

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

**VÝZKUM VYBRANÝCH PARAMETRŮ INTEGRITY POVRCHU
PŘI OBRÁBĚNÍ MATERIÁLŮ LETECKÉHO PRŮMYSLU**

Ing. Zdeněk Pitrmuc

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Strojírenská technologie

Školitel: prof. Dr. Ing. František Holešovský

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Název anglicky:

*Research of selected surface integrity parameters in machining of
aerospace materials*

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: *Ing. Zdeněk Pitrmuc
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 166 07 Praha 6 – Dejvice*

Školitel: *prof. Dr. Ing. František Holešovský
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 166 07 Praha 6 – Dejvice*

Školitel-specialista: *Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 166 07 Praha 6 – Dejvice*

Oponenti: *prof. Ing. Nikolaj Ganjev, CSc. – ČVUT v Praze, FJFI
doc. Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D. – TUL, FS
doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D. – ZČU, FS*

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod.

v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze,
Technická 4, Praha 6

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Strojírenská
technologie.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní
ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.
předseda oborové rady oboru Strojírenská technologie
Fakulta strojní ČVUT v Praze

Resumé

Disertační práce s názvem „Výzkum vybraných parametrů integrity povrchu při obrábění materiálů leteckého průmyslu“ se zabývá komplexním hodnocením integrity povrchu materiálů používaných v letectví a dalších pokročilých odvětvích průmyslu s důrazem na analýzu zbytkových napětí. Práce podrobně popisuje vývoj mechanické metody měření hloubkových průběhů zbytkových napětí a její ověřování prostřednictvím porovnání výsledků se standardizovanou metodou rentgenové difrakce. Metoda je dále aplikována na měření zbytkových napětí titanové slitiny, niklové slitiny a austenitické nerezové oceli po základních operacích obrábění i pokročilých technologiích dokončování povrchů. Výsledky zbytkových napětí jsou prezentovány v úzké vazbě na změny mikrostruktury a profilu mikrotvrlosti povrchu.

Klíčová slova

Zbytkové napětí, Mikrotvrlost, Integrita povrchu, Titanové slitiny, Inconel, Nerezové oceli, Metalografie, Zpevňovací technologie, Shotpeening, Elektrolytické rozpouštění

Summary

The dissertation thesis "Research of selected surface integrity parameters in machining of aerospace materials" deals with a comprehensive assessment of the surface integrity of metal materials used in aviation and other high value manufacturing industries with an emphasis on the analysis of residual stresses. The work describes in detail the development of a mechanical method for measuring the depth profiles of residual stresses and its verification by comparing the results with a standardized X-ray diffraction method. The method is further applied to the measurement of residual stresses of titanium alloy, nickel alloy and austenitic stainless steel after basic machining operations and advanced surface finishing technologies. The results of residual stresses are presented in close relation to microstructural changes and microhardness profile of the surface.

Key words

Residual stresses, Microhardness, Surface integrity, Titanium alloys, Inconel, Stainless steel, Metalography, Surface strengthening technologies, Shotpeening, Electrolytic etching

Obsah

1.	Úvod	10
2.	Současný stav problematiky	11
2.1.	Integrita povrchu	11
2.2.	Zbytková napětí	13
2.3.	Metody měření zbytkových napětí	14
3.	Cíle disertační práce.....	16
4.	Vývoj metody měření zbytkových napětí	17
5.	Další použité laboratorní postupy	24
6.	Integrita povrchu titanových slitin – Ti6Al4V	24
7.	Integrita povrchu po soustružení nerezových ocelí.....	28
8.	Integrita povrchu turbínových lopatek z Inconelu 713 LC	30
9.	Integrita povrchu aditivně zpracované oceli AISI 316L	32
10.	Závěr.....	34
11.	Seznam použité literatury v tezi	36
12.	Seznam publikací autora	40
12.1.	Publikace přímo související s disertační prací.....	40
12.2.	Ostatní publikace a tvůrčí činnost autora	41
12.2.1	Články	41
12.2.2	Statě ve sborníku	42
12.2.3	Ověřené technologie a užité vzory	44
12.2.4	Výzkumné zprávy evidované v databázi V3S.....	44

1. Úvod

Dosažení co nejlepšího využití materiálu, maximální spolehlivosti a vysoké životnosti výrobků je podmíněno zkvalitněním konstrukčních, výpočtových i výrobních činností. Nejpokročilejší oblasti strojírenského průmyslu jako je letectví, energetika či zbrojní průmysl již delší dobu ke zvýšení užitečných parametrů svých výrobků a technologických celků zavádí nové netradiční materiály, které kromě svých nezpochybnitelných předností v konkrétní aplikaci přinášejí obvykle i komplikace na straně výrobních technologií. Na stavu povrchové vrstvy součástí se současně podílí vlivy materiálu, konstrukce i použité výrobní technologie. Povrch součástí je vysoce exponovaný po stránce provozního zatížení a zároveň tvoří rozhraní podléhající vlivům vnějšího prostředí. Proto je nutné mít dostatek poznatků také o vlivu jednotlivých technologií zejména na zbytkovou napjatost, stupeň zpevnění a strukturní stabilitu povrchu. Ideální by bylo mít takové pensum znalostí, abychom prostřednictvím volby řezných podmínek, nebo obecněji technologických parametrů dokončovacích operací, dokázali užité vlastnosti povrchu cíleně řídit.

Doktorská práce s názvem „Výzkum vybraných parametrů integrity povrchu při obrábění materiálů leteckého průmyslu“ se komplexně zabývá integritou povrchu, popisem a hodnocením jejich jednotlivých složek. Detailní pozornost je věnována zbytkovým napětím v povrchové vrstvě, jakožto složce předurčující rozměrovou stálost a dynamickou životnost za provozu. Základní prostředek k jejich systematickému výzkumu představuje vývoj a optimalizace mechanické metody experimentálního měření hloubkových průběhů zbytkových napětí. Metoda pracuje na principu měření uvolněné deformace po elektrolytickém rozpouštění povrchové vrstvy v definované oblasti. V konečné podobě metoda umožňuje velmi rychlé a nenákladné stanovení průběhů zbytkových napětí. Na rozdíl od ostatních metod probíhá měření celého průběhu kontinuálně na jedno upnutí, navíc bez silového a tepelného účinku při úběru materiálu.

Druhá polovina doktorské práce je věnována ověřování vyvinuté metody, jejímu porovnání s nejčastěji používanou metodou rentgenové difrakční tenzometrie a aplikaci metody na pokročilé materiály využívané primárně v letectví a energetice – titanovou slitinou Ti6Al4V, Inconel 713LC a nerezovou ocel AISI 304. Analyzované povrchy byly cíleně zpracovány technologiemi, se kterými se lze nebo pravděpodobně bude možné setkat právě v pokročilých odvětvích průmyslu. Výsledky typických průběhů zbytkových napětí pro jednotlivé technologie jsou v práci doplněny o vyhodnocení dalších

složek integrity povrchu a navazují na publikační činnost autora v oblasti kvality povrchové vrstvy a dokončovacích technologií.

2. Současný stav problematiky

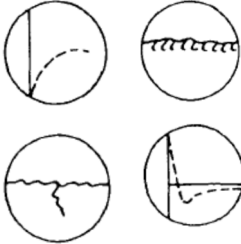
2.1. Integrita povrchu

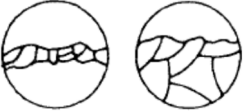


Potřeba hlubšího studia vlastností povrchu a povrchových vrstev řady technických materiálů, zejména kovových, vyvolala vznik nových oblastí materiálového inženýrství označovaných jako „povrchové inženýrství (surface engineering)". Pro komplex charakteristik povrchu a povrchových vrstev se užívá v odborné literatuře pojem „integrita povrchu (surface integrity)". Tento výraz nepatří přesně definované fyzikální nebo technologické veličině, ale je to více méně volný soubor takových vlastností povrchu a povrchové vrstvy, které jsou vytvořeny nebo ovlivněny technologickými procesy a u kterých se současně očekává vliv na funkční vlastnosti součástí. [2]

Kvalita povrchové vrstvy hraje výraznou roli u součástí dynamicky namáhaných a u součástí, které jsou ve vzájemném kontaktu a pohybu. V leteckém, kosmickém a vojenském průmyslu je spolehlivost a tedy i životnost klíčová. [3]

Přehled vlivů a možných účinků na povrchovou vrstvu uvádí Tab. 2.1 vypracovaná již v roce 1970 v GE Aircraft Engine Group Cincinnati. [4]

Tab. 2.1: Vlivy a účinky na povrchovou vrstvu [4].

Vliv	Účinek na povrchovou vrstvu
Mechanický	Plastická deformace Přeložky, převalený a vytrhaný povrch Změny tvrdosti Trhliny - makro a mikroskopické Zbytková napětí Změna odolnosti proti únavě 

Vliv	Účinek na povrchovou vrstvu
Metalurgický	Fázové transformace Velikost, tvar a orientace zrn Velikost precipitátů a jejich rozložení Cizí vměstky Dvojčatění Rekrystalizace 
Chemický	Mezikrystalická napadení (IGA) Mezikrystalická koroze (IGC) Mezikrystalická oxidace (IGO) Kontaminace Zkřehnutí Důlková nebo selektivní koroze Koroze a koroze pod napětím 
Tepelný	Tepelně ovlivněná zóna Natavení povrchových vrstev Přeskupení materiálu 
Elektrický	Změna elektrické vodivosti Změna magnetických vlastností

Za nejvýznamnější a nejčastěji sledované vlastnosti, které charakterizují integritu povrchu po obrábění lze považovat:

- mikrogeometrii obrobeného povrchu
- zpevněnou vrstvu - stupeň a hloubka
- strukturní, fázové a chemické změny v povrchové vrstvě
- zbytková napětí - smysl, velikost a gradient [2], [3], [5], [6]

2.2. Zbytková napětí

Vnitřní napětí zůstávající v součásti i po odstranění zatížení, které je vyvolalo se nazývají zbytková napětí. Součást jako taková zůstává v silové a momentové rovnováze. Jakýkoli zásah nebo odebrání materiálu ze součásti způsobí přerozdělení zbytkových napětí a deformaci součásti. To je mimo jiné princip mechanických měření zbytkových napětí. [2]

Zásadní podmínkou pro vznik zbytkových napětí je překročení meze kluzu materiálu v určitém objemu (vrstvě materiálu), nikoliv v celém objemu. Pro dynamicky namáhané součásti se přednostně požaduje tlakové zbytkové napětí v povrchové vrstvě. Nevhodná zbytková napětí (tahová) působí na součást jako konstrukční vrub vyvolávající špičky napětí. Podle objemu v němž dosahují vnitřní napětí rovnováhy, se rozlišují 3 druhy zbytkových napětí:

- **Zbytková napětí I. druhu**

Zbytková napětí I. druhu jsou důsledkem nekompatibility mezi makroskopickými oblastmi. Považují se za homogenní, tj. konstantní, co do směru a velikosti. Rovnováhy se dosahuje v makroskopických objemech, typicky nekonečných tenkých vrstvách a deskách. [7], [8]

- **Zbytková napětí II. druhu**

Objemy, v nichž je uvažováno homogenní napětí, jsou podstatně menší a omezují se na velikost jednotlivých krystalů. Měřitelná jsou na některých materiálech za použití difrakčních metod. U rentgenové difrakce se projevují změnou šířky difrakční linie [7]. Porušení silové a momentové rovnováhy nemusí vyvolat změny makroskopických rozměrů [2], [8]

- **Zbytková napětí III. druhu**

Jedná se o napětí, která jsou nehomogenní i v rozsahu několika meziatomových vzdáleností. Tvoří napěťová pole doprovázející mřížkové poruchy v reálných krystalech. Nikdy nedochází ke změnám makroskopických rozměrů porušením rovnováhy. [7], [8]

Příčiny vzniku zbytkových napětí mohou být velmi různé, nicméně změny se vždy realizují prostřednictvím čtyř základních mechanismů a jejich vzájemných kombinací:

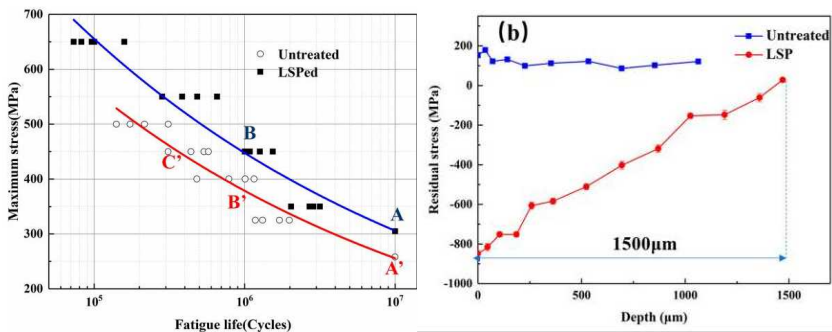
- nerovnoměrná plastická deformace
- nerovnoměrný ohřev a chlazení
- nerovnoměrná fázová transformace
- absorpce prvků do povrchové vrstvy

Zbytková napětí mají vliv především na životnost dynamicky namáhaných součástí. Citlivost únavové pevnosti na změny vlastností v povrchové vrstvě si

lze vykládat tím, že při ohybu a krutu je vždy maximální napětí v krajních vlákních na povrchu. Navíc povrchová vrstva je nejvíce postižena metalurgickými vadami, vrypy, ryskami, vakantními místy, difuzí cizích prvků a strukturních změn.[2], [10]

Zkušenosti z praxe a experimentálního výzkumu potvrzují veškeré teorie o tom, že tahová zbytková napětí únavovou pevnost snižují a tlaková naopak zvyšují. [2], [9], [10].

Publikace [11] hodnotí přínos v oblasti časované životnosti na základě odstupu Wohlerových křivek po vyvození hloubkového tlakového průběhu zbytkového napětí na vzorcích po technologii laser shock peening (LSP).



Obr. 2.1: Posun Wohlerovy křivky ($R=0,1$) pro Ti6Al4V po zpevnění technologií LSP (modrá) vůči stavu bez zpevnění (červená) [11].

Obr. 2.2: Průběh zbytkových napětí únavových těles pro základní stav (modrá) a pro stav po LSP s výraznými tlakovými napětími (červená) [11].

2.3. Metody měření zbytkových napětí

Měření zbytkových napětí je prováděno bez ohledu na metodu na malém makroobjemu materiálu, u kterého je výsledek měření vždy zatížen nebezpečím zásadní chyby při nedodržení postupu či podmínek. Pro měření zbytkových napětí dosud nemáme tak jednoduché a propracované metody jako pro vyhodnocování základních fyzikálních a materiálových vlastností.

Je-li požadováno stanovit průběh zbytkových napětí ve směru normály k povrchu do větších hloubek a nikoli pouze limitní povrchové vrstvy, vedou prakticky všechny metody k zásahu do součásti, případně její destrukci za účelem vyhotovení příčného řezu. Zejména v poslední době s rozvojem výpočetní techniky a metody konečných prvků je snahou pokoušet se o

hodnocení zbytkových napětí pomocí simulací a celých matematických modelů predikující výslednou zbytkovou napjatost pro jednotlivé technologie. Některé lze nalézt například v publikacích [12], [13], [14], [15], [16]. Mechanismus vzniku těchto napětí je natolik složitý, obsahuje tolik vstupů, že se výpočtové modely stěží shodují s realitou a ověření zbytkových napětí experimentální cestou je nezbytné. V historické posloupnosti bylo zbytkové napětí určováno:

- **z makroskopických deformací** uvolněných během odstranění definovaného objemu (vrstvy), ve kterém zbytkové napětí působí. Odebráním vrstvy materiálu, porušením celistvosti, naříznutím dojde k porušení rovnováhy vnitřních sil. Deformace se sleduje na prodloužení, průhybu, zkosení, nebo změně křivosti. Tento mechanismus tvoří základ všech mechanických metod. Princip je obdobný jako získávání meze kluzu a meze pevnosti, které jsou rovněž odvozeny z deformace vzorku pod zatížením.

- **ze zbytkové deformace kovové mřížky.** Na tomto základě jsou vybudovány rentgenová a neutronová difrakce

- **ze změny fyzikálních veličin,** které jsou závislé na zbytkovém napětí, např. sonických či magnetických. [2], [7]

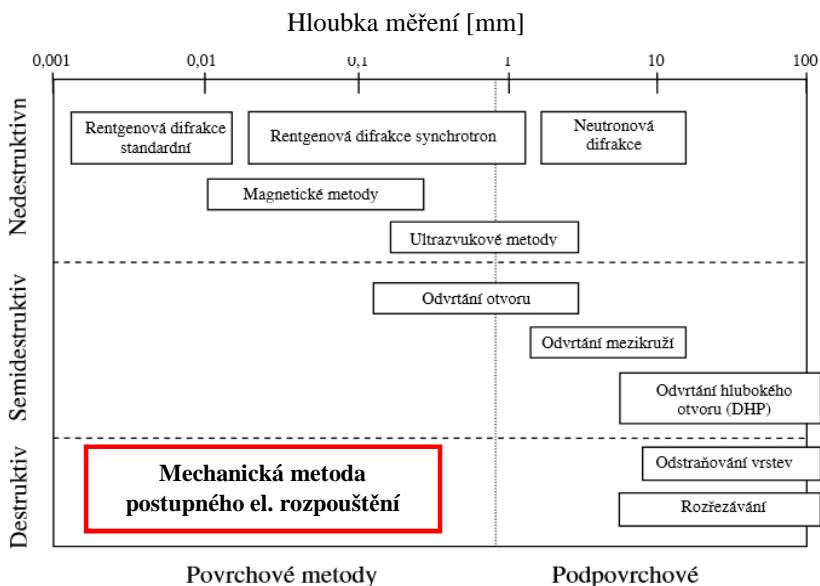
Formální rozdělení metod lze provést na základě mnoha kritérií. Dle použitého fyzikálního principu je možné rozlišovat:

- mechanické
- difrakční
- magnetické
- ultrazvukové
- ostatní nepřímé

Dělení je rovněž možné provést na základě porušení celistvosti součásti na: destruktivní, semidestruktivní, nedestruktivní [7].

Z pohledu dělení metod měření zbytkových napětí je rovněž důležitý rozsah hloubek pod povrchem, ve kterých je schopna metoda napětí zjišťovat. Toto hledisko dělí metody na povrchové, které jsou schopny hodnotit ovlivnění povrchu technologií, jíž byl povrch zhotoven a metody podpovrchové zjišťující vnitřní zbytková napětí působící ve výrazně větších objemech. Pomyslná hranice mezi těmito skupinami není přesně definována. Na Obr. 2.3 [17] je přehled hloubek, v nichž lze realizovat měření vybranými metodami. Je zde rovněž zanesena oblast aplikace vyvíjené mechanické metody postupného

elektrolytického odleptávání. Jak plyne z obrázku metoda je schopna pokrýt prakticky největší oblast aplikací.



Obr. 2.3: Rozdělení metod dle hloubky měření [17]

3. Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je systematické určení vlastností integrity povrchu v závislosti na použité technologii u perspektivních technických materiálů využitelných v pokročilých technických oborech jako je letectví, energetika, medicínský a zbrojní průmysl.

K dosažení tohoto cíle je nutné vyvinout efektivní a dostupnou metodu měření zbytkových napětí a komplexně analyzovat vybrané technologické vzorky reprezentující stavy, které se mohou vyskytovat v různých fázích rozpracovanosti výrobků ve výše zmíněných oblastech.

Na základě kritické rešerše v kapitole disertační práce 2.10 *Použitelnost metod pro měření lopatek z Ti6Al4V* byly identifikovány metody měření zbytkových napětí, které umožňují zjišťování hlubkových průběhů zbytkové napjatosti v povrchu součástí. Kapitola disertační práce 2.9 *Inovace v měřeních zbytkových napětí v posledních 10 letech* prezentuje aktuální směry vývoje i aplikace metod pro měření zbytkových napětí. Z obsahu obou kapitol vyplývá

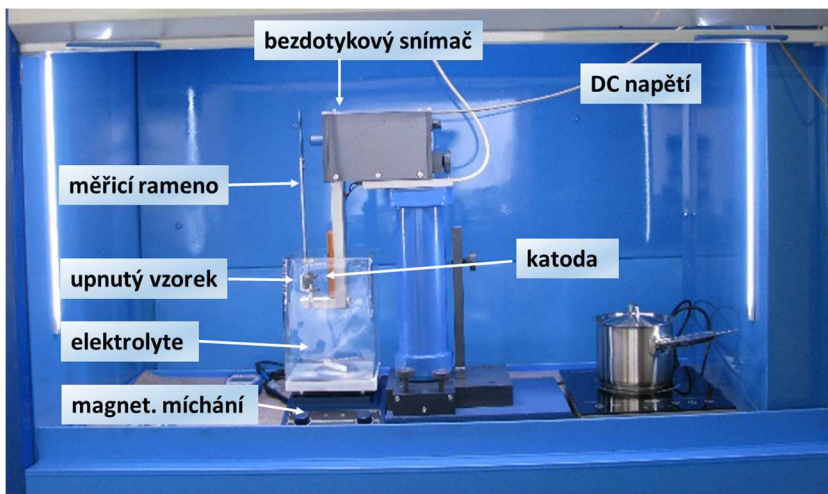
potřeba vývoje robustní metody měření hloubkových profilů zbytkových napětí, kterou lze spolehlivě využít zejména k hodnocení vlivu dokončovacích a zpevňovacích technologií. Na základě provedené rešerše bylo rovněž zjištěno, že vyvíjená mechanická metoda měření průběhů zbytkových napětí je jedinečná koncepcí zařízení i zpracováním naměřených dat. V konfiguraci, která je předmětem kapitoly 4 není metoda publikována. Doposud využívané jsou pouze její dílčí principy a způsoby úběru materiálu. Vymezení se vůči existujícím publikacím uvádějícím tyto dílčí principy je předmětem kapitoly disertační práce *2.9.3 Používání mechanické metody s úběrem vrstev ve světě*.

Ke splnění hlavního cíle je potřeba dospět splněním dílčích cílů:

1. Vývoj mechanické metody měření hloubkových průběhů zbytkových napětí s využitím postupného elektrolytického odleptávání vrstev a její ověření porovnáním se standardizovanou měřicí metodou
2. Experimentální určení vlastností podstatných pro integritu povrchu vzorků s úpravami použitých experimentálních metod pro garantovanou opakovatelnost výsledků
3. Určení vazeb mezi použitou technologií a dosaženými vlastnostmi integrity povrchu (zbytkovými napětími, mikrotvrdostí a lokálními změnami mikrostruktury) pro jednotlivé materiály

4. Vývoj metody měření zbytkových napětí

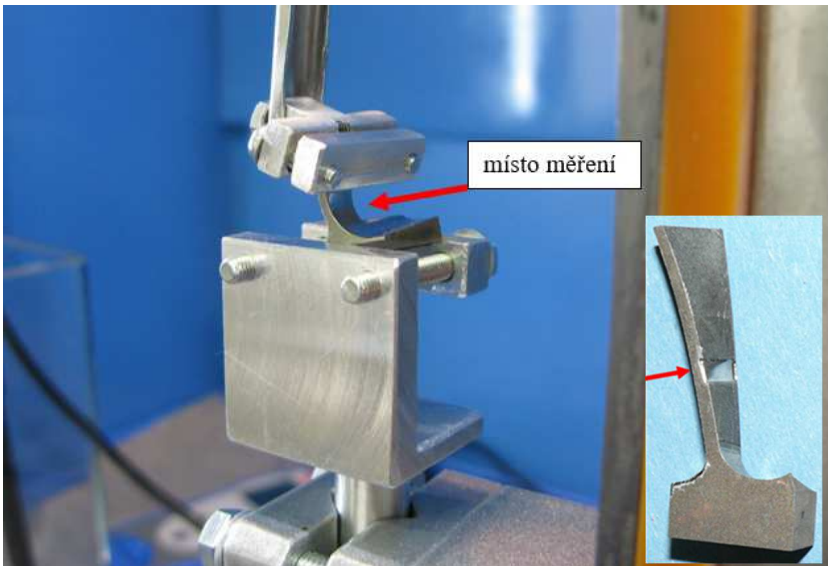
V laboratoři obrábění Fakulty strojní ČVUT v Praze byla doc. Ing. Ferdinandem Neckářem, CSc. a doc. Ing. Jindřichem Kafkou, CSc. vypracována mechanická metoda měření zbytkového napětí využívající elektrolytické (anodové rozpouštění) nebo chemické rozpouštění vrstev materiálu a snímání deformace uvolněné po úběru povrchové vrstvy [5]. Metoda se vyvinula z klasické metody pásků. Přesto, že se deformace uvolňuje kontinuálně, odečet deformace a následný výpočet zbytkových napětí bylo možné provádět pouze inkrementálně a s ohledem na charakter průběhů v nerovnoměrných krocích. Metoda i podoba vlastního zařízení byla poplatná době vzniku (70. léta), neumožňovala vzhledem k pracnosti nasazení na větší počty vzorků a způsob úběru materiálu představoval bezpečnostní rizika pro obsluhu.



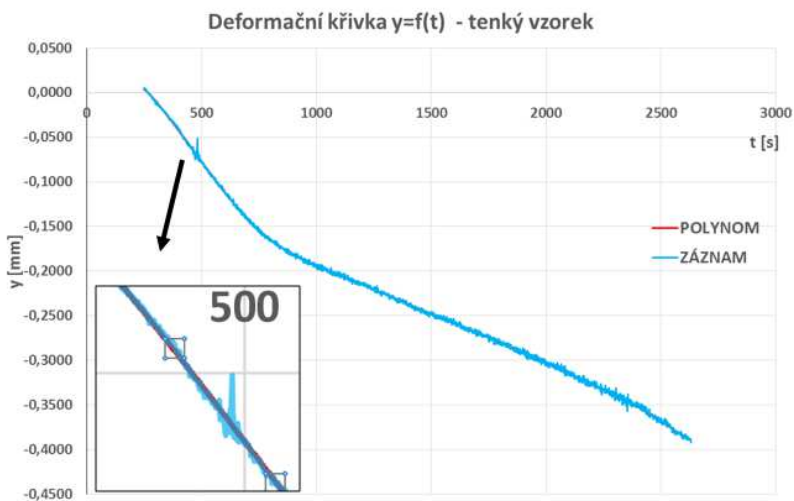
Obr. 4.1: Měřicí zařízení v konfiguraci pro měření lopatek [18]

V rámci disertační práce byla metoda dále vyvíjena do podoby umožňující opakovatelné měření širšího spektra vzorků i materiálů. V počáteční fázi studia bylo na základě znalosti procesu vyvinuto a vyrobeno nové zařízení (Obr. 4.1) osazené novými typy indukčních čidel s možným osazením čidly pracujícími na principu vířivých proudů. S ohledem na použitá čidla byly vyrobeny nové upínací a měřicí přípravky s dostatečnou tuhostí. Nenáročné míchání elektrolytu bylo vyřešeno externí magnetickým míchadlem.

Zásadním problémem pro dosažení spolehlivosti metody i bezpečnosti provozu se ukázal způsob úběru materiálu. V rámci vývoje bylo testováno několik elektrolytů, které byly vytypovány na základě výzkumné zprávy doc. Mejty Katedry organické chemie VŠCHT [19]. Jako nejvhodnější širokospektrální elektrolyty byly vybrány elektrolyty na bázi kyseliny chloristé HClO_4 , methanolu CH_3OH a 2-butoxy ethanolu $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$. Pro výsledný elektrolyt byla vytvořena závislost proudové hustoty na napětí po různé materiály, závislosti rychlosti úběru R_R na napětí a závislosti minutového úběru R_R na kumulativním množství rozpuštěného materiálu. Z provedených experimentů bylo zjištěno doporučené napětí 15 až 20 V, kterému odpovídají rychlosti rozpouštění 0,01 mm/min při přijatelných proudových hustotách okolo 10 A/dm². Pro eliminaci ohřevu a ovlivnění elektrolytu je minimálně 70 ml/mm² rozpouštěné plochy.



Obr. 4.2: Měřící zařízení v konfiguraci pro měření lopatek



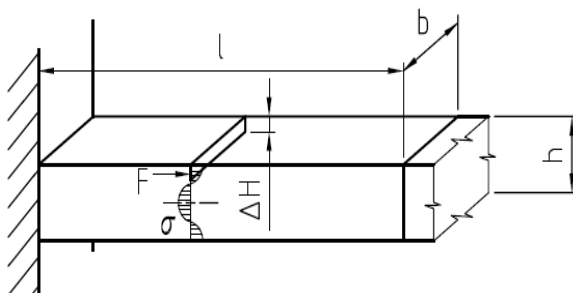
Obr. 4.3: Záznam uvolněné deformace a překryv měřeních bodů a náhradního polynomu deformace

Od roku 2017 byla metoda zdokonalena po stránce sběru a vyhodnocení naměřených dat, čímž bylo časově efektivní měření podmíněno. Záznam deformace je snímán v intervalech jedné vteřiny. Pomocí algoritmů filtrace umožňuje eliminovat náhodná chvění a vibrace způsobené vnějšími vlivy. Rozkmit záznamu dlouhodobějšího charakteru (v důsledku míchání) je odstraněn pomocí náhrady průběhu polynomem (Obr. 4.3). Maximální stupeň polynomu je 15. Náhrada umožnila celý výpočet automatizovat a okamžitě po ukončení měření a zadání vstupních geometrických veličin provést výpočet průběhu a export průběhu zbytkových napětí.

Při výpočtu je uvažován vetknutý prizmatický nosník obdélníkového průřezu jako vzorek. Výpočet zbytkových napětí v jednotlivých vrstvách vzorku vychází z klasických vztahů pružnosti a pevnosti. Pro stanovení napětí je třeba přijmout dva základní předpoklady:

- Ve vrstvičce tloušťky ΔH je zbytkové napětí $\sigma = \text{konstantní}$.
- Odebrání vrstvičky ΔH způsobí deformaci a indikuje zbytkové napětí takové, jaké by vyvolalo stejnou deformaci při působení vnější síly F na tuto vrstvičku:

$$F = \Delta H \cdot b \cdot \sigma \quad (4.1)$$



Obr. 4.4: Schéma napětí v leptaném vzorku [18]

Pro odvození výpočtu napětí pro jednu odebranou vrstvu ΔH jsou zavedeny veličiny [20]:

a = délka měřícího třmenu (vzdálenost od leptané plošky po snímač)

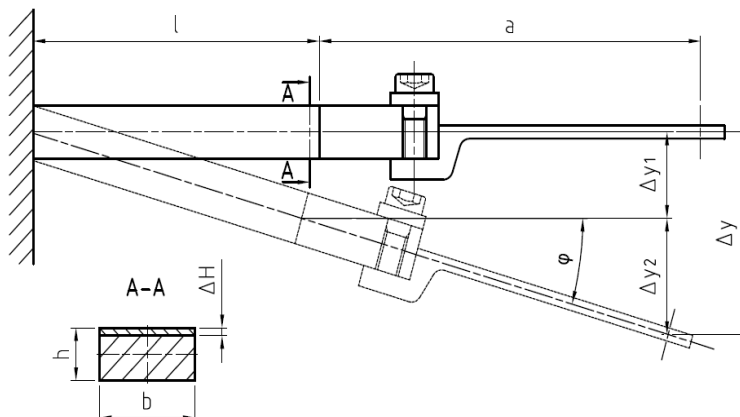
φ = úhel pootočení koncového průřezu

Δy = měřená hodnota deformace

Δy_1 = průhyb nosníku (= měřená deformace od průhybu)

Δy_2 = natočení měřícího třmenu v rovině měření (= měřená deformace od natočení)

l = výška leptané plochy (rozměr ve směru napětí)
 b = šířka leptané plochy
 h = tloušťka vzorku
 E = modul pružnosti v tahu
 I = kvadratický moment průřezu (moment setrvačnosti průřezu)
 M_o = ohybový moment



Obr. 4.5: Schéma pro výpočet zbytkového napětí ze snímané deformace

Pro jednotlivé složky měřené deformace lze zavést vztahy:

$$\Delta y_1 = \frac{1}{E \cdot I} \int_0^l M_o \cdot x \cdot dx = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \frac{M_o \cdot l^2}{2} \quad (4.2)$$

$$\Delta y_2 = a \cdot \Delta \varphi = \frac{a}{E \cdot I} \int_0^l M_o \cdot dx = \frac{1}{E \cdot I} \cdot M_o \cdot l \cdot a \quad (4.3)$$

, kde pro prizmatický obdélníkový průřez a ohybový moment síly působící ve vrstvě platí:

$$M_o = F \cdot \frac{h}{2} = \sigma \cdot \Delta H \cdot b \cdot \frac{h}{2} \quad (4.4)$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (4.5)$$

Po dosazení platí pro celkovou měřenou deformaci nosníku obdélníkového průřezu:

$$\Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_2 = \frac{M_o \cdot l}{E \cdot I} \cdot \left(\frac{l}{2} + a \right) = \frac{\sigma \cdot b \cdot \Delta H \cdot h \cdot l}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{l}{2} + a \right) \quad (4.6)$$

Z uvedeného vztahu lze úpravou vyjádřit vztah pro napětí:

$$\sigma = \frac{\Delta y}{\Delta H} \cdot \frac{2 \cdot E \cdot b \cdot h^3}{12 \cdot b \cdot l \cdot h \cdot \left(\frac{l}{2} + a\right)} = \frac{\Delta y}{\Delta H} \cdot \frac{E \cdot h^2}{3 \cdot l \cdot (l + 2a)} \quad (4.7)$$

Z důvodu opakovaného výpočtu v jednotlivých vrstvách je vhodné vztah uvést ve tvaru:

$$\sigma = \frac{\Delta y}{\Delta H} \cdot K \cdot h^2, \text{ kde } K = \frac{E}{3 \cdot l \cdot (l + 2a)} \quad (4.8)$$

V případě výpočtu zbytkových napětí v n-vrstvách se vypočtené napětí ve vrstvě σ_{vn} vypočítá v principu podobně:

Δy_n - deformace vzniklá odebráním vrstvy n, měřená v místě snímače

ΔH_n - tloušťka odebrané vrstvy n

h_n - tloušťka vzorku po odebrání vrstvy n

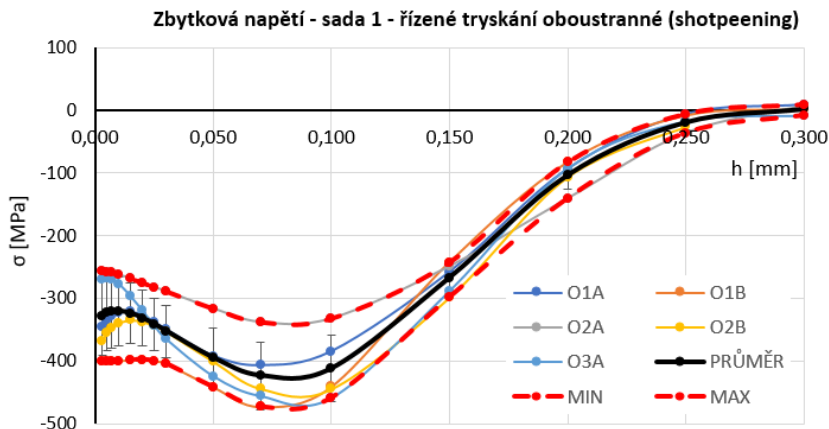
$$h_n = h_0 - \sum_1^n \Delta H_n \quad (4.9)$$

$$\sigma_{vn} = \frac{\Delta y_n}{\Delta H_n} \cdot K \cdot h_n^2 \quad (4.10)$$

Takto vypočtené napětí nezohledňuje vypočtená napětí v předchozích vrstvách, nezohledňuje změnu průřezu a je nutno ho korigovat ponížením o sumu korekcí (menšitel v následujícím vztahu). Touto úpravou se obdrží skutečné napětí v n-té vrstvě σ_n , které je výstupem z výpočtu [20]:

$$\sigma_n = \sigma_{vn} - \sum_1^n \sigma_{v(n-1)} \cdot \frac{4 \cdot \Delta H_n}{h_n} \quad (4.11)$$

Metoda byla ve své konečné podobě testována na technologických vzorcích s minimální variabilitou vlastností povrchu. Ve všech vyšetřovaných bodech průběhu se variabilita výsledků pohybovala v rozmezí 10 až 20 % (Tab. 4.1). Stabilně nižší hodnoty variability byly dosahovány u tenčích vzorků s vyšší citlivostí (při stejném napětí je uvolněna vyšší deformace v důsledku nižší tuhosti vzorku).

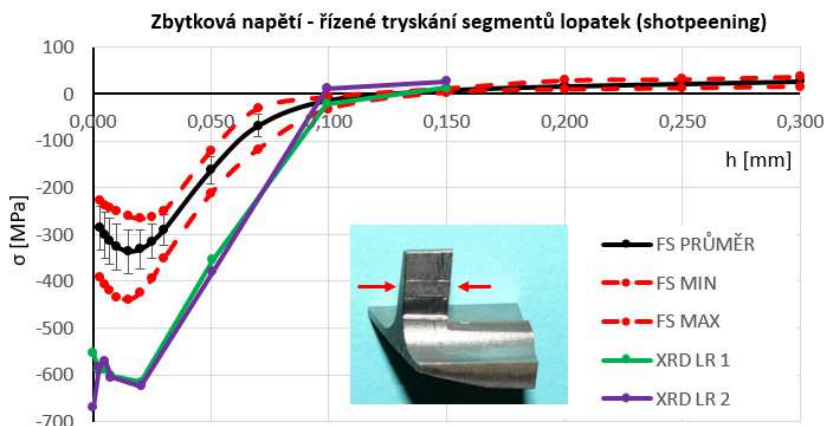


Tab. 4.1: Naměřená data pro jednotlivé vzorky (O1A až O3A) a zobecněné průběhy pro 1. ověřovací sadu – řízené tryskání

vz.	O1A	O1B	O2A	O2B	O3A	PRŮM	SMDCH	VAR	MIN	MAX
h [mm]	σ	σ	σ	σ	σ	$\bar{\sigma}$	s_{σ} [MPa]	v_{σ} [%]	σ	σ
0,003	-346	-399	-256	-367	-269	-328	62	19	-399	-256
0,005	-336	-400	-257	-355	-268	-323	60	19	-400	-257
0,007	-329	-401	-259	-347	-269	-321	58	18	-401	-259
0,010	-323	-400	-262	-339	-277	-320	55	17	-400	-262
0,015	-321	-398	-268	-335	-297	-324	49	15	-398	-268
0,020	-327	-398	-275	-337	-320	-331	44	13	-398	-275
0,025	-338	-400	-282	-344	-344	-341	42	12	-400	-282
0,030	-350	-405	-289	-353	-365	-352	42	12	-405	-289
0,050	-392	-442	-316	-401	-424	-395	48	12	-442	-316
0,070	-407	-473	-338	-444	-456	-423	54	13	-473	-338
0,100	-384	-441	-332	-444	-459	-412	53	13	-459	-332
0,150	-258	-242	-249	-298	-288	-267	25	9	-298	-242
0,200	-93	-83	-141	-106	-93	-103	22	-141	-141	-83
0,250	-6	-9	-36	-26	-17	-19	12	-36	-36	-6
0,300	9	1	7	#####	-8	2	8	-8	-8	9

Na vzorcích lopatek bylo provedeno přímé srovnání dosažených výsledků prostřednictvím vyvinuté metody a standardizované rentgenové difrakční tenzometrie. Průběhy zbytkových napětí se shodovaly v tlakovém charakteru i hloubce přechodu do vyrovnávacích napětí (tloušťce kompresní vrstvy).

Výsledky se však rozcházejí v absolutních hodnotách napětí (Obr. 4.7). Napětí zjištěná rentgenovou difrakcí vykazovala vždy vyšší hodnoty, přičemž se z analyzovaných vzorků zdá vysoce pravděpodobné, že odstup zjištěných hodnot se zvětšuje s reálnou hodnotou zbytkových napětí, ať už považujeme za platnou kteroukoli metodu. Z provedených měření nelze stanovit jednoznačnou převodní závislost pro přepočet hodnot napětí mezi metodami. Tento problém se netýká pouze prezentované metody, ale byl pozorován pro všechny mechanické metody - viz kapitola disertační práce 2.10 a publikace [6], [21], [22], [23].



Obr. 4.7: Porovnání metod FS ČVUT (průměr ze sady 12 ks) a XRD Lambda Research (2 ks) na segmentech lopatek po řízeném tryskání

5. Další použité laboratorní postupy

V rámci analýz byly použity následující analytické a detekční metody - metalografie, měření mikrotvrdosti, kapilární zkoušky. Kapitola č. 5 detailním způsobem popisuje použité postupy a především jejich nutné úpravy a nastavení pro výzkum tenkých povrchových vrstev a specifických materiálů.

6. Integrita povrchu titanových slitin – Ti6Al4V

Kapitola č. 6 uvádí základní fyzikální a chemické vlastnosti titanových slitin a dává je do souvislosti s technologickými vlastnostmi. Dále jsou v úvodu kapitoly stručně popsány technologie, jimiž byly zhotoveny

experimentální vzorky. Technologie jsou popsány na úrovni principu, užití, technologických omezení, dosahovaných parametrů a potřebných nástrojů.

Tab. 6.1: Přehled analyzovaných vzorků ze slitiny Ti6Al4V

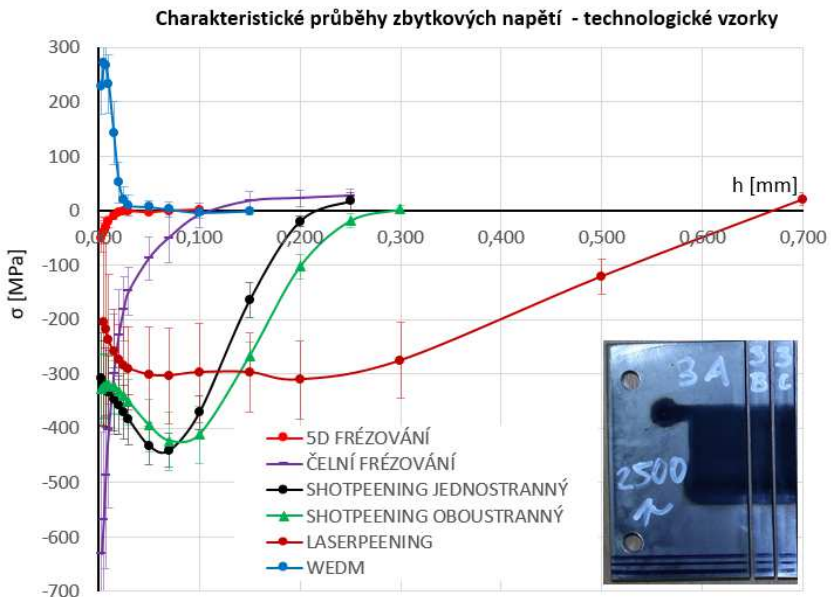
Technologie	Značení vzorků	Typ vzorku	Tloušťka [mm]	Počet
Čelní frézování	FR	technologický	4	7
5D frézování	5D	technologický	4	6
Shotpeening - jednostranný	SHP-J	technologický	4	5
Shotpeening - oboustranný	SHP-O	technologický	4	5
Laserpeening	LSP	technologický	4	6
Drátové řezání	WEDM	technologický	4	5
5D frézování os	5D	segment lopatky	1,4	9
5D frézování + vibrační kulčkování	5D+VK	segment lopatky	1,4	5
5D frézování + SPM leštění	5D+L	segment lopatky	1,4	5
5D frézování + vibrační kulčkování + SPM leštění	5D+VK+L	segment lopatky	1,4	5

Analytické činnosti probíhaly na dvou skupinách vzorků: technologických vzorcích (destičkách) a na segmentech lopatek.

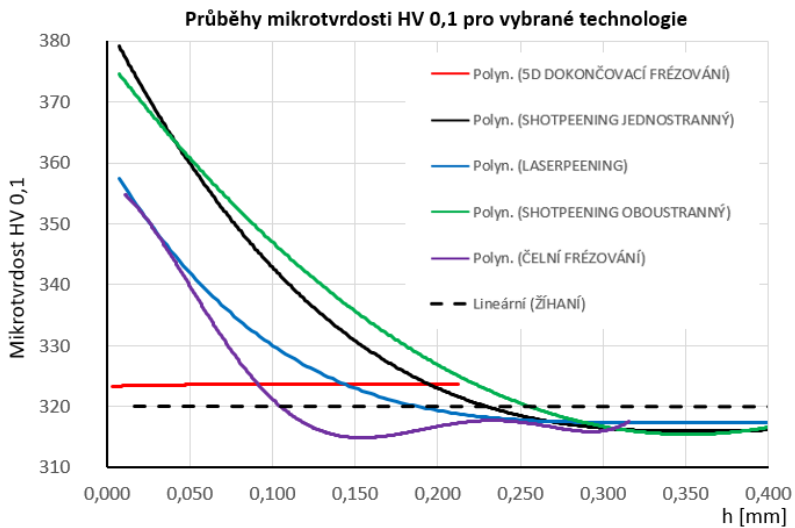
S výjimkou drátového řezání WEDM u všech vzorků detekován tlakový charakter zbytkových napětí s různou tloušťkou vrstvy tlakových napětí (Obr. 6.1). Nejmělčí průběh byl zjištěn u dokončovacího 5D frézování, naopak extrémní hloubky tlakových pnutí byly zjištěny u nekonvenčního zpeňování povrchu metodou laser shock peening LSP.

Tyto zásadní rozdíly se však prakticky nepřenášejí do zpevnění ve smyslu mikrotvrdosti. V blízkosti povrchu byl sice pozorován nárůst mikrotvrdosti o 10 až 20 %, ale tento nárůst v zásadě nepředstavuje technicky významnou změnu chování materiálu. Je minimální pro změnu technologických vlastností (například obrobitelnosti) a zrovna tak nelze očekávat výraznější nárůst životnosti a odolnosti proti otěru. Měření mikrotvrdosti při velmi nízkých zatíženích (HV 0,1) se také běžně vyznačuje vyšším rozptylem výsledků. Norma uvádí za běžné do 5 až 10%.

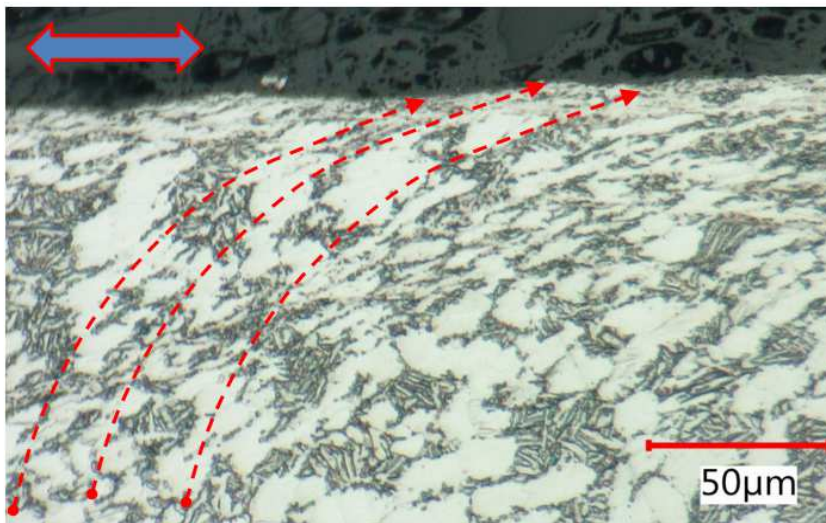
Vyhodnocením naleptané mikrostruktury byly zjištěny rozdíly v hloubce zásahu plastických deformací pod povrch. Deformaci povrchové vrstvy však není možné dávat do přímé souvislosti s vyvození průběhu zbytkových napětí a profilu mikrotvrdotosti napříč technologiemi. U frézovacích operací hrubovacích a dokončovacích je jasně patrná větší tloušťka deformované vrstvy (Obr. 6.3), která je ve shodě s větší tloušťkou kompresní vrstvy. U vibračního kuličkování a shotpeeningu tuto vazbu pozorovat nelze, jelikož povrchová vrstva není natažená tak, jako po průchodu obráběcího nástroje. U drátového řezání WEDM byla nalezena přetavená vrstva, která je příčinou tahových zbytkových napětí.



Obr. 6.1: Charakteristické průběhy zbytkových napětí - technologické vzorky



Obr. 6.2: Výsledné profily mikrotvrlosti pro jednotlivé technologie

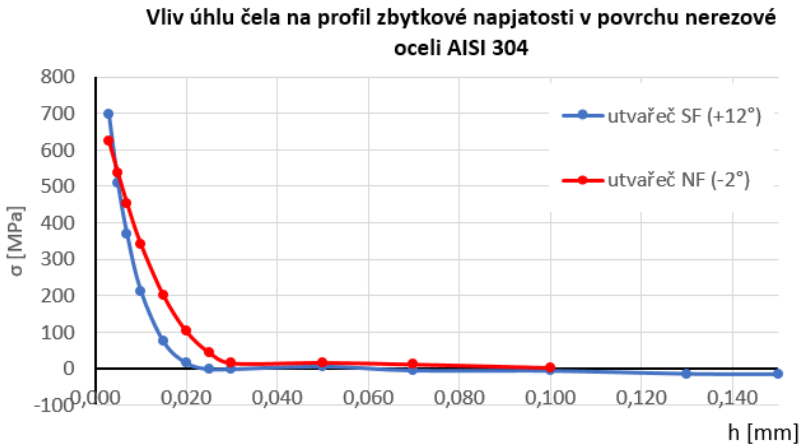


Obr. 6.3: Deformace povrchové vrstvy Ti6Al4V při čelním frézování

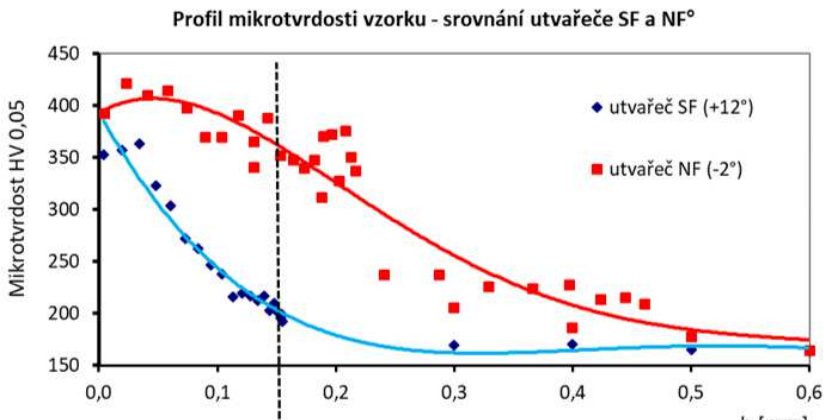
7. Integrita povrchu po soustružení nerezových ocelí

K hodnocení integrity povrchu bylo využito měření hloubkového průběhu zbytkových napětí vyvinutou mechanickou metodou s postupným elektrolytickým rozpouštěním, rentgenová difrakční tenzometrie [24], [25], metalografická analýza a zkoušky mikrotvrdomosti. Předmětem výzkumu byly povrchy po soustružení destičkami s různými úhly čela γ_{os} - utvařeče SF (pozitivní $+12^\circ$) a NF (negativní -2°).

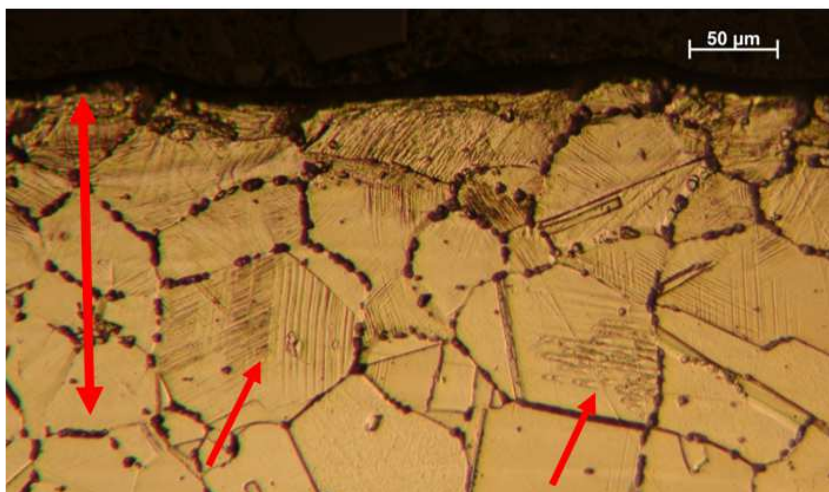
U obou geometrií byla zjištěna tahová zbytková napětí v těsné blízkosti povrchu, která pravděpodobně souvisí s natahováním povrchové vrstvy při soustružení v oblasti terciální plastické deformace (Obr. 7.1). Povrchová vrstva po soustružení vykazuje významné nárůsty mikrotvrdomosti až na hodnoty 430 HV 0,05 (při tvrdosti jádra pouze 170 HV 0,05) (Obr. 7.2)[26]. Profil mikrotvrdomosti je silně závislý na úhlu čela. S klesajícím (až negativním) úhlem čela se zvětšuje oblast primárně plastické deformace, zasahuje hlouběji pod povrch a tloušťka zpevněné vrstvy roste. Tento jev byl potvrzen přítomností deformačního martenzitu na metalografických výbrusech (Obr. 7.3) a nepochybně by ho bylo možné detekovat i magnetickými metodami [26].



Obr. 7.1: Průběh zbytkových napětí po soustružení nerezové oceli



Obr. 7.2: Profil mikrotvrlosti pro jednotlivé utvařeče, zobrazení polohy nástroje vůči zpevněné vrstvě



Obr. 7.3: Mikrostruktura AISI 304 po soustružení utvařečem NF (-2°) – výskyt deformačního martenzitu do hloubky max. 160 μm

8. Integrita povrchu turbínových lopatek z Inconelu 713 LC

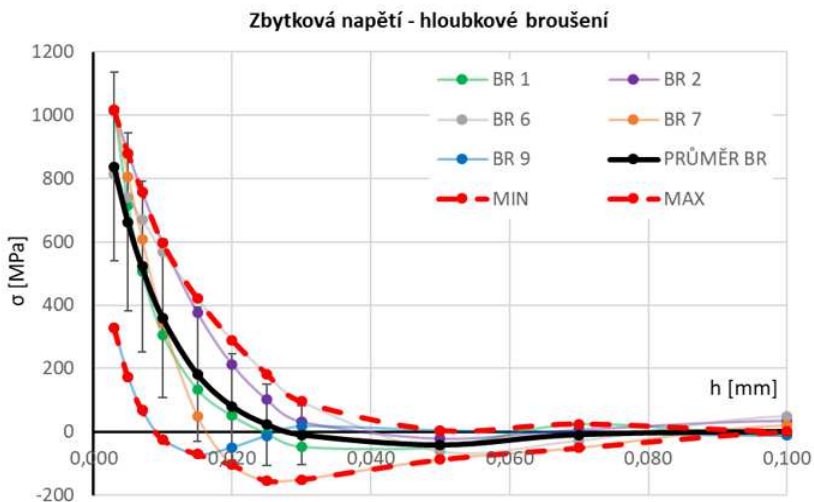
Slitiny niklu si v průběhu 20. století získaly nezastupitelné postavení v sektoru letectví, energetiky a kosmického průmyslu vzhledem k jejich korozní odolnosti, žáruvzdornosti a pevnostním vlastnostem za vysokých teplot. Ruku v ruce s kvalitativními přínosy s sebou tyto superslitiny přinášejí značně komplikované zpracování různými technologiemi, především obráběním [27], [28]. Z důvodu ztížené obrobitelnosti a výrazné redukci životnosti nástrojů musí být velmi často tradiční výrobní metody jako například tvarové frézování nahrazováno hloubkovým broušením. Broušení u těchto slitin nelze považovat pouze za technologii dokončovací, ale pro vybrané prvky (závěsy a bandáže lopatek) za jedinou možnou.

Vzhledem k odebíranému přídávku přibližně 0,8 až 2,3 mm (rozdíl vrchol/dno zámku) bylo prakticky vyloučeno broušení oscilačním způsobem. Hrubovací hloubkové broušení byl u této aplikace nejrychlejší způsob úběru většiny přídávku. Výroba lopatek proběhla na 3-osé souvisle řízené CNC brusce Magerle MFP 125 kotoučem Tyrolit Strato Ultra SU33A 702 GG 11 VB1 s počátečním průměrem 500 mm. Broušení bylo rozděleno do 4 průchodů dle Tab. 8.1.

Tab. 8.1: Řezné podmínky broušení zámků lopatek

	vc [m/s]	f [mm/min]	ap [mm]	orování před
Hrubování 1	16	190	0 až 1,5	ANO
Hrubování 2	15	260	0.715	NE
Na čisto 1	22	600	0.055	ANO
Na čisto 2	22	600	0.03	ANO

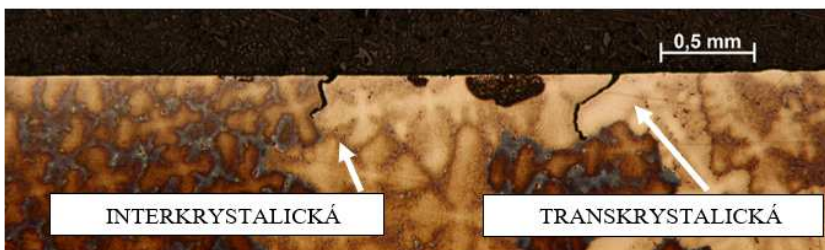
Napříč všemi testovanými podmínkami a vzorky byl zjištěn tahový charakter zbytkového napětí v těsné blízkosti povrchu. Vyrovňovacích napětí bylo dosaženo v hloubkách 0,02 až 0,04 mm pod povrchem. Vzhledem k nízké tepelné vodivosti slitiny a dlouhému stykovému oblouku je příčinou vzniku tahových pnutí primárně mechanismus nerovnoměrného ohřevu a chlazení. Tento převládající mechanismus potvrzují povrchové submikronové oxidy (náběhové barvy) a přítomnost mělkých brusných trhlin. Brusné trhliny byly detekovány fluorescenčně-penetrační zkouškou, kapilární zkouškou a metalografickým zkoumáním. Brusné trhliny jsou orientované prakticky kolmo na směr broušení. V povrchové vrstvě nebyly u takto vysoce teplotně odolné slitiny pozorovány změny mikrostruktury a jakékoli fázové transformace [29].



Obr. 8.1: Charakteristické průběhy zbytkových napětí po hloubkovém broušení



Obr. 8.2: Lineární indikace kolmé na směr broušení na rámečku lopatky



Obr. 8.3: Výbrus přes trhliny, 25x, leptáno Marble's – inter/transkrystalická trhlina

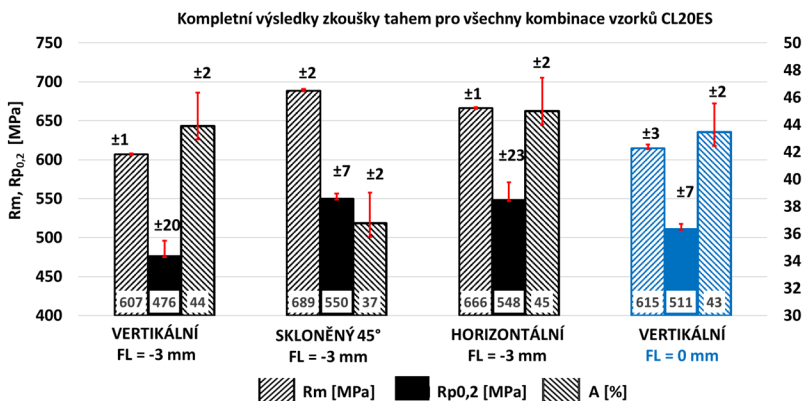
9. Integrita povrchu aditivně zpracované oceli AISI 316L

Titanová slitina Ti6Al4V ELI, niklová slitina Inconel 718, hliníková slitina AISi10Mg, kobalt-chromová slitina a nerezová ocel AISI 316L jsou aditivně zpracovávány slitiny s největším potenciálem nasazení v leteckém, zbraňovém, energetickém a kosmickém průmyslu. Součásti v těchto odvětvích prochází rozsáhlým certifikačním testováním. Analýza vzorků z nerezové oceli AISI 316L zahrnuje hodnocení stavu povrchu i základních mechanických vlastností.

Provedené mechanické zkoušky poukázaly na silnou anizotropii mechanických vlastností ve smyslu orientace vzorků vůči směru stavby. Jako srovnávací základna slouží vertikálně tištěné vzorky se standardními parametry tisku. Vzorky tisknuté pod úhlem 45° vykazovaly znatelně vyšší pevnostní vlastnosti. V případě meze pevnosti R_m činil nárůst 14 % na 689 ± 2 MPa a mez kluzu vzrostla o 16 % na 550 ± 7 MPa. Nárůst pevnostních vlastností byl podle očekávání doprovázen poklesem tažnosti o výrazných 16 % na hodnotu 37 ± 2 % [30].

Mimo směrovou anizotropii byl také posuzován vliv posunutí fokusace laseru do hladiny spékání (parameter focus level = 0 mm). Změna parametru focus level (FL=0 mm) a tím posunutí fokusace laseru do hladiny spékání vedla k velmi nepatrnému zvýšení meze pevnosti R_m o 1,2 % na 615 ± 3 MPa, mírnému poklesu tažnosti A o 1,2 % na 43 %, avšak při citelném zvýšení meze kluzu o 7,3 % na 511 ± 7 MPa (Obr. 9.1 modře). V případě sjednocení polohy hladiny fokusace laseru s hladinou spékání došlo k nárůstu vrubové houževnatosti o 48 % na 188 J/cm^2 . Teoreticky by se při této konfiguraci mělo koncentrovat více energie přímo v hladině spékání, což by se

mělo projevit širší natavenou zónou na úkor její hloubky a na úkor protavení předchozích vrstev [30].

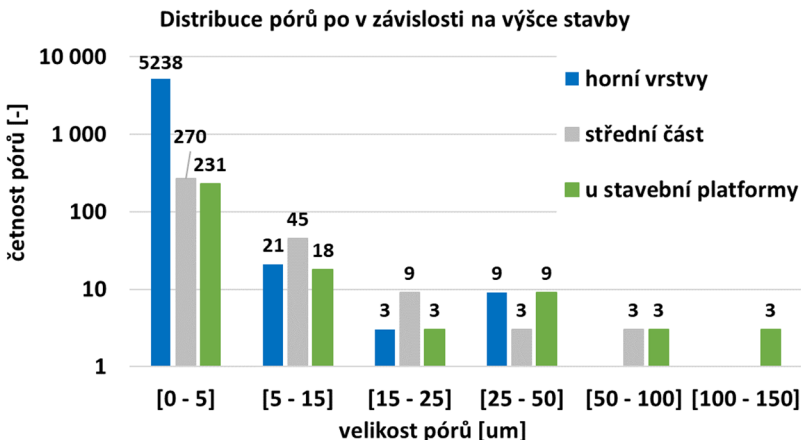


Obr. 9.1: Přehled výsledků zkoušky tahem – CL20ES [30]

Výzkum povrchu aditivně zhotovených vzorků byl zacílen na detekci nespečeného prášku na povrchu vzorků a na vyhodnocení poretivity v jádru a povrchové vrstvě.

O vlivu částečně natavených částic prášku na parametry drsnosti povrchu svědčí i výrazný odstup zjištěné střední hloubky drsnosti $R_z = 80$ až $100 \mu\text{m}$ a střední aritmetické úchylky profilu $R_a = 11$ až $14 \mu\text{m}$. Poměr mezi těmito dvěma parametry je v případě LBPF kovového tisku 7 až 8, což představuje prakticky dvojnásobné hodnoty ve srovnání s běžnými technologiemi obrábění [30].

Malé sférické póry ($0,005$ až $0,02 \text{ mm}$) se vyskytují rovnoměrně ve struktuře a jsou primárně důsledkem přítomnosti plynu v prášku, případně zavlečením do taveniny (meltpoolu). V návaznosti na postupnou degradaci nanašeče a vyšší pravděpodobnost výskytu vrstevných vad by se měla teoreticky úroveň poretivity s postupem stavby zvyšovat. V provedené analýze poretivity se tato hypotéza jednoznačně nepotvrdila (Obr. 9.2). Z analýzy míst v blízkosti stavební palety, středu vzorků a horní upínací části není patrný zhoršující se trend v žádné z kategorií. Navzdory těmto výsledkům byla prostým součtem plochy pórů opravdu zjištěna ve vrchních vrstvách stavby vyšší úroveň poretivity $0,103 \%$ oproti $0,036 \%$ ve středové části a $0,089 \%$ v blízkosti základny.



Obr. 9.2: Distribuce a klasifikace pórů v závislosti na výšce stavby [30]

10. Závěr

Disertační práce s názvem „Výzkum vybraných parametrů integrity povrchu při obrábění materiálů leteckého průmyslu“ se komplexně zabývá problematikou integrity povrchu u materiálů a technologií, které se uplatňují v pokročilých odvětvích jako je letectví, energetika, medicínský a zbrojní průmysl. Těžištěm práce jsou zbytková napětí v povrchu součástí a možnosti jejich zjišťování. Práce uceleně přináší nové poznatky o vlivu vybraných technologií na stav povrchové vrstvy, z nichž některé byly získány prostřednictvím vyvinuté mechanické metody měření hloubkových průběhů zbytkových napětí pomocí postupného elektrolytického rozpouštění vrstev. Práce je sestavena do vzájemně navazujících kapitol.

Rešerši současného stavu poznání se věnuje kapitola 2 *Integrita povrchu*, která popisuje jednotlivé složky integrity, možnosti jejich zjišťování, metody měření zbytkových napětí i obecně známé mechanismy a příčiny vzniku těchto napětí.

Na základě provedené rešerše bylo zjištěno, že vyvíjená mechanická metoda měření průběhů zbytkových napětí je jedinečnou koncepcí zařízení i zpracováním naměřených dat. V konfiguraci, která je předmětem kapitoly 4 *Vývoj metody měření zbytkových napětí*, nebyla dosud metoda publikována. Kapitola 4 detailně popisuje koncepci zařízení, potřebné

přípravky, elektrolytické rozpouštění, výpočtové vztahy a postup měření. Zvláštní pozornost byla věnována ověřovacím zkouškám metody a jejímu porovnání se zavedenou a standardizovanou metodou měření pomocí rentgenové difrakce. Z ověřovacích zkoušek jednoznačně vyplynula způsobilost a dobrá opakovatelnost vyvinuté metody. Zjištěné průběhy zbytkových napětí se shodují v rámci porovnávacích zkoušek ve smyslu zbytkového napětí i ve stanovení hloubek přechodu z oblasti tlakových do tahových zbytkových napětí. Neshoda byla naopak zjištěna ve stanovení absolutních hodnot napětí. Příčiny této neshody byly diskutovány v kapitole 4.9.4 *Dílčí závěry porovnání metod*. V následujících kapitolách byla vyvinutá metoda aplikována na specifické výzkumné úkoly.

Kapitola 6 *Integrita povrchu titanových slitin - Ti6Al4V* je věnována výzkumu zbytkových napětí, profilů mikrotvrdoti a mikrostruktury uvedené slitiny v povrchu po technologiích čelního frézování, dokončovacího 5D frézování, řízeného tryskání, vibračního kuličkování laserpeeningu a strojního leštění. Získané dílčí poznatky jsou zobecněny a použity k popisu příčin a mechanismů vzniku zbytkových napětí u této slitiny.

V kapitole 7 *Integrita povrchu po soustružení nerezových ocelí* byla v experimentu soustružení s pozitivní a negativní geometrií soustružnického nože prokázána silná tendence austenitických nerezových ocelí k deformačnímu zpevňování povrchové vrstvy. Ovlivnění povrchu bylo zjištěno, na rozdíl od slitiny Ti6Al4V, nejen prostřednictvím přítomnosti tahových zbytkových napětí v povrchu, ale i zvýšením mikrotvrdoti a zároveň tvorbou deformačního martenzitu.

Vliv nevhodných technologických podmínek broušení na integritu povrchu uvádí kapitola 8 *Integrita povrchu turbínových lopatek z Inconelu 713LC*. S využitím kapilárních defektoskopických metod byly po broušení zjištěny brusné trhliny. Příčinu vzniku trhlín při broušení dále podpořila analýza zbytkových napětí, jelikož v bezprostřední blízkosti povrchu byla zjištěna napětí přesahující mez pevnosti materiálu.

Výzkum integrity povrchu perspektivních materiálů v pokročilých průmyslových odvětvích je podpořen výzkumem vlastností aditivních materiálů v kapitole 9 *Integrita povrchu aditivně zpracované oceli AISI 316L*. Kromě vybraných parametrů povrchu kapitola uvádí výsledky výzkumu anisotropie základních mechanických vlastností tištěných materiálů, které jsou předmětem publikační činnosti z poslední doby [30].

11. Seznam použité literatury v tezi

- [2] NECKÁŘ, Ferdinand a Ivo KVASNIČKA. *Vybrané statě z úběru materiálu*. Vyd. 1. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1991, 88 s. ISBN 80-010-0696-4.
- [3] KAFKA, J. *Vznik zbytkových pnutí ve strojních součástech a metodika jejich měření*. Praha, 1982. Zpráva o výzkumu. ČVUT Fakulta Strojní.
- [4] BELLOWS, Guy a Dean TISCHLER. Introduction to surface integrity. *The Shot Peener magazine* [online]. 1970, **1970**(Pamphlet 1), 14 [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/1970007.pdf>
- [5] KAFKA, Jindřich. *Ověření vlivu některých technologických procesů na kvalitu povrchové vrstvy u slitin titanu*. Praha, 1988. Kandidátská práce. Fakulta Strojní ČVUT.
- [6] ULUTAN, Durul a Tugrul OZEL. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2011, **51**(3), 250-280 [cit. 2022-02-01]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2010.11.003.
- [7] SCHAJER, Gary S., ed. *Practical Residual Stress Measurement Methods* [online]. 1. Chichester, UK: John Wiley, 2013 [cit. 2022-02-01]. ISBN 9781118402832. Dostupné z: doi:10.1002/9781118402832.
- [8] ROSSINI, N.S., M. DASSISTI, K.Y. BENYOUNIS a A.G. OLABI. Methods of measuring residual stresses in components. *Materials & Design* [online]. 2012, **2012**(vol. 35), 572-588 [cit. 2022-02-01]. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2011.08.022.
- [9] YAKOVLEV, M. G., V. A. GORELOV, N. S. MERKULOVA a A. S. KUDROV. Study of the influence of residual stresses on the fatigue strength of samples made of titanium and nickel alloys. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* [online]. 2014, **43**(5), 389-392 [cit. 2022-02-01]. ISSN 1052-6188. Dostupné z: doi:10.3103/S1052618814050203.
- [10] LI, Yu-Jia, Fu-Zhen XUAN, Zheng-Dong WANG a Shan-Tung TU. Effects of Residual Stresses on the High Cycle Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V. *ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Conference: Volume 5* [online]. ASMEDC, 2010, 2010-01-01, **2010**(5), 397-401

- [cit. 2022-02-01]. ISBN 978-0-7918-4924-8. Dostupné z:
doi:10.1115/PVP2010-25364.
- [11] PAN, Xinlei, Xiang LI, Liucheng ZHOU, Xiaotai FENG, Sihai LUO a Weifeng HE. Effect of Residual Stress on S–N Curves and Fracture Morphology of Ti6Al4V Titanium Alloy after Laser Shock Peening without Protective Coating. *Materials* [online]. 2019, **12**(22), 3799 [cit. 2022-02-01]. ISSN 1996-1944. Dostupné z:
doi:10.3390/ma12223799.
- [12] LAZOGLU, I., D. ULUTAN, B.E. ALACA, S. ENGIN a B. KAFTANOGLU. An enhanced analytical model for residual stress prediction in machining. *CIRP Annals* [online]. 2008, **57**(1), 81-84 [cit. 2022-02-01]. ISSN 00078506. Dostupné z:
doi:10.1016/j.cirp.2008.03.060.
- [13] QI, Zhaoxu, Bin LI a Liangshan XIONG. Improved analytical model for residual stress prediction in orthogonal cutting. *Frontiers of Mechanical Engineering* [online]. 2014, **9**(3), 249-256 [cit. 2022-02-01]. ISSN 2095-0233. Dostupné z: doi:10.1007/s11465-014-0310-1.
- [14] TÖNISSEN, Stefan, Fritz KLOCKE, Björn FELDHAUS, Steffen BUCHHOLZ a Markus WEISS. Residual stress prediction in quick point grinding. *Production Engineering* [online]. 2012, **6**(3), 243-249 [cit. 2022-02-01]. ISSN 0944-6524. Dostupné z:
doi:10.1007/s11740-012-0382-x.
- [15] ULUTAN, D., B. ERDEM ALACA a I. LAZOGLU. Analytical modelling of residual stresses in machining. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2007, **183**(1), 77-87 [cit. 2022-02-01]. ISSN 09240136. Dostupné z:
doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.09.032.
- [16] LIANG, S.Y. a J.-C. SU. Residual Stress Modeling in Orthogonal Machining. *CIRP Annals* [online]. 2007, **56**(1), 65-68 [cit. 2022-02-01]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2007.05.018.
- [17] VÁCLAVÍK, J., BUNDA, Z., BOHDAN, P., WEINBERG, O. NDE for Safety / Defektoskopie 2012, 42nd International Conference , Oct 30 - Nov 1, 2012, Seč, Czech Republic. Aplikace vybraných metod pro měření zbytkových napětí. [Online] 2013. [cit. 2022-01-02.] Dostupné na World Wide Web:
http://www.ndt.net/article/defektoskopie2012/papers/271_p.pdf.
ISSN 1435-4934.

- [18] PITRMUC, Z.; BERÁNEK, L.; RÁZEK, V.; ŠIMOTA, J. Importance and Methods of Residual Stress Profile Measurement. *Manufacturing Technology*. 2016, 16(3), ISSN 1213-2489. DOI 10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/MT/16/3/590
- [19] MEJTA, Vladimír a BIELIK Josef. *Elektrochemické leštění titanu a titanových slitin*. Praha, 1990. Výzkumná zpráva. Vysoká škola chemicko-technologická.
- [20] BRAJER, J. MÁDL, J. PITRMUC, Z. ŠVÁBEK, R. ZEMAN, P. Application of laser shock processing. *Manufacturing Technology*. 2015, 15(3), 278-285. ISSN 1213-2489.
- [21] DREIER, Steven a Berend DENKENA. Determination of Residual Stresses in Plate Material by Layer Removal with Machine-integrated Measurement. *Procedia CIRP* [online]. 2014, 2014(24), 103-107 [cit. 2022-02-01]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2014.07.137.
- [22] GROVE, T., J. KÖHLER a B. DENKENA. Residual Stresses in Milled β -Annealed Ti6Al4V. *Procedia CIRP* [online]. 2014, 13(2), 320-326 [cit. 2022-02-01]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2014.04.054.
- [23] KÖHLER, J., T. GROVE, O. MAISS a B. DENKENA. Residual Stresses in Milled Titanium Parts. *Procedia CIRP* [online]. 2012, 2(1), 79-82 [cit. 2022-02-01]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2012.05.044.
- [24] ČAPEK, Jiří, Kamil KOLARÍK, Miroslav NESLUŠAN, et al., 2019. Surface Integrity after Turning a Duplex Stainless Steel with Respect to Tool Geometry. *Transactions of FAMENA* [online]. 42(4), 1-14 [cit. 2022-03-21]. ISSN 13331124. Dostupné z: doi:10.21278/TOF.42401
- [25] ČAPEK, J. et al. Residual Stress Determination of Duplex and Austenite Steels Machined using Different Tool, Geometry. *Materials Structure in Chemistry, Biology, Physics and Technology*. 2018, 25(2), 84-87. ISSN 1211-5894.
- [26] PITRMUC, Z., ČAPEK, J., KOLARÍK, K., BERÁNEK, L. a Urban, J. Tool Geometry Influence on Surface Integrity of Machined Austenite Stainless Steel. *Manufacturing Technology*, 2016, vol. 16, iss. 2, p. 425-431.
- [27] JONŠTA, P., Z. JONŠTA, J. SOJKA, L. ČÍŽEK a A. HERNAS, 2007. Nickel super alloy INCONEL 713LC:: Structural characteristics

- after heat treatment. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2007(22), 7-13. ISSN 1734-8412.
- [28] SAUNDERS, N., Z. GUO, A.P. MIODOWNIK a J-Ph. SCHILLÉ, 2005. Modeling the Material Properties and Behavior of Ni-based Superalloys. *Superalloys 718, 625, 706 and Derivatives* [online]. The Minerals, Metals & Materials Society, 2005, 2005(10), 571-580 [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: https://www.tms.org/superalloys/10.7449/2005/superalloys_2005_571_580.pdf
- [29] ČAPEK, J., KYNCL, J., KOLAŘÍK, K., BERÁNEK, L., PITRMUC, Z., MEDŘICKÝ, J. a PALA, Z. Grinding of Inconel 713 Superalloy for Gas Turbines. *Manufacturing Technology*, 2016, vol. 16, iss. 1, p. 38-45.
- [30] PITRMUC, Z.; ŠIMOTA, J.; BERÁNEK, L.; MIKEŠ, P.; ANDRONOV, V.; SOMMER, J.; HOLEŠOVSKÝ, F. Mechanical and Microstructural Anisotropy of Laser Powder Bed Fusion 316L Stainless Steel. *Materials* 2022, 15, 551. <https://doi.org/10.3390/ma15020551>

12. Seznam publikací autora

12.1. Publikace přímo související s disertační prací

- [1] PITRMUC, Z.; BERÁNEK, L.; RÁZEK, V.; ŠIMOTA, J. Importance and Methods of Residual Stress Profile Measurement. *Manufacturing Technology*. 2016, 16(3), ISSN 1213-2489. DOI 10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/MT/16/3/590
- [2] BRAJER, J. ŠVÁBEK, R. ROSTOHAR, D. DIVOKÝ, M. LUCIANETTI, A. MÁDL, J. PITRMUC, Z. New possibilities for efficient laser surface treatment by diode-pumped kW-class lasers. *The Journal of Engineering*. 2015, 3(1), ISSN 2051-3305. DOI 10.1049/joe.2015.0094
- [3] [BRAJER, J. MÁDL, J. PITRMUC, Z. ŠVÁBEK, R. ZEMAN, P. Application of laser shock processing. *Manufacturing Technology*. 2015, 15(3), 278-285. ISSN 1213-2489.
- [4] PITRMUC, Zdeněk, Vítězslav RÁZEK, Jan ŠIMOTA a Libor BERÁNEK, 2018. Ověření účinku technologie zpevnování na povrchovou vrstvu a zvýšení životnosti lopatek: Ověřená technologie TH01011405-V7. Praha.
- [5] PITRMUC, Zdeněk, Libor BERÁNEK, Zdeněk PALA a Jan URBAN, 2021. Technologie progresivního dokončování kritických dílů: Ověřená technologie TH03010089-V001. Praha.
- [6] PITRMUC, Zdeněk, Libor BERÁNEK, Jan URBAN a Jiří SOMMER, 2020. Technological forum 2020. In: KUDLÁČEK, Jan. Application of 3d printing for production of camouflage jig for technological tests of polishing aircraft engine components. Jaroměř: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, s. 147-150. ISBN 978-80-87583-32-6.
- [7] PITRMUC, Z., ČAPEK, J., KOLAŘÍK, K., BERÁNEK, L. a Urban, J. Tool Geometry Influence on Surface Integrity of Machined Austenite Stainless Steel. *Manufacturing Technology*, 2016, vol. 16, iss. 2, p. 425-431.
- [8] ČAPEK, Jiří, Kamil KOLAŘÍK, Miroslav NESLUŠAN, et al., 2019. Surface Integrity after Turning a Duplex Stainless Steel with Respect to Tool Geometry. *Transactions of FAMENA* [online]. 42(4), 1-14 [cit. 2022-03-21]. ISSN 13331124. Dostupné z: doi:10.21278/TOF.42401

- [9] ČAPEK, J. et al. Residual Stress Determination of Duplex and Austenite Steels Machined using Different Tool, Geometry. *Materials Structure in Chemistry, Biology, Physics and Technology*. 2018, 25(2), 84-87. ISSN 1211-5894.
- [10] ČAPEK, J., KYNCL, J., KOLAŘÍK, K., BERÁNEK, L., PITRMUC, Z., MEDŘICKÝ, J. a PALA, Z. Grinding of Inconel 713 Superalloy for Gas Turbines. *Manufacturing Technology*, 2016, vol. 16, iss. 1, p. 38-45.
- [11] PITRMUC, Z.; ŠIMOTA, J.; BERÁNEK, L.; MIKEŠ, P.; ANDRONOV, V.; SOMMER, J.; HOLEŠOVSKÝ, F. Mechanical and Microstructural Anisotropy of Laser Powder Bed Fusion 316L Stainless Steel. *Materials* 2022, 15, 551.
<https://doi.org/10.3390/ma15020551>

12.2. Ostatní publikace a tvůrčí činnost autora

12.2.1 Články

- [12] BARTOŠÁK, M.; PITRMUC, Z.; HORVÁTH, J.; HORVÁTHOVÁ, M.; Life assessment of a low-alloy martensitic steel under isothermal low-cycle fatigue-creep and thermo-mechanical fatigue-creep loading conditions. *International Journal of Fatigue*. 2021, 145. ISSN 0142-1123. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2020.106092
- [13] KELLNER, T.; KYNCL, J.; PITRMUC, Z.; BERÁNEK, L.; KAŇÁK. Production process planning in Additive manufacturing and Conventional machining technology manufacturing system. *Manufacturing Technology*. 2019, 19.(2.), 232-237. ISSN 1213-2489. DOI 10.21062/ujep/275.2019/a/1213-2489/mt/19/2/232
- [14] MIKEŠ, P.; BERÁNEK, L.; PITRMUC, Z. Analysis of material removal on radial compressor wheel of aircraft engine after finishing production operations using CMM. *MM Science Journal*. 2018, 4_2018(4), 2521-2525. ISSN 1805-0476. DOI 10.17973/MMSJ.2018_11_201818
- [15] BERÁNEK, L.; PITRMUC, Z.; ŠIMOTA, J. FOD experimental simulation and analysis of potential benefits of modified blisk geometry. *Manufacturing Technology: Journal for Science, Research and Production*. 2017, 17(3), 287-291. ISSN 1213-2489. DOI 10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/3/287

- [16] ANDRONOV, V.; PITRMUC, Z.; PELIKÁN, L.; BERÁNEK, L.; ŠIMOTA, J. Verification of the accuracy of metallic 3d printing on a benchmark artifact made of alsi10mg powder. In: *TECHNOLOGICAL FORUM 2020*. Jaroměř, 2020-11-25. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020. s. 14-20. ISBN 978-80-87583-32-6.
- [17] PELIKÁN, L.; ANDRONOV, V.; PITRMUC, Z.; BERÁNEK, L.; ŠIMOTA, J. Evaluation of dimensional and surface quality of a part produced by the dmils method after machining. In: *TECHNOLOGICAL FORUM 2020*. Jaroměř, 2020-11-25. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020. s. 113-120. ISBN 978-80-87583-32-6.
- [18] URBAN, J.; PITRMUC, Z.; BERÁNEK, L.; SOMMER, J. Application of 3d printing for production of camouflage jig for technological tests of polishing aircraft engine components. In: *TECHNOLOGICAL FORUM 2020*. Jaroměř, 2020-11-25. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020. s. 147-150. ISBN 978-80-87583-32-6.
- [19] PELIKÁN, L.; ANDRONOV, V.; PITRMUC, Z.; BERÁNEK, L.; ŠIMOTA, J. Precision and dimensional limits analysis of aluminium alloy artifacts produced on DMLS machine Concept laser M2 cusing. In: *TECHNOLOGICAL FORUM 2019*. Veselý Kopec, 2019-06-18/2019-06-20. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2019. s. 109-115. ISBN 978-80-87583-30-2.

12.2.2 Statě ve sborníku

- [20] ANDRONOV, V.; PITRMUC, Z.; PELIKÁN, L.; BERÁNEK, L.; URBAN, J. Comparison of mechanical properties of precipitation hardening tool steel 1.2709 -printed x conventionally produced. In: *TECHNOLOGICAL FORUM 2019*. Veselý Kopec, 2019-06-18/2019-06-20. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2019. s. 1-7. ISBN 978-80-87583-30-2.
- [21] ŠIMOTA, J.; PITRMUC, Z.; ŠTAJNOCHR, L.; BERÁNEK, L. Creep feed grinding optimization. In: *TECHNOLOGICAL FORUM 2019*. Veselý Kopec, 2019-06-18/2019-06-20. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2019. s. 138-142. ISBN 978-80-87583-30-2.
- [22] ŠIMOTA, J.; PITRMUC, Z.; URBAN, J.; HOLEŠOVSKÝ, F. Utilization of new modified materials in creep-feed grinding. In: *Konference studentské tvůrčí činnosti. Studentská tvůrčí činnost 2018*, Praha, 2018-04-11. ČVUT v Praze, fakulta strojní, 2018. ISBN 978-80-01-06421-4.

- [23] ŠIMOTA, J.; PITRMUC, Z.; URBAN, J.; KOPTIŠ, M. Evaluation of mechanical properties manufactured parts by DMLS technology. In: Technological forum 2017 Book of proceedings. Technological forum 2017, Špindlerův mlýn, 2017-06-27/2017-06-29. Jaroměř: Kudláček Jan, Ing., 2017. s. 127-132. ISBN 978-80-87583-22-7.
- [24] ČAPEK, J.; KOLŘÍK, K.; PITRMUC, Z.; BERÁNEK, L.; GANEV, N. Comparison of Parameters of Surface Integrity of Machined Duplex and Austenite Stainless Steels in Relation to Tool Geometry. In: Acta Polytechnica CTU Proceedings. *Šestá studentská vědecká konference fyziky pevných látek, Sedliště*, 2016-06-27/2016-07-01. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2017. s. 1-7. 9. ISSN 2336-5382. ISBN 978-80-01-06298-2. DOI 0.14311/APP.2017.9.0001
- [25] ČAPEK, J. et al. Grain orientation influence on residual stress distribution of ground surface of blade roots made of inconel 713LC. In: TREBUŇA, F et al., eds. *55th Conference on Experimental Stress Analysis 2017.*, Nový Smokovec, 2017-05-30/2017-06-01. Košice: Technical University of Kosice, 2017. s. 115-121. ISBN 978-80-553-3167-6.
- [26] ŠIMOTA, J.; PITRMUC, Z.; URBAN, J.; BERÁNEK, L. Anisotropy of parts produced using DMLS technology. In: MORAVEC, J., ed. *Studentská tvůrčí činnost 2017*. Praha, 2017-04-20. Praha: ČVUT v Praze - Fakulta strojní, 2017. ISBN 978-80-01-06143-5. Dostupné z: http://stc.fs.cvut.cz/proc_d3.html
- [27] PITRMUC, Z.; ŠIMOTA, J.; URBAN, J.; BERÁNEK, L. Influence of process parameters and part orientation on mechanical properties for DMLS manufactured Stainless steel AISI 316L. In: MORAVEC, J., ed. *Studentská tvůrčí činnost 2017*. Praha, 2017-04-20. Praha: ČVUT v Praze - Fakulta strojní, 2017. ISBN 978-80-01-06143-5. Dostupné z: http://stc.fs.cvut.cz/proc_d3.html
- [28] PITRMUC, Z.; SAVINOV, A.; ŠIMOTA, J.; BERÁNEK, L.; RÁZEK, V. Investigation on residual stress profiles and microhardness on Ti6Al4V alloy. In: KUDLÁČEK, J. et al., eds. *Technological forum 2017 Book of proceedings*. Technological forum 2017, Špindlerův mlýn, 2017-06-27/2017-06-29. Jaroměř: Kudláček Jan, Ing., 2017. s. 106-110. ISBN 978-80-87583-22-7.
- [29] ČAPEK, J.; KOLAŘÍK, K.; BERÁNEK, L.; GANEV, N. Tool Geometry Influence on Residual Stresses of Machined Duplex and

Austenite Stainless Steel. In: DRAGOUNOVÁ, K. et al., eds. Sborník příspěvků 6. studentské vědecké konference fyziky pevných látek, Sedliště 2016. *Šestá studentská vědecká konference fyziky pevných látek, Sedliště*, 2016-06-27/2016-07-01. Praha: ČVUT. Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2016. s. 52-55. ISBN 978-80-01-06072-8.

- [30] ČAPEK, J. et al. Influence of Cutting Conditions on Surface Integrity after Progressive Grinding of Blade Roots from Inconel 713LC. In: *Experimental Stress Analysis 2016*. 54. konference Experimentální Analýza Napětí, Srní, 2016-05-30/2016-06-02. Plzeň: Západočeská universita, Fakulta aplikovaných věd, 2016. ISBN 978-80-261-0624-1. Dostupné z: <https://www.scopus.com>
- [31] PITRMUC, Z. a M. VRABEC. Experimental methods of residual stress profile measurement. In: MORAVEC, J., ed. *Studentská tvůrčí činnost 2016. Konference studentské tvůrčí činnosti 2016*, Praha, 2016-04-19. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016. ISBN 978-80-01-05929-6. Dostupné z: http://stc.fs.cvut.cz/history/2016/sbornik/papers/pdf/6540.pdf?_=1460487178

12.2.3 Ověřené technologie a užité vzory

- [32] PITRMUC, Z. et al. REPAIR INTRO TO H80 COMPRESSOR AIRFOILS. [Ověřená technologie] 2017.
- [33] PITRMUC, Z.; ŠIMOTA, J.; BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; VYSKOČIL, Z. Silové broušení tvarových ploch superslitin. [Ověřená technologie] 2016.
- [34] BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; PITRMUC, Z.; ŠIMOTA, J.; VYSKOČIL, Z. Přípravek pro upínání lopatek pro letecký a energetický průmysl na rovinné brusky. Czech Republic. Utility Model CZ 30673. 2017-05-15.

12.2.4 Výzkumné zprávy evidované v databázi V3S

- [35] PITRMUC, Z., V. RÁZEK a P. NOVÁK. Zpráva o měření zbytkových napětí 2020. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2020.
- [36] PITRMUC, Z. et al. Zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích projektu FV40133 za rok 2020. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2020.

- [37] PITRMUC, Z., J. SOMMER a M. SLANÝ. Optimalizace výroby nerezových trubiček v roce 2020. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2020.
- [38] PITRMUC, Z. et al. Závěrečná zpráva o dosažených výsledcích projektu TH03010089. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2020.
- [39] PITRMUC, Z. et al. Zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích projektu TH03010089 za rok 2019. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2019.
- [40] PITRMUC, Z. et al. Zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích projektu FV40133 za rok 2019. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2019.
- [41] PITRMUC, Z., V. RÁZEK a P. NOVÁK. Zpráva o měření zbytkových napětí 2019. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2019.
- [42] PITRMUC, Z., J. SOMMER a M. SLANÝ. Optimalizace laserového svařování nerezových ocelí v roce 2019. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2019.
- [43] PITRMUