoto druhu pnutí obvykle hledáme příčinu ve struktuře, kde proběhla transformace, která se dá označit jako nehomogenní. [11]

Dalším možným rozdělením zbytkových pnutí je dle velikosti objemu, ve kterém se vnitřní pnutí dostanou do rovnováhy, a to celkem do tří skupin:

- zbytkové napětí I. druhu – lze ho označit i jako makropnutí
 - Jedná se o pnutí, které se nachází v celém objemu součásti.
 - Orientace pnutí souvisí s geometrií součásti.
 - zbytkové napětí II. druhu – jiný název je mikropnutí
 - Tato pnutí se obvykle vytvoří během transformace fází a v objemu jsou obvykle na úrovni velikosti zrn.
 - Orientace pnutí nesouvisí se součástí.
 - zbytkové napětí III. druhu – mohou se označovat jako submikroskopická
 - S těmito pnutími, které jsou na úrovni rozměrů elementární buňky krystalové mřížky, se setkáváme v případech, kdy došlo k bodovým mřížkovým poruchám, jako jsou např. substituční atomy, vakance.
- [11] [12]

Všechna tato pnutí se jednotlivě nevyskytují, protože se navzájem ovlivňují. Příkladem takového ovlivnění může být to, když v součásti vzroste zbytkové napětí II. druhu, mohlo by to vést k tomu, že se vytvoří zbytkové napětí I. druhu. Superpozicí všech tří skupin zbytkových vnitřních pnutí (tj. I. až III. druhu) dochází k vnitřní napjatosti. [11] [12]

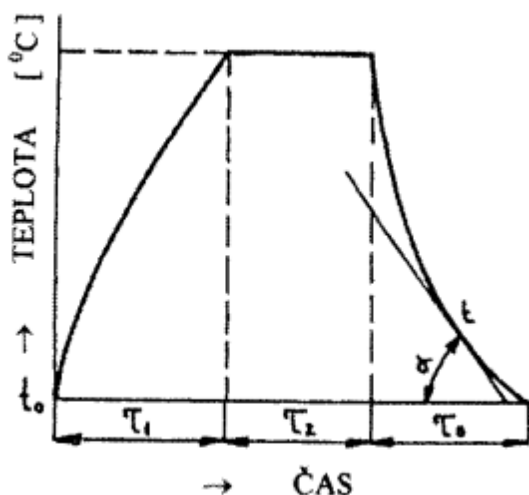
Zbytková napětí se zároveň dají dělit na tahová zbytková napětí a tlaková zbytková napětí. [13]

3.2 Způsoby odstranění vnitřních pnutí

Zbytkové vnitřní pnutí se při výrobě stává častým problémem, který se musí řešit, a proto existují možnosti, jak toto pnutí snížit, či odstranit.

3.2.1 Žihání

Jedním ze způsobů, jak docílit odstranění pnutí, je tepelné zpracování zvané žihání, konkrétněji žihání na odstranění pnutí. Toto tepelné zpracování se řadí do kategorie bez překrytalizace. Žiháním se snažíme pnutí v materiálu snížit, či docílit jeho úplného odstranění. Obecně se tepelné zpracování skládá ze třech částí, ohřevu na požadovanou teplotu, poté výdrž na teplotě a jako poslední následuje ochlazování. Obrázek 3 zobrazuje obecný diagram tepelného zpracování a jednotlivé fáze. [3] [11]



Obrázek 3 - Diagram tepelného zpracování (obecně) [11]

Obecně se udává, že tento proces, žihání na odstranění pnutí, by měl probíhat pro titan a jeho slitiny v rozmezí hodnot 450 až 650 °C a měl by se provádět v jednotkách hodin. Každá slitina má své doporučené rozmezí teplot, při kterém se doporučuje provádět právě žihání na odstranění pnutí. V případě, že nechceme, aby se nám během procesu chlazení v materiálu vytvořilo pnutí nové, dbáme se na to, aby se chlazení provádělo pomalu (např. v peci), obvykle do rozmezí 150 až 450 °C. [1][3]

3.2.2 Vibrační odlehčení pnutí

Kromě zmíněného žíhání se pro rozměrově větší součásti, u kterých se má snížit pnutí, dá využít metoda vibračního odlehčení pnutí, které má zkratku VSR (zkratka z anglického označení - Vibratory Stress Relief). [14] [15]

Tato metoda je oproti té klasické, tedy žíhání, rychlejší, což se promítne i do celkového výrobního času součásti, což je výhodné z ekonomického hlediska, protože tím může dojít k úspoře potřebných výrobních nákladů. Aby se docílilo co možná nejlepších výsledků při odstranění vnitřních pnutí, je podstatné použít vhodnou frekvenci vibrací, která se pro každý výrobek liší. Během tohoto procesu není nutné ventilační zařízení, protože nedochází k vypařování plynů. [14] [15]

V 60. letech 20. století ve Spojených státech amerických vzniklo zařízení, které fungovalo na tomto principu a obsluha byla prováděna manuálním způsobem. V průběhu let se podařilo vyrobit zařízení, které už k práci nepotřebuje člověka, protože proces probíhá v plně automatickém režimu. [15]

3.3 Měření vnitřních pnutí

U skupiny zbytkových vnitřních pnutí se klade důraz na jejich měření v součástkách. Protože se tento druh napětí stále ve výrobcích nachází, provedlo se několik výzkumů, jak se dokáží měřit.

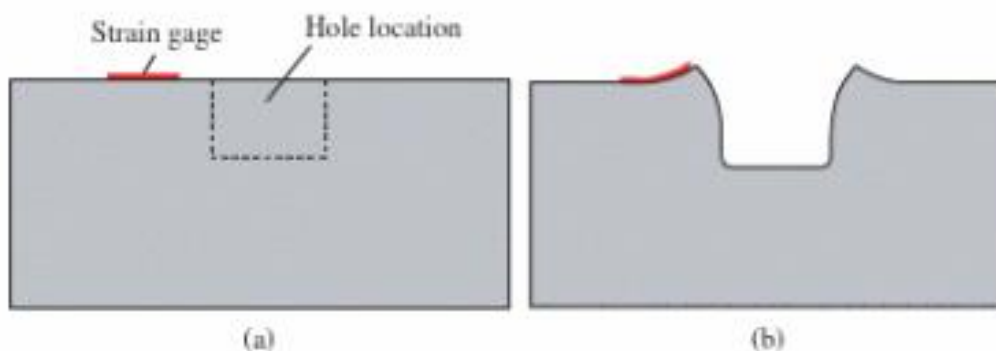
Způsoby měření vnitřních zbytkových pnutí se dělí do třech hlavních kategorií:

- Nedestruktivní – po měření se součást dá dále používat
- Polodestruktivní – po skončení měření bývá poškození součásti malé a je možno ho akceptovat, nebo lze opravit, aby se součást dala použít i nadále
- Destruktivní – na konci měření se součást už nedá použít, protože došlo k jejímu poškození [13]

Destruktivní a polodestruktivní metody měření lze také označit jako metody mechanické. Dochází u nich k měření napětí, která jsou v součásti, tím, že se u dílu odstraní část materiálu. [13]

3.3.1 Metoda vrtání otvorů

Tato metoda se vyznačuje jednoduchostí a časovou nenáročností. Řadí se do skupiny polodestruktivních metod. Ve světě patří k těm více využívaným. Princip tohoto způsobu měření je snadný. Nejprve se v součásti musí vyvrtat malý otvor (obvyklý průměr bývá kolem 1,8 mm), což způsobí, že se vnitřní zbytková napětí uvolní a díky deformacím, které získáme měřením v blízkosti otvoru (hole location) dojde k vypočtení zbytkových napětí. To se provádí za pomoci tenzometru (strain gage). Na obrázku 4 vlevo (označeno jako a) jde vidět, jak to vypadá před samotným vrtáním otvoru a vpravo (označeno jako b) lze pozorovat po vytvoření otvoru a následném uvolnění pnutí, kterým se docílí změny tvaru otvoru. [13][16]



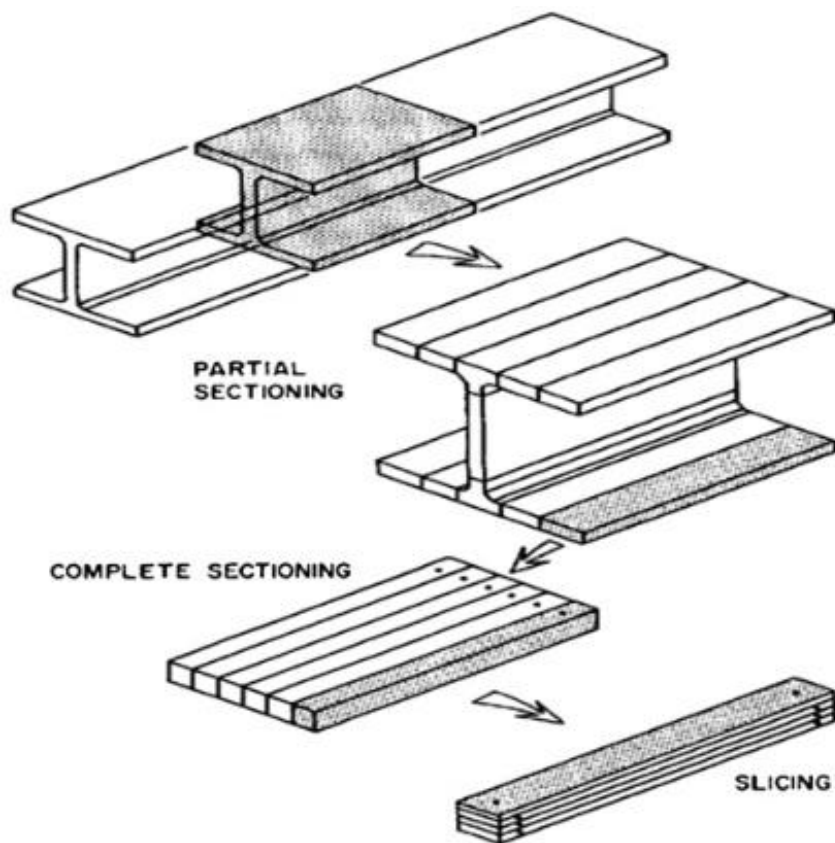
Obrázek 4 - Schéma před (a) a po (b) vrtání otvoru [16]

3.3.2 Metoda hlubokých děr

Tato metoda, jejíž zkratka je DHD (z angličtiny Deep Hole Drilling) se také uplatňuje pro měření vnitřních pnutí, kde se řadí do kategorie polodestruktivních metod. Oproti metodě vrtání otvorů, kde se vrtá pouze do malých hloubek, tato metoda se vyznačuje tím, že se vrtá otvor skrz tloušťku měřené součásti. Tato metoda se uplatňuje pro větší součásti. [13] [16]

3.3.3 Metoda dělení

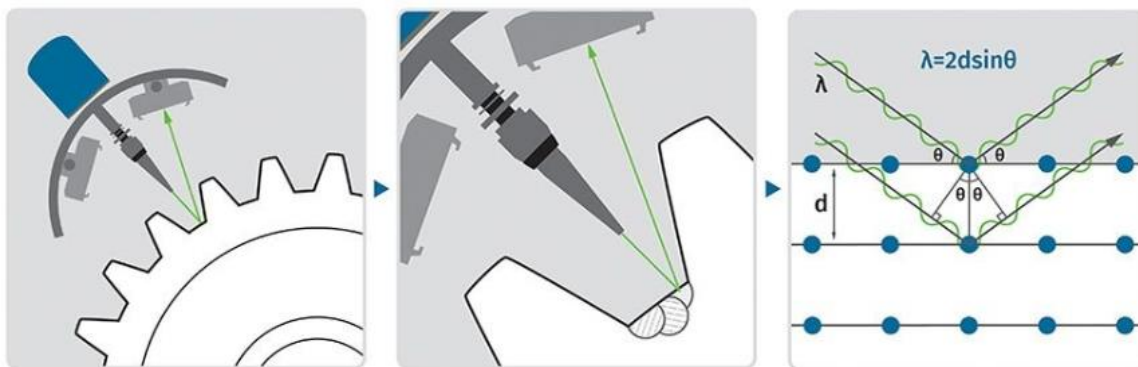
Výrobek po použití této metody už nelze použít. Uplatnění našla při vyhodnocení zbytkových napětí u materiálů, jako jsou uhlíkové a nerezové oceli, hliník. Z materiálu se řezem oddělí vzorek, čímž dojde k uvolnění pnutí, a poté následuje měření deformace za pomoci elektrických či mechanických tenzometrů, ze které se získají hodnoty zbytkových pnutí. Obrázek 5 ukazuje princip metody dělení, kdy se součást částečně rozdělí (partial sectioning). Oddělená část se po kompletně rozdělí (complete sectioning), a poté následuje krájení (slicing). [13]



Obrázek 5 - Princip metody dělení [13]

3.3.4 Rentgenová difrakční metoda

Tato metoda se začala na začátku 20. století více rozvíjet. Uplatnění nachází zejména pro materiály, které jsou jemnozrné. Dochází k měření atomových rovin, jejichž vzdálenost se díky pnutí v materiálu změní. Využívá se rentgenového záření, které se vyznačuje kratší vlnovou délkou, čímž se jedná o záření energičtější. Obvykle se měří do hloubky povrchu 10 mikronů. Metoda se řadí k těm rychlejším, protože probíhá v rozmezí několika minut až jedné hodiny. Jednoduché schéma této metody zobrazuje obrázek 6. [13] [16] [17]



Obrázek 6 - Schéma rentgenové difrakční metody [17]

3.3.5 Neutronová difrakční metoda

Podobá se rentgenové difrakční metodě. Právě tato metoda je vhodnější pro větší hloubky materiálu, kde se rentgenová difrakční metoda použít nedá. Pokud je možné vysoké prostorové rozlišení při měření, mohou se vytvořit 3D mapy znázorňující zbytková napětí v materiálu. [13]

3.3.6 Barkhausenova metoda šumu

Zkráceně se označuje MBM (z anglického názvu Magnetic Barkhausen Noise). Aby bylo možné ji použít pro měření zbytkových pnutí v povrchové vrstvě, musí být materiál feromagnetický. Při měření se součást zmagnetuje a demagnetuje,



a to v cyklech, a analyzuje se indukovaný Barkhausenův šum. V případě, že se v materiálu vyskytuje tahové napětí, dochází ke zvýšení amplitudy šumu. Při zaznamenání tlakového napětí se amplituda snižuje. Tato metoda se používá pro součásti, které prošly procesem kuličkování. [13] [18]

4 Tryskání

V současné době se proces provádí v tryskacích kabinách a komorách za pomoci člověka nebo plně automaticky nebo také stále lze setkat s pracovníkem, který má v ruce tryskací pistoli. Tryskací komory chrání lidi před možným zraněním abrazivem či jeho vdechnutím. Pokud automatickým způsobem či v tryskací komoře nelze tryskání provést, pracovník musí tryskat ve volném prostoru a musí být během procesu chráněn maskou. [19]

4.1 Princip

Při procesu tryskací abrazivo (další označením - tryskací médium) naráží na povrch součásti (dílu). Touto operací, která spadá do kategorie povrchových úprav, se docílí očištění povrchu. [20]

4.2 Abraziva

Pro samotný proces tryskání se používá několik možných variant tryskacích abraziv, která se dělí do několika kategorií. Při výběru vhodného tryskacího abraziva je důležité vědět, co tím budeme tryskat, jakého chceme docílit povrchu, důležitou roli hraje i jeho recyklovatelnost, velikost částic, případně i cena. [19]

4.2.1 Rozdělení abraziv

Jedno z možných rozdělení tryskacích médií je dle materiálu na:

- Kovové - např. vysoce a nízko uhlíková ocel, řezaný hliníkový drát
- Nekovové
 - Organické - např. suchý led, dřevěné pelety, pšeničný škrob, kukuřičná drť
 - Anorganické - např. křemičitý písek, olivínový písek, keramické kuličky, balotina [21]



Kovová tryskací abraziva

Do této skupiny tryskacích abraziv patří zejména:

Ocelová drť

- Běžně se tímto materiálem čistí výrobky ze železa od rzí a okují.
- Především se používá pro tryskání v kabinách či komorách a v tlakových zařízeních.
- Materiálem je speciálně tepelně zpracovaná ocel, která ve formě granulí prošla procesem drcení, aby se vyrobilo tryskací abrazivo s označením ocelová drť.
- Obsahuje kolem 1 % uhlíku, manganu a křemíku, které v minimálním množství doplňují fosfor a síra. [21] [22]

Ocelové kuličky

- Materiálem kuliček je ocel, která prošla speciální tepelnou úpravou.
- Tyto kuličky obsahují 0,75 % až 1,20 % uhlíku a další prvky (např. křemík, mangan) obvykle kolem 1 %.
- Využívá se pro součásti, kde chceme docílit zvýšení životnosti, např. ozubená kola. [21] [22]

Nekovová tryskací abraziva

Do skupiny nekovových tryskacích abraziv se zařazuje celá škála různých materiálů:

Balotina

- Jedná se o sodné sklo, která je ve formě kuliček.
- Předností tohoto abraziva je chemická odolnost, nehořlavost a také ekologická neškodnost.
- Uplatnění nachází při procesu kuličkování, případně i na balotinování barevných kovů. [22] [23]

Umělý korund

- Lze se s ním setkat ve variantě bílé či hnědé.
- Jednou z výhod tohoto materiálu je, že se během procesu štěpí a má stále ostré hrany.
- Tímto materiálem se tryskají zejména nerez, hliník či mosaz. [22][23]

Suchý led

- Toto tryskácí abrazivo je oxid uhličitý v pevném skupenství.
- Proces tryskání tímto abrazivem se skládá celkem ze tří fází, které jsou:
 1. Kinetická
 2. Tepelná
 3. Sublimace [21]

Dalšími zástupci nekovových abraziv jsou karbid křemíku, křemičitý písek, drcené sklo, olivín, přírodní granát. [23]

Druhým možným rozdělením je dle tvaru, a to na tři základní skupiny:

- Kuličky (označení S – z anglického shot)
- Zrna (označení G – z anglického grit)
- Válcové (označení C – z anglického cut wire) [21]

4.2.2 Vlastnosti tryskáčích médií

Každé tryskácí médium má určité vlastnosti, kterými si od ostatních odlišuje. Tyto specifikace se dají kategorizovat do tří hlavních skupin:

1. Základní

- Do této skupiny patří informace o velikosti a tvaru zrn abraziva, jeho odolnosti vůči opotřebení, dále také původ zrna (např. přirozené, vyrobené). Důležitou specifikací, která se sem taky zařazuje, je materiál abraziva a také stav abraziva.

2. Mechanické

- Do druhé skupiny se řadí hlavně tvrdost a pevnost v tahu.

3. Technologické

- Poslední skupinou vlastností vystihující tryskací abraziva jsou technologické, kam patří zejména efekt zdrsnění a schopnost abraziva odebrat materiál. [21]

4.3 Tryskání titanu

Proces tryskání obvykle probíhá za sucha, kdy částice abraziva vytvoří směs se stlačeným vzduchem. Tento postup ale pro titan není vhodný a využívá se tzv. mokrého tryskání, což spočívá v tom, že se přidá voda. To má za následek, že se částice titanu odstraněné z povrchu součásti nemohou volně pohybovat po komoře. Při použití tryskání za sucha hrozí riziko, že volné částice titanu po tryskání se vystavují vzduchu, což by mohlo vytvořit výbušnou směs. Právě z takového důvodu se v průmyslu tryská titan mokrým tryskáním. [24]

4.4 Kuličkování

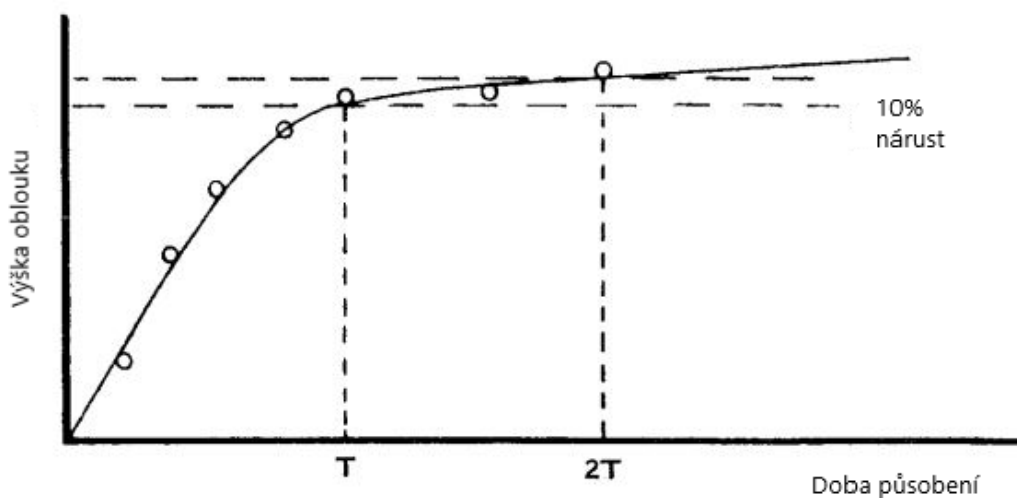
Pro tento technologický proces se používají abraziva sférického tvaru (např. kuličky z oceli či oxidu křemičitého, nebo také balotina). Použitím této technologie se docílí vytvoření zbytkových tlakových napětí v povrchové vrstvě. Při nárazu abraziva s tvarem kuličky na plochu dochází k tomu, že se vrstva plasticky zdeformuje a vzniká důlek. Je důležité mít na paměti, že i tryskací média ve formě kuliček se časem opotřebí, zejména v případech, kdy už není zajištěn tvar kuličky, kterým se povrchová vrstva zpevňuje. Obrázek 7 ukazuje, jaký výsledek má dopad kuličky na povrch. [25] [26]



Obrázek 7 - Dopadnutí kuličky na povrch a výsledná plocha po dopadu [26]

4.5 Saturace

Během kuličkování dochází k nárůstu zakřivení součásti. To se děje nejprve lineárně, ale za nějakou dobu se zakřivení tak moc nezvětšuje a v určitém bodě se nárůst zakřivení dá zanedbat. K určení tohoto bodu se používá pravidlo 10 %. Snažíme se určit bod saturace, kdy zakřivení (průhyb) lze zanedbat a tím dospějeme i ke křivce saturace, kde jsou vyobrazeny fáze procesu kuličkování (lineární, zpomalení nárůstu a část zanedbatelného přírůstku). Saturačním bodem se myslí bod, kdy se hodnota výšky průhybu (oblouku) nezvětší o více než 10 % v případě, že došlo ke zdvojnásobení času kuličkování. Výslednou saturační křivku zobrazuje obrázek 8. [27]

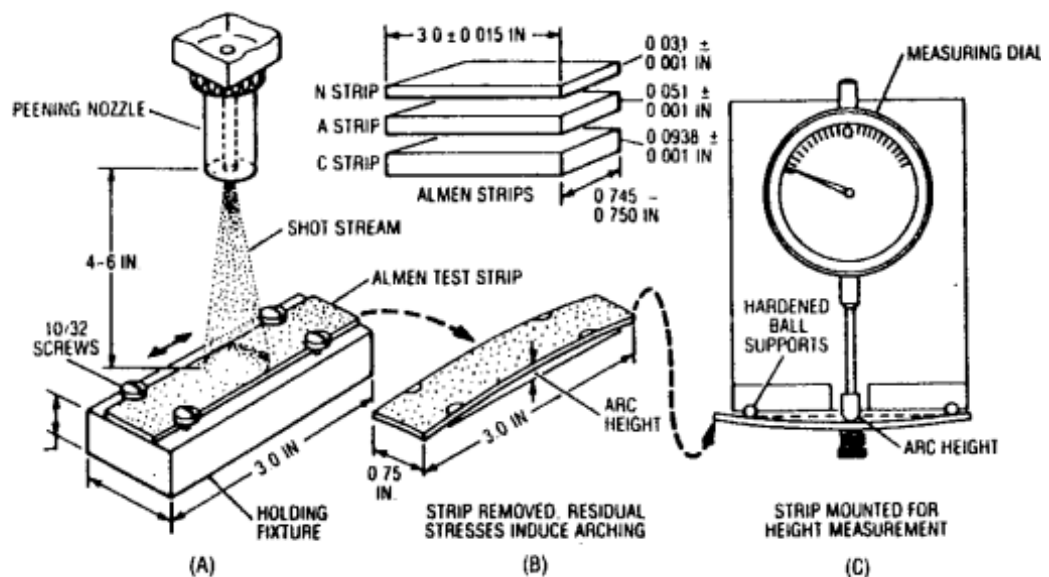


Obrázek 8 - Saturační křivka (přeloženo autorem) [28]

4.6 Almenův test

Kuličkování se začalo používat v minulém století. Bylo důležité zjistit, jakou intenzitu každý proces má. J. O. Almen, který pracoval ve firmě General Motors, přišel s nápadem, jak změřit intenzitu kuličkování. Pro měření mu posloužil rovný plech (říká se mu Almenův pásek – anglicky Almen strip), který se z jedné strany otryskal kuličkami (anglicky shot stream). Tím došlo k vytvoření oblouku, jehož velikost se změřila na Almenově měřidle. [28] [29]

Obrázek 9 zobrazuje princip tohoto testu. Na obrázku lze vidět, jak je vzorek upnut pomocí čtyř šroubů a takto je vystaven proudu kuliček (kuličkování), kde se abrazivo nanáší pomocí trysky (anglicky peening nozzle). Poté, co to skončí, se průhyb (výška oblouk - anglicky arc height) Almenova pásku změří na měřidle, kde se hodnota ukáže na stupnici (anglicky measuring dial). Pro správně provedený test je nezbytné, aby přípravek, do kterého se testovací pásek upne, byl rovný a na ploše nebylo přítomno žádné tryskací abrazivum (kulička). [28]



Obrázek 9 - Princip Almenova testu [28]

4.6.1 Almenovy pásy

Jsou standardizovány dle normy SAE J442 a slouží k měření intenzity zpevnování. [26] [27]

Almenovy pásy (anglicky Almen strips) se vyrábějí ve třech kategoriích: A, C a N (vyobrazeny na obrázku 9). Všechny druhy pásků mají stejné rozměry délky a šířky, tj. jednotné rozměry jsou 76,098 x 18,987 mm. Samozřejmě každý rozměr má své toleranční pole, délka je v rozmezí 75,6 – 76,6 mm a šířky 18,85 – 19,05 mm. [27] [30]

Ve zmíněné normě se zároveň udávají tloušťky jednotlivých pásků:

- A – cca 1,3 mm (rozmezí tolerovaných tlouštěk: 1,27 až 1,32 mm)
- C – cca 2,4 mm (rozmezí tolerovaných tlouštěk: 2,36 až 2,41 mm)
- N – cca 0,8 mm (rozmezí tolerovaných tlouštěk: 0,76 až 0,81 mm) [26] [27] [30]

Každý z těchto pásků se hodí pro měření různých intenzit. Nejtenčí pásek (označován jako N) je vhodný pro měření nižších intenzit nabývajících hodnot nižších než 0,10 mm, pásek A je ideální na měření středních intenzit (hodnoty od 0,10 až do 0,60 mm) a pásek s největší tloušťkou slouží pro vyhodnocení velkých intenzit, jejichž hodnoty činí více než 0,60 mm. [26] [27]

V normě SAE J442 se také specifikuje, že tvrdost Almenových pásků označovaných jako A a C se může měnit, a to o 6 % (více či méně), u nejtenčího pásku N hodnota možné změny činí 2,4 %, o kterou se může buď tvrdost zvýšit, či snížit. [27]

Firma Electronics Inc., která zásobuje celý svět největším množstvím těchto pásků, má navíc všechny pásy ještě v různých třídách: 1,2,3 a S. Stupně tříd má zmíněná firma chráněno ochranou známkou. [30]

5 Zkoušení odstranění vnitřního pnutí u titanové slitiny Ti-6Al-4V

V této části jsem se zabývala praktickým ověřením zjištěných dat pro titanovou slitinu Ti-6Al-4V při možnosti odstranění vnitřního pnutí pomocí žíhání za daných teplot a časů. Zaměřila jsem se i na testování, co má při žíhání větší vliv na odstranění pnutí, zda je to teplota nebo spíše délka trvání procesu žíhání.

5.1 Návrh experimentu

Experiment se skládal z několika částí:

1. Popsání vzorků
2. Tryskání vzorků kuličkovým abrazivem
3. Žíhání vzorků v peci
4. Měření
 - a. průhybu
 - b. zbytkových napětí

K dispozici bylo celkem 40 ks vzorků z Ti-6Al-4V, jejichž rozměry byly 10 x 38 mm. Vzorky byly uřezány z plechu, jehož tloušťka činila 1,016 mm. Tyto vzorky se měly podrobit tryskání, aby se do nich dostalo pnutí. Zvolila se varianta tryskát ocelovými kuličkami v tryskací komoře, která je součástí laboratoří fakulty.

U procesu žíhání se bralo v úvahu rozmezí, které je pro použitou slitinu doporučeno (viz. v kapitole Titanová slitina Ti-6Al-4V) a použila se většina ze 40 ks, protože některé se nechaly pouze tryskané, aby mohlo později dojít k porovnání, jak velký vliv mělo žíhání na odstranění pnutí.

Poté bylo v plánu měření, kde se zjišťovala velikost průhybu vzorků a hodnota zbytkových napětí pomocí elektrolytického odleptání, které se provedlo v laboratoři Fakulty strojní ČVUT, kde bylo vše pro tuto část experimentu k dispozici.

5.2 Samotný experiment

Popis vzorků

Vzorky bylo nutné pro dobrou přehlednost popsat tak, aby se během experimentu popis nesmazal. Vhodnou volbou pro popsání bylo použití elektro-popisovacího přístroje, který je vyobrazen na obrázku 10. U zařízení bylo nutné zapnout proud. Popis se provedl tak, že se vzorek dal na plech tak, jak to je ukázáno na obrázku 10, a perem se dotklo na plochu a došlo k výboji, který zanechal na plechu jisté známky. Bylo důležité držet pero v kontaktu s plochou, ale ne na příliš dlouhou dobu, protože by mohl dojít ke svaření konce pera ke vzorku. Vzorek bylo nutné mít na podložce, kterou je možno vidět na obrázku 10. Kdyby byl vzorek mimo tuto podložku, nedošlo by k výboji a vzorek by se nemohl popsat. Všechny vzorky byly označeny číslem 1–40.



Obrázek 10 - Pracoviště pro popis vzorků

5.2.1 Tryskání vzorků

Popsané vzorky se tedy musely podrobit procesu tryskání, které se provádělo v laboratořích, kde je tryskací komora. Tryskáním se chtělo docílit toho, že se do zkoušených plechů dostalo pnutí. Pohled do tryskací komory je vyobrazen na obrázku 11, kde je také možno vidět trysku a u levého rukávu je vidět namotaný drát, který se musel na konec trysky umístit. Drát byl tedy na konci trysky a ve vzdálenosti 50 mm byl zakončen spirálou, díky které byla zajištěna konstantní vzdálenost 50 mm trysky od tryskané plochy. Bylo nutné nastavit parametry tlaku trysky. Zvolil se tedy tlak 4 bar, který byl během procesu konstantní. Jako tryskací abrazivo se použily ocelové kuličky, jejichž průměr byl 0,4 mm.



Obrázek 11 - Pohled do tryskací komory

Každý vzorek bylo nutné upnout do speciálního přípravku. Upnutý vzorek v přípravku je vidět na obrázku 12, kde je také ukázáno, že procesu tryskání byla vystavena pouze část vzorku, protože zbytek byl zamaskován krytem, aby nedošlo k otryskání těchto ploch. Plocha, která byla tryskána měla rozměry šířky plechu, tj. cca 10 mm, a 10 mm z výšky 38 mm.



Obrázek 12 – Model speciálního přípravku s upnutým vzorkem z Inventoru

Ještě před tryskáním všech 40 ks plechů bylo důležité stanovit délku tryskání. K tomu se využilo dvou náhradních stejných kusů plechů. Nejprve se tryskal jeden z náhradních vzorků po dobu 30 sekund a změřil se u něj průhyb, který byl 250 μm . Pak se tryskalo znovu, ale čas se prodloužil na 1 minutu, tj. dvojnásobek původního času. Po změření průhybu, který byl 265 μm , se ukázalo, že se průhyb zvětšil o 6 % a tedy došlo k saturaci, která je podrobněji popsána v kapitole Saturace. Tak došlo ke stanovení, že čas tryskání bude 1 minutu.

Každý jednotlivý vzorek se upnul do přípravku a vložil do tryskací komory. Tam jednou rukou byl držen a tryskán tryskou v druhé ruce. Při přiblížení trysky k přípravku se spirála drátu, který byl k trysce umístěn, narazila o přípravek a tím byla zajištěna konstantní vzdálenost 50 mm.

5.2.2 Žihání vzorků

Tento proces proběhl v prostorách halových laboratoří Fakulty strojní ČVUT, kde k tomu slouží žihací pec. Toto zařízení je vidět na obrázku 13. U této pece se pomocí nastaveného programu provedl proces žihání. Většina vzorků, konkrétně 34 ks, se tedy podrobila tomuto procesu. Tyto vzorky se rozdělily do dvojic, které by se žihaly za stejných parametrů, tzn. za stejné teploty a času.



Obrázek 13 - Pec použití pro žihání od firmy Nabertherm [31]

Minimální teplota žihání se pro tento experiment zvolila 490 °C a jako maximální byla určena teplota 650 °C. Mezi těmito dvěma teplotami se ještě zvolilo, že žihání proběhne taky na teplotách 530 °C, 570 °C a 610 °C. Detailní rozpis pro jednotlivé vzorky pro žihání (teplota a doba žihání) ukazuje tabulka 3.



Tabulka 3 - Rozvržení procesu žíhání vzorků

ČÍSLO VZORKU	TEPLOTA [°C]	ČAS [hod]
18	490	4
14	490	4
2	490	3
39	490	3
8	530	4
40	530	4
1	530	3
13	530	3
5	530	2
38	530	2
10	570	4
6	570	4
17	570	3
35	570	3
15	570	2
9	570	2
16	570	1
11	570	1
19	610	4
20	610	4
23	610	3
25	610	3
22	610	2
24	610	2
21	610	1
26	610	1
33	650	4
31	650	4
32	650	3
34	650	3
27	650	2
29	650	2
28	650	1
30	650	1



Na teplotu 490 °C se žíhalo pouze po dobu 3 a 4 hodin, protože kratší časy by nebyly úplně vhodné a napětí by se nemuselo tak moc odstranit. Pro teplotu 530 °C se počítalo, že odstranění pnutí se žíháním může dít při délce procesu od 2 do 4 hodin, protože jedna hodina mi přišla jako malý časový úsek, za který by se napětí v povrchové vrstvě nemuselo odstranit. Pro další teploty se proces žíhání uskutečnil pro čtyři časové intervaly, tedy jednu, dvě, tři a čtyři hodiny. U těchto teplot se předpokládalo, že odstranění pnutí by mohlo být výrazné i při 1 hodině nebo po dobu 4 hodin.

Nejprve se tedy v daném programu nastavila požadovaná teplota. Protože se žíhalo na 5 různých teplot, musela se vždy teplota přenastavit. Po dobu přibližně dvou hodin se pec stabilizovala tak, že v celém objemu pece byla požadovaná teplota, a tedy nehrozilo ohrožení žíhání z důvodu jiných teplot v prostoru pece.

Do pece po sjednocení teploty v prostoru se vložily všechny vzorky pro danou teplotu, tzn. když se na teplotě žíhalo po dobu 1, 2, 3 a 4 hodin, vložilo se celkem 8 vzorků neboli 4 dvojice. Společně s nimi se daly do pece i součásti, kterými se po vytažení vzorků z pece dané vyžíhané plechy zakryly, aby u vzorků nedošlo k teplotnímu šoku díky okolnímu prostředí v laboratoři.

Vždy tedy ve stanovenou dobu se dvojice vzorků vytáhla a přikryla dalšími součástmi, které bránily prudkému chlazení dvojice plechu z titanové slitiny. Po hodině bylo možné už vychlazené vzorky odkrýt a byly přemístěny do krabičky, kde čekaly na měření.

Když bylo žíhání na dané teplotě hotové, změnila se hodnota na další, aby se využilo už vzniklé teplo v peci. Poté byla stabilizace na teplotu přibližně v délce jedné hodiny. A pokračovalo se stejným principem dále.

Po skončení procesu žíhání se všech 34 ks plechů podrobilo měření, viz. dále, kde se změřily průhyby u jednotlivých žíhaných vzorků, aby se mohlo porovnat, jak velký vliv žíhání mělo na odstranění pnutí.

5.2.3 Měření vzorků

Měření průhybů

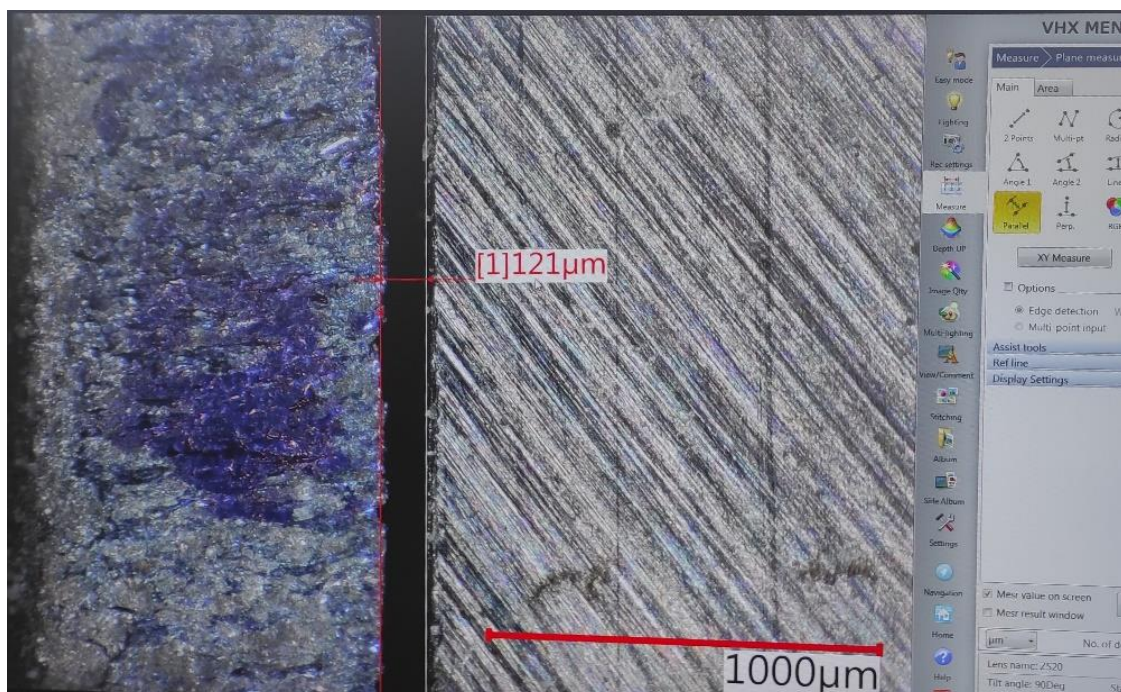
Toto měření bylo provedeno celkem dvakrát. Použil se k tomu mikroskop v laboratořích s nastaveným zvětšením 150x pro přesnější výsledky z daného měření.

Na obrázku 14 je vyobrazeno, jak byl vzorek k měření umístěn. Použila se k tomu leštěná deska, na kterou se umístil měřený plech, aby bližší hrany k objektivu byly zarovnané do jedné roviny. Vzorek byl ještě před umístěním na měření prohlédnut a na hraně vzorku se označilo propiskou místo, kde by mohl být největší průhyb. Poté se nastavil mikroskop, zapnulo se osvětlení místa měření, a nakonec se zapnul také program na počítači. Na monitoru se zobrazil vzorek i s leštěnou deskou. Pokud byl obraz lehce rozmazaný, bylo nutné ho zaostřit, aby se dospělo k přesnějším hodnotám.



Obrázek 14 - Umístění vzorku pro měření na mikroskopu

Na obrazovce se po nastavení ukázala hrana vzorku s označeným místem a hrana leštěné desky. Nejprve se označila hrana leštěné desky. Pak se od této hrany vedla rovnoběžka, která byla v místě největší velikosti mezery mezi leštěnou deskou a zkoušeným vzorkem. Vzdálenost mezi oběma rovnoběžkami určila velikost průhybu, což je možno vidět na obrázku 15. Na tomto obrázku se dá dobře pozorovat v pravé části hranu leštěné desky a vlevo zase hranu měřeného vzorku, kde je také vidět označení modrou propiskou.



Obrázek 15 - Vyhodnocení průhybu po měření na mikroskopu

Měření po otryskání

V prvním případě se zjišťovalo, zda se průhyb u tryskaných vzorků pohybuje v podobných hodnotách. Celkem bylo použito náhodně 5 vybraných vzorků, z jejichž hodnot vyplynulo rozmezí velikostí průhybů po otryskání plechů.

V tabulce 4 je vidět, že hodnoty průhybů po procesu tryskání za konstantních podmínek byly u měřených vzorků v rozmezí 257 až 265 μm . Zároveň si v tabulce lze všimnout aritmetického průměru, jehož hodnota činí 260,8 μm .

Tabulka 4 - Naměřené hodnoty průhybů tryskaných vzorků

ČÍSLO VZORKU	PRŮHYB [μm]	ARITMETICKÝ PRŮMĚR [μm]
2	257	260,8
10	263	
17	260	
23	265	
32	259	

Měření po žíhání

Ve druhém případě měření průhybů se měřily už vzorky vyžíhané, konkrétně se jednalo o 34 kusů. Pro vyžíhané vzorky se pro každou kombinaci teploty a času stanovil aritmetický průměr, protože pro každou kombinaci byly k dispozici dva vzorky. V tabulce 5 jsou oba měřené průhybu pro každou kombinaci a jejich aritmetický průměr. Z hodnot této tabulky je patrné, že jako nejvhodnější žíhání se jeví to na teplotě 650 °C. Pro tuto teplotu nabýval průhyb hodnot v rozmezí 67 až 83 μm , čímž se oproti hodnotám průhybů u vzorků, které se pouze tryskaly, kde hodnota aritmetického průměru průhybů těchto vzorků činí 260,8 μm , dosáhlo největšího snížení velikosti průhybu díky procesu žíhání.

Tabulka 5 - Naměřené hodnoty průhybů žíhaných vzorků

TEPLOTA [°C]	ČAS [hod]	1. MĚŘENÍ		2. MĚŘENÍ		ARITMETICKÝ PRŮMĚR [μm]
		ČÍSLO VZORKU	PRŮHYB [μm]	ČÍSLO VZORKU	PRŮHYB [μm]	
490	4	18	132	14	125	128,5
	3	2	126	39	122	124
530	4	8	116	40	102	109
	3	1	113	13	116	114,5
	2	5	125	38	121	123
570	4	10	84	6	78	81
	3	17	102	35	82	92
	2	15	118	9	112	115
	1	16	124	11	121	122,5
610	4	19	81	20	101	91
	3	23	110	25	125	117,5
	2	22	128	24	118	123
	1	21	102	26	161	131,5
650	4	33	58	31	76	67
	3	32	42	34	102	72
	2	27	91	29	75	83
	1	28	73	30	68	70,5

Měření zbytkových napětí

Po měření průhybu se vzorky podrobily v laboratoři měření zbytkových napětí dalšímu měření. To se provedlo elektrolytickým odleptáním povrchové vrstvy, a to kontinuálním snímáním deformace při elektrolytickém odleptání analyzovaného povrchu. Zařízení umožňuje snímání ve vteřinových intervalech a s přesností na úrovni mikrometru. Použilo se 11 kusů z celkového počtu 40 kusů, zastoupeny vyžíhané plechy, a to spíše s extrémními parametry, a tryskané. Ty proto, aby bylo možné porovnání právě se žíhanými vzorky a bylo možné říct, jak jednotlivé žíhání bylo úspěšné. Jednalo se o elektrolytické odleptání. Katodou bylo olovo, které by se mohlo nahradit např. mědí, a anodou byl zkoušený vzorek. Na obrázku 16 vidíme pracoviště, kde probíhalo měření zbytkových napětí.



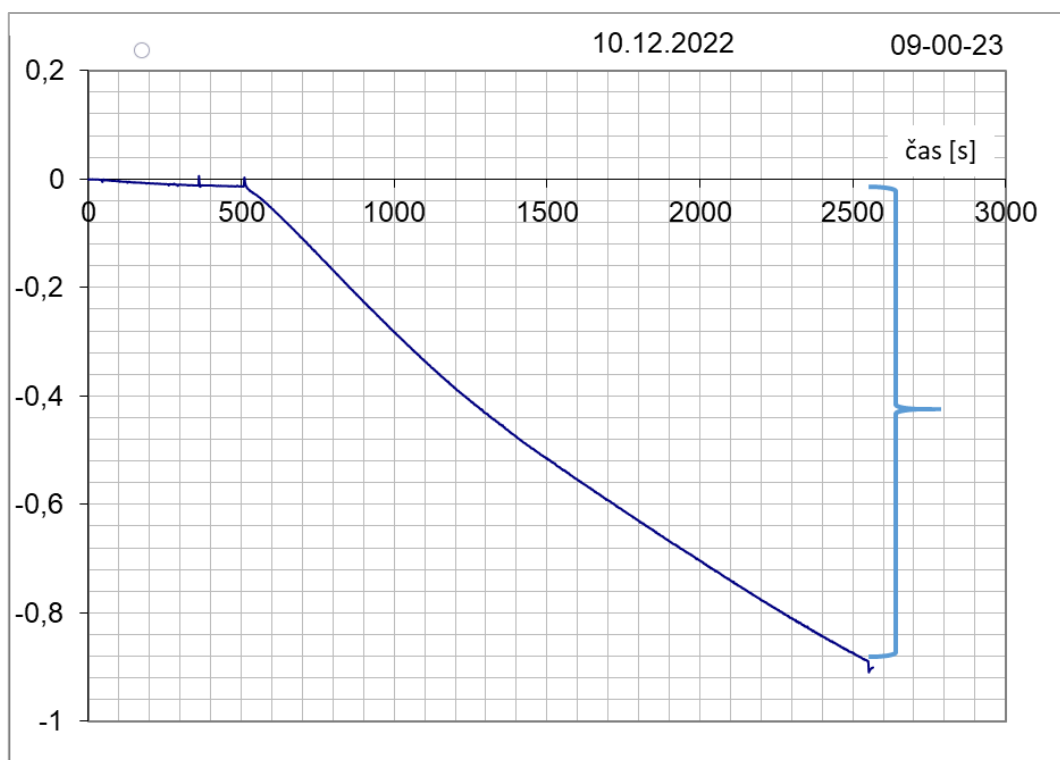
Obrázek 16 - Pohled na pracoviště pro měření zbytkových napětí

Nejprve bylo důležité vzorky důkladně vyčistit isopropylalkoholem. U takto očištěných vzorků se na váze změřila hmotnost. Následně se vzorek připravil pro proces elektrolytického odleptání. Protože tryskaná plocha u vzorků byla přibližně 10 x 10 mm, což by bylo pro měření zbytkových napětí velká plocha, bylo

důležité tuto plochu zmenšit. Výška zůstala zachována přibližně 10 mm, protože ve výrobě se procesem řezání dospělo k drobným rozdílům v rozměrech, a šířka plochy pro elektrolytické odleptání se pohybovala v přibližně 3,5 až 4 mm. Zbytek vzorku bylo důležité z části olepit izolační páskou, a poté ještě neolepené části ochránit voskem.

Vzorek z části pokrytý izolační páskou se jedním koncem zajistil do přípravku, na jehož druhém konci byl praporek. Takto upnutý vzorek s přípravkem bylo důležité obalit voskem, který chránil kovové díly před účinky elektrolytu. Po nanesení a zatuhnutí vosku se druhý konec vzorku zajistil do dalšího přípravku a bylo nutné na kovové části opět nanést vosk. Takto upnutý vzorek v přípravkách se upnul do měřícího zařízení.

Praporek byl umístěn v blízkosti čidla, které zaznamenávalo hodnoty. Část zařízení, do kterého byl vzorek upnut se ponořil do elektrolytu. Pro měření bylo vhodné vypnout digestoř, aby měření nebylo ovlivněno nežádoucími jevy. Poté se místnost uzavřela a ve druhé místnosti se na monitoru začala zobrazovat deformační křivka (obrázek 17). Po stabilizaci křivky se zapnul proud a tím začalo samotné měření



Obrázek 17 - Deformační křivka

zbytkových napětí. Délka každého měření se lišila. Pro tryskané plechy, které měli pnutí v povrchové vrstvě podstatně větší oproti vyžíhaných, se měřilo podstatně rychleji. Na monitoru se vytvářela deformační křivka (obrázek 17), která jasně dokazovala, jak velké tlakové napětí tam je. Zároveň u těchto vzorků bylo riziko, že se praporek o čidlo opře a v tom případě bylo důležité okamžitě měření ukončit.

Vzorek s přípravky po skončení elektrolytického odleptání se musel ze zařízení odstranit. Samozřejmě před samotným uvolněním přípravků se vzorkem bylo nutné pustit digestoř, aby se zamezilo případnému vdechnutí par z elektrolytu.

Přípravky se musely očistit od nánosu vosku, a to pomocí nože. Následně se vzorek z těchto přípravků uvolnil. U plechu se ještě odstraňovala izolační páska. Pomocí technického benzínu se očištěný plech od izolační pásky ještě důkladněji očistil, aby na něm nezůstaly zbytky vosku, případně izolační pásky. Očištěný vzorek po všech měřeních je vidět na obrázku 18, kde se dá pozorovat odleptaná plocha i tryskaná plocha vzorku číslo 6.



Obrázek 18 - Vzorek po elektrolytickém odleptání

Poté se umístil vzorek opět na měřicí váhu pro zaznamenání konečné hmotnosti po procesu elektrolytického odleptání. Pomocí digitálního posuvného měřidla se změřila šířka a výška odleptané vrstvy.

Z naměřených hodnot se pomocí speciálního excelovského souboru vyhodnotily hodnoty napětí v různých hloubkách povrchu (viz. tabulka 6, tabulka 7, tabulka 8 a tabulka 9). Právě deformační křivka umožňuje díky znalostem průřezových charakteristik vzorků zpětně dopočítat zbytkové napětí ve vzorkách.

Tabulka 6 - Hodnoty napětí při elektrolytickém odleptání (tryskané vzorky)

hloubka H [mm]	VZORKY		ARIT. PRŮMĚR
	4	12	
	skutečné zbytk. napětí [N.mm ⁻²]	skutečné zbytk. napětí [N.mm ⁻²]	skutečné zbytk. napětí [N.mm ⁻²]
0,003	-239	-233	-236
0,005	-252	-237	-245
0,007	-265	-241	-253
0,010	-278	-246	-262
0,015	-290	-255	-272
0,020	-295	-265	-280
0,025	-297	-278	-288
0,030	-300	-293	-297
0,050	-323	-343	-333
0,070	-309	-281	-295
0,100	-205	-75	-140

Tabulka 7 - Hodnoty napětí při elektrolytickém odleptání (vzorky žíhané na 490 °C)

hloubka H [mm]	VZORKY	
	2_490C_3H	18_490C_4H
	skutečné zbytk. napětí [N.mm ⁻²]	skutečné zbytk. napětí [N.mm ⁻²]
0,003	-23	-23
0,005	-28	-25
0,007	-33	-28
0,010	-39	-32
0,015	-49	-40
0,020	-56	-49
0,025	-62	-57
0,030	-65	-64
0,050	-63	-73
0,070	-49	-57
0,100	-19	-25
0,150	14	2
0,200	24	-

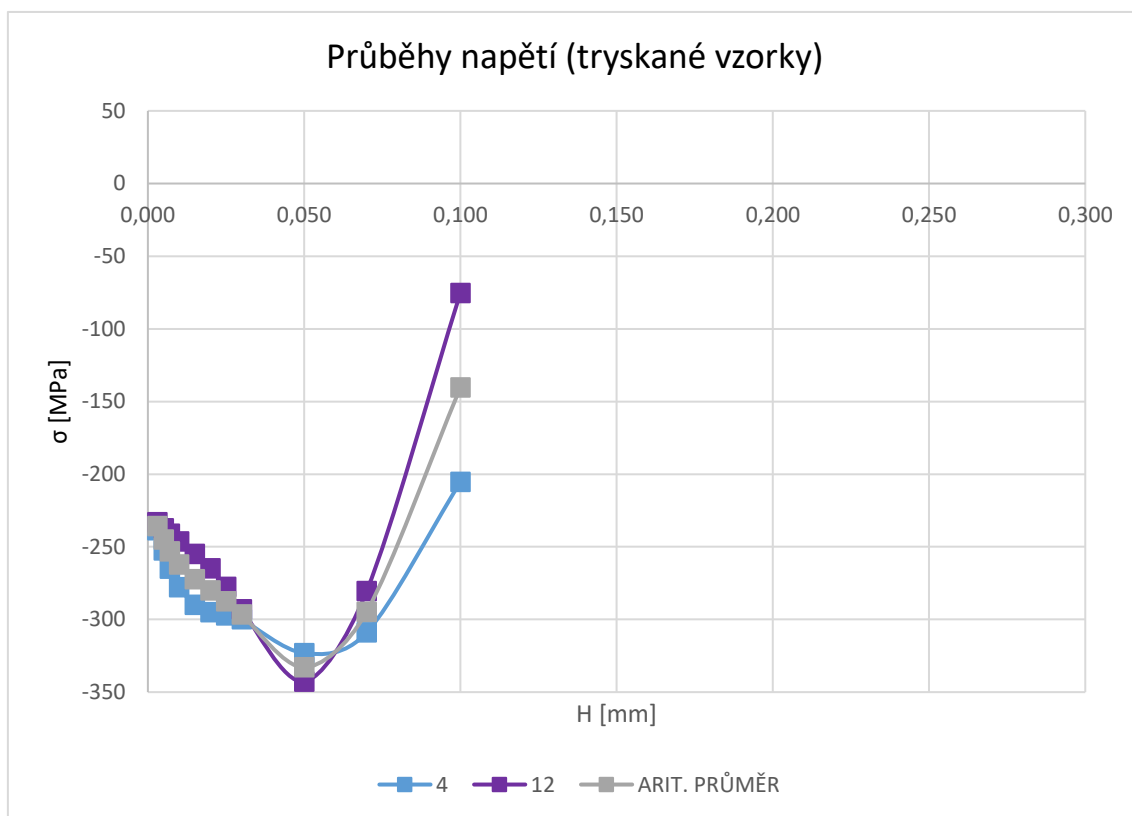
Tabulka 8 - Hodnoty napětí při elektrolytickém odleptání (vzorky žíhané na 570 °C a 610 °C)

hloubka H [mm]	VZORKY			
	16_570C_1H	6_570C_4H	21_610C_1H	20_610C_4H
	skutečné zbytk. napětí [N.mm ⁻²]	skutečné zbytk. napětí [N.mm ⁻²]	skutečné zbytk. napětí [N.mm ⁻²]	skutečné zbytk. napětí [N.mm ⁻²]
0,003	2	14	18	6
0,005	2	14	20	7
0,007	2	13	21	7
0,010	1	11	21	8
0,015	-1	7	19	8
0,020	-3	2	15	8
0,025	-5	-1	11	7
0,030	-8	-3	7	6
0,050	-14	-7	-3	2
0,070	-14	-9	-5	2
0,100	-9	-6	-4	0
0,150	-1	-1	-2	-1
0,200	1	1	-1	-
0,250	3	2	-1	-
0,300	-	-	-2	-

Tabulka 9 - Hodnoty napětí při elektrolytickém odleptání (vzorky žíhané na 650 °C)

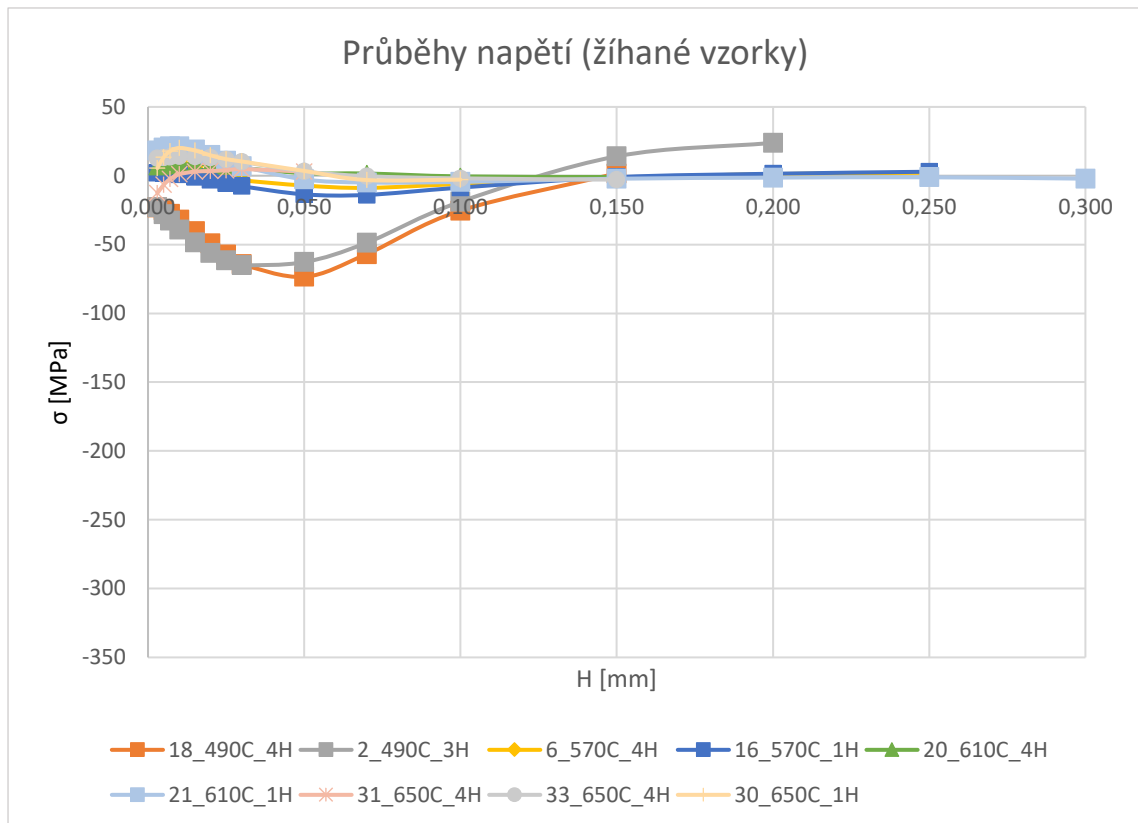
hloubka H [mm]	VZORKY			ARIT. PRŮM. 650C_4H
	30_650C_1H	31_650C_4H	33_650C_4H	
	skutečné zbytk. napětí [N.mm ⁻²]	skutečné zbytk. napětí [N.mm ⁻²]	skutečné zbytk. napětí [N.mm ⁻²]	skutečné zbytk. napětí [N.mm ⁻²]
0,003	6	-13	13	0
0,005	13	-7	13	3
0,007	18	-2	14	6
0,010	20	1	14	8
0,015	18	3	14	8
0,020	15	3	13	8
0,025	12	4	12	8
0,030	10	5	10	7
0,050	4	3	3	3
0,070	-3	-	0	-
0,100	-3	-	-2	-
0,150	-	-	-3	-

Obrázek 19, kde je závislost napětí na hloubce u tryskaných vzorků (hodnoty z tabulky 6), ukazuje, že v povrchové vrstvě pouze tryskaných vzorků bylo velké množství zbytkového pnutí. Hodnoty atakovaly hranici 350 MPa tlakového napětí. Měření proběhlo pouze do hloubky 0,1 mm.



Obrázek 19 - Závislost napětí na hloubce u tryskaných vzorků

Při porovnání obrázku 19 a obrázku 20 je možné pozorovat, jaký vliv mělo žíhání na snížení či odstranění vnitřních pnutí. Některé žíhací teploty způsobily odstranění pnutí, žíhání na teplotu 490 °C zbytkové pnutí ve vzorkách pouze snížilo.



Obrázek 20 - Závislost napětí na hloubce u žíhaných vzorků

6 Vyhodnocení výsledků

Z výsledků měření průhybů a zbytkových napětí vzorků z titanové slitiny Ti-6Al-4V je patrné, že podstatný vliv na odstranění pnutí během žíhání má teplota namísto délky trvání procesu.

6.1 Vyhodnocení měření průhybů

V tabulce 10 lze vidět, jakého snížení průhybů u vzorků procesem žíhání se dosáhlo. Jako porovnávací hodnota sloužil aritmetický průměr tryskaných vzorků. Výpočtem se určilo procento snížení průhybu po žíhání u Ti-6Al-4V v porovnání s tryskanými vzorky (použila se hodnota aritmetického průměru průhybu 260,8 μm).

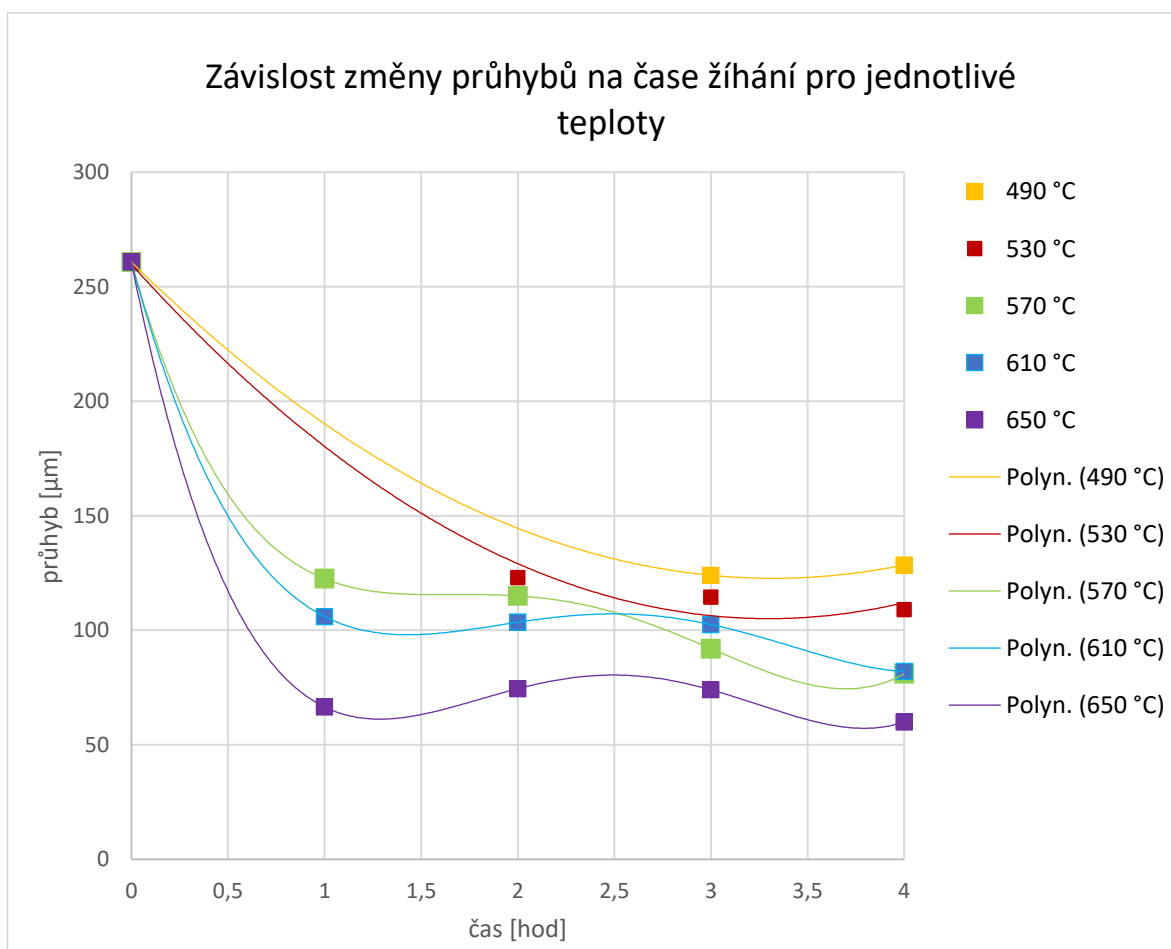
Tabulka 10 - Hodnoty snížení průhybu u měřených žíhaných vzorků

TEPLOTA [°C]	ČAS [hod]	ARITMETICKÝ PRŮMĚR [μm]	SNÍŽENÍ PRŮHYBU [%]
490	4	128,5	50,73
	3	124	52,45
530	4	109	58,21
	3	114,5	56,10
	2	123	52,84
570	4	81	68,94
	3	92	64,72
	2	115	55,90
	1	122,5	53,03
610	4	91	65,11
	3	117,5	54,95
	2	123	52,84
	1	132,5	49,19
650	4	97	62,81
	3	72	72,39
	2	83	68,17
	1	70,5	72,97

Ukázalo se, že při nejvyšší zkoušené teplotě, která byla 650 °C, se průhyb zmenšil z hodnoty aritmetického průměru průhybu po tryskání 260,8 μm na průměrnou hodnotu 80 μm ze všech hodnot pro různé délky žíhání, což je ve výsledku snížení o přibližně 70 procent. Zatímco u nejnižší teploty, tj. 490 °C se průhyb snížil průměrně o 50 %.

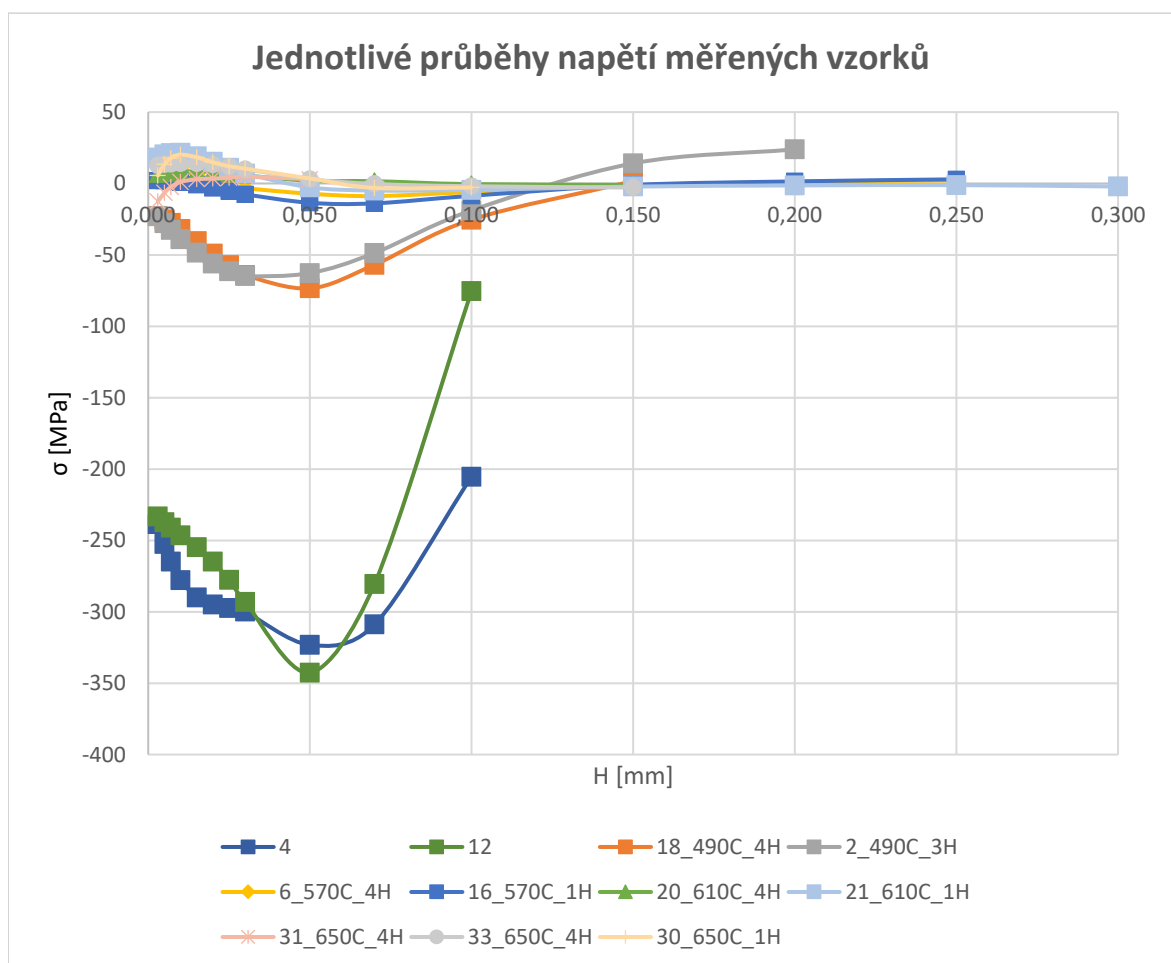
Tyto výsledky dokazují, že na snížení pnutí má během žíhacího procesu větší vliv teplota. Co se týče vlivu času, ten má vliv spíše nepatrný. Hodnoty pro jednu teplotu, ale různé časy, dosahují ve většině případů malého rozdílu v procentech snížení průhybů (ve dvou případech je rozdíl cca 5 %, v jednom případě 10%, zbylé dva mají rozdíl cca 15 %).

Na obrázku 21 je vidět, jak se měnil průhyb na základě času žíhání pro jednotlivé teploty. Jako výchozí bod (tím se myslí v 0. hodině) byla hodnota pro všechny teploty stejná, která odpovídá aritmetickému průměru průhybu měřených tryskaných vzorků.



6.2 Vyhodnocení měření zbytkových pnutí

I měření zbytkových pnutí poznatek, co má větší vliv na odstranění pnutí po žíhání, potvrdil. Graf závislosti napětí na hloubce (obrázek 22) ukazuje rozdíl mezi tryskanými vzorky a vzorky žíhanými. Napětí v povrchové vrstvě se dle tohoto grafu nejvíce odstranilo na vyšších teplotách (570 °C, 610 °C a 650 °C). Horších výsledků se dosáhlo u žíhání na teplotu 490 °C. Tady se napětí sice snížilo, ale i přesto tam zůstala část.



Obrázek 22 - Závislost napětí na hloubce u měřených vzorků

Měřením se dospělo až k hodnotám blízcích se k hranici tlakového napětí 350 MPa, což se dá považovat za vysokou hodnotu. Žíháním se chtělo docílit odstranění tohoto pnutí a to, aby se hodnoty pohybovaly kolem hodnoty nula. Pro některé parametry žíháním došlo ke snížení pnutí, což sice se dá považovat za úspěch, ale pnutí se pouze



snížilo, nikoli odstranilo. U žíhaných vzorků, kde teplota v peci byla 610 °C a 650 °C, se dá hovořit o odstranění, protože v porovnání s naměřenými hodnotami u tryskaných vzorků, kde bylo tlakové napětí přibližně 230 až 350 MPa, opravdu vnitřní pnutí ve vzorkách bylo odstraněno. Naměřené hodnoty to dokazují, protože u zmíněných dvou nejvyšších teplot napětí v povrchové vrstvě bylo téměř nulové.

6.3 Porovnání obou zvolených metod měření

První metoda, změření průhybů u jednotlivých vzorků (podobnost s Almenovým testem), tj. u žíhaných i tryskaných, z hlediska času se jeví jako rychlejší. Měření se celkem v krátké době dalo vyhodnotit, jaký vliv má na zmenšení vnitřních pnutí žíhání, zejména vliv teploty. Zároveň je nutné podotknout, že právě tato metoda není zcela přesná.

Druhá metoda trvala déle a po naměření dat muselo proběhnout ještě jejich zpracování v programu, aby se dostalo výsledných hodnot zbytkových napětí. Metoda je ovšem přesnější než měření průhybů, protože se dosahuje elektrolytickým odleptáním přesnějších dat.

7 Závěr

Samotné téma bakalářské práce bylo zaměřeno na oblast vnitřních pnutí a jeho odstranění, a to u konkrétních materiálů, titanových slitin. V první části práce se definovaly základní pojmy, jako titanové slitiny, jejich vlastnosti a tepelné zpracování. Důležité bylo specifikovat slitinu použitou pro praktickou část, Ti-6Al-4V, zejména její vlastnosti a data pro žíhání na odstranění pnutí. Protože se práce zaměřuje na vnitřní pnutí, bylo samozřejmostí se seznámit i s touto problematikou. Bylo zjištěno, že pnutí se dá snížit či odstranit díky žíhání nebo vibračnímu odlehčení. Jedna z těchto metod, konkrétně žíhání, se vybrala pro praktickou část práce. Protože se při praktické části použila technologie tryskání, aby se docílilo vzniku pnutí ve vzorcích uměle, jedna z kapitol se na tuto technologii zaměřila, kde bylo popsáno, na jakém principu funguje, jaká tryskací abraziva mohou být, co je to proces kuličkování a co znamená pojem saturace. Zde se také zmiňuje Almenův test s Almenovými pásky, jehož obdobu jsem použila v praktické části.

Pro praktickou část se zvolila nejpoužívanější a taky nejznámější slitina titanu, Ti-6Al-4V. Pro tuto slitinu se teploty v jedné z variant pro žíhání na odstranění pnutí pohybovaly od 480 °C až do 650 °C, kde se tyto teploty měly držet po dobu 1 až 4 hodin. Celkem se použilo 40 ks vzorků, kde 34 ks bylo tryskáno a následně žíháno na pět různých teplot (490°C, 530 °, 570 °C, 610 °C a 650 °C) po dobu od 1 do 4 hodin a zbylých 6 ks se pouze tryskalo, aby bylo možné porovnání a vyhodnocení, jak bylo žíhání na odstranění pnutí účinné.

Proběhly celkem dva druhy měření: 1. průhyby a 2. zbytková pnutí. Na základě výsledků se ukázalo, že větší vliv na odstranění pnutí během žíhání má teplota. Obě měření dokázala, že žíhání na nejnižší teplotu sice zbytkové pnutí snížilo, ale nelze hovořit o odstranění. U nejvyšší žíhací teploty se u měření průhybů zjistilo výrazné snížení pnutí, ale při měření zbytkových pnutí, což je přesnější metoda, vyšlo, že procesem žíhání na tuto teplotu došlo k odstranění zbytkového pnutí.

Seznam použité literatury

- [1] DONACHIE, MATTHEW J., Jr. *Titanium - A Technical Guide*. 2nd Edition. Materials Park: ASM International, 2000. ISBN 0-87170-686-5.
- [2] THE EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA. Titanium. In: *Encyclopædia Britannica* [online]. Chicago (Illinois): Encyclopædia Britannica, ©2023, Stránka naposledy edit. 06. 04. 2023 [cit. 2023-07-18]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/titanium>
- [3] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, ©2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [4] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, ©2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [5] Steel 1.0503 / C45. [technický list] In: *Xometry* [online]. Ottobrunn: Xometry Europe, © 2018-2023 [cit. 2023-07-24]. Dostupné z: <https://xometry.eu/wp-content/uploads/2021/02/Steel-1.0503.pdf>
- [6] Titan Grade 5 / 3.7164 / 3.7165 / Ti-6Al-4V [technický list]. In: *Xometry* [online]. Ottobrunn: Xometry Europe, © 2018-2023 [cit. 2023-07-24]. Dostupné z: <https://xometry.eu/wp-content/uploads/2022/03/Titanium-3.7164.pdf>
- [7] HORVÁTH, Martin. Trochoidní metoda frézování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. © 2001 - 2023, 2022, (6) [cit. 2023-07-10]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/trochoidni-metoda-frezovani>
- [8] NEONICKEL. Ti 6Al-4V (jakost 5). In: *NeoNickel* [online]. Blackburn: NeoNickel [cit. 2023-07-07]. Dostupné z: <https://www.neonickel.com/cs/alloys/slitiny-titanu/ti-6al-4v-jakost-5/>
- [9] ALLEGHENY TECHNOLOGIES INCORPORATED. ATI Ti-6Al-4V, Grade 5. [materiálová dokumentace] In: *ATI Corporate* [online]. Pittsburgh: Allegheny Technologies Incorporated, ©2011 [cit. 2023-07-24]. Dostupné z: https://www.atimaterials.com/Products/Documents/datasheets/titanium/alloyed/ati_6-4_tds_en_v1.pdf
- [10] NASA. SR-71 Blackbird. [fotografie] In: *National Aeronautics and Space Administration* [online]. Washington, D.C.: NASA, 2009 [cit. 2023-07-24]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/centers/dryden/multimedia/imagegallery/SR-71/EC92-7013-4.html>
- [11] KRAUS, Václav a Západočeská univerzita. Strojní FAKULTA. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. ISBN 978-80-261-0260-1.



- [12] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. [skriptum] Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1989. číslo publikace: 7068.
- [13] ROSSINI, N.S., M. DASSISTI, K.Y. BENYOUNIS a A.G. OLABI. Methods of measuring residual stresses in components. *Materials & Design*. 2012, (35), 572-588. ISSN 0261-3069. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.022>
- [14] HASSAN, Abdallah Hage. Fundamentals of Vibratory Stress Relief. *Asian Journal of Applied Sciences* [online]. 2014, 7(5), 317-324 [cit. 2023-07-15]. Dostupné z: doi:[doi:10.3923/ajaps.2014.317.324](https://doi.org/10.3923/ajaps.2014.317.324)
- [15] Vibrace odstraňují vnitřní napětí v materiálech. *MM Průmyslové spektrum* [online]. © 2001 - 2023, 2010, (9) [cit. 2023-07-02]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vibrace-odstranuji-vnitri-napeti-v-materialech>
- [16] SCHAJER, Gary S. *Practical residual stress measurement methods*. 1. UK: Wiley, 2013. ISBN 978-1-118-34237-4.
- [17] STRESSTECH. X-ray Diffraction. In: *Stresstech* [online]. Tikkutehtaantie: Stresstech (A Nova Instruments Company), © 2023 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.stresstech.com/knowledge/non-destructive-testing-methods/x-ray-diffraction/>
- [18] STRESSTECH. Barkhausen Noise Analysis. In: *Stresstech* [online]. Tikkutehtaantie: Stresstech (A Nova Instruments Company), © 2023 [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.stresstech.com/knowledge/non-destructive-testing-methods/barkhausen-noise-analysis/>
- [19] JOSEPH, Matt. *Media Blasting & Metal Preparation: A Complete Guide*. Ilustrované. North Branch: CarTech, 2016. ISBN 978-1-61325-165-2.
- [20] MOMBER, Andreas. *Blast Cleaning Technology* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, ©2008 [cit. 2023-07-12]. ISBN 978-3-540-73645-5. Dostupné z: <https://go.exlibris.link/rbHGr3Fc>
- [21] BREZINOVÁ, Janette. *Abrasive Blast Cleaning and Its Application*. Switzerland: Trans Tech Publications, 2015. ISBN 978-3-03835-995-1.
- [22] Tryskací materiály. In: *Tryskací zařízení* [online]. Praha: 1.Toušeňská, © 2016 [cit. 2023-07-13]. Dostupné z: <https://www.tryskaci-zarizeni.cz/tryskaci-materialy/>
- [23] SEDLÁČEK, Alexander. Nekomové tryskací prostředky. *Povrcháři* [online]. 2010, (10), 9-12 [cit. 2023-07-09]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201010_povrchari.pdf
- [24] VAPORMATT. The benefits of wet blasting for descaling of titanium components. In: *Vapormatt* [online]. Bridgwater: Vapormatt, © 2023 [cit. 2023-07-



- 20]. Dostupné z: <https://www.vapormatt.com/news/benefits-wet-blasting-descaling-titanium-components>
- [25] BYRNE, Greg D., Liam O'NEILL, Barry TWOMEY a Denis P. DOWLING. Comparison between shot peening and abrasive blasting processes as deposition methods for hydroxyapatite coatings onto a titanium alloy. *Surface and Coatings Technology*. 2013, **216**, 224-231. ISSN 0257-8972. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.11.048>
- [26] VOSÁHLO, Vladislav. Technologie kuličkování (Shot peening). *Povrcháři* [online]. 2009, (7), 8 [cit. 2023-07-13]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://www.povrchari.cz/kestazeni/200907_povrchari.pdf
- [27] KIRK, David. Saturation Curve Analysis and Quality Control. *The Shot Peener* [online]. 2006, **20**(3), 24-30 [cit. 2023-07-05]. Dostupné z: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2006025.pdf>
- [28] CHAMPAIGNE, Jack. Shot Peening Intensity Measurement. *The Shot Peener* [online]. 1992, **6**(4), 1-6 [cit. 2023-07-05]. Dostupné z: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/1992082.pdf>
- [29] WAGNER, Lothar. *Shot Peening*. 1. Weinheim: Wiley VCH, © 2003. ISBN 3-527-30537-8.
- [30] ELECTRONICS. A, N and C Certified Almen Strips. In: *Electronics* [online]. Mishawaka: Electronics, © 2023 [cit. 2023-07-05]. Dostupné z: <https://www.electronics-inc.com/products/almen-strips/a-n-c-strips/>
- [31] NABERTHERM. Chamber Furnaces - electrically heated. [fotografie] In: *Nabertherm* [online]. Lilienthal: Nabertherm, b.r. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://nabertherm.com/en/products/industry/additive-manufacturing/binder-free/furnaces-protective-gas-boxes/chamber-0>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Krystalové mřížky - a) krychlová prostorově centrovaná, b) hexagonální těsně uspořádaná [4]	11
Obrázek 2 - Tři letouny SR-71 Blackbird [10].....	16
Obrázek 3 - Diagram tepelného zpracování (obecně) [11].....	19
Obrázek 4 - Schéma před (a) a po (b) vrtání otvoru [16]	21
Obrázek 5 - Princip metody dělení [13]	22
Obrázek 6 - Schéma rentgenové difrakční metody [17]	23
Obrázek 7 - Dopadnutí kuličky na povrch a výsledná plocha po dopadu [26].....	29
Obrázek 8 - Saturační křivka (přeloženo autorem) [28]	29
Obrázek 9 - Princip Almenova testu [28].....	30
Obrázek 10 - Pracoviště pro popis vzorků	33
Obrázek 11 - Pohled do tryskací komory.....	34
Obrázek 12 – Model speciálního přípravku s upnutým vzorkem z Inventoru.....	35
Obrázek 13 - Pec použití pro žíhání od firmy Nabertherm [31]	36
Obrázek 14 - Umístění vzorku pro měření na mikroskopu	39
Obrázek 15 - Vyhodnocení průhybu po měření na mikroskopu	40
Obrázek 16 - Pohled na pracoviště pro měření zbytkových napětí.....	42
Obrázek 17 - Deformační křivka	43
Obrázek 18 - Vzorek po elektrolytickém odleptání.....	44
Obrázek 19 - Závislost napětí na hloubce u tryskaných vzorků	47
Obrázek 20 - Závislost napětí na hloubce u žíhaných vzorků.....	48
Obrázek 21 – Závislost změny průhybů na čase žíhání pro jednotlivé teploty.....	50



Obrázek 22 - Závislost napětí na hloubce u měřených vzorků..... 51



Seznam tabulek

Tabulka 1 - Porovnání oceli C45 s titanovou slitinou Ti-6Al-4V, hodnoty pro C45 z [5] a Ti-6Al-4V z [6].....	13
Tabulka 2 - Varianty tepelného zpracování pro snížení pnutí u Ti-6Al-4V, data pro 1. variantu z [1] a pro 2. variantu z [9]	15
Tabulka 3 - Rozvržení procesu žíhání vzorků.....	37
Tabulka 4 - Naměřené hodnoty průhybů tryskaných vzorků.....	41
Tabulka 5 - Naměřené hodnoty průhybů žíhaných vzorků	41
Tabulka 6 - Hodnoty napětí při elektrolytickém odleptání (tryskané vzorky).....	45
Tabulka 7 - Hodnoty napětí při elektrolytickém odleptání (vzorky žíhané na 490 °C)	45
Tabulka 8 - Hodnoty napětí při elektrolytickém odleptání (vzorky žíhané na 570 °C a 610 °C).....	46
Tabulka 9 - Hodnoty napětí při elektrolytickém odleptání (vzorky žíhané na 650 °C)	46
Tabulka 10 - Hodnoty snížení průhybu u měřených žíhaných vzorků	49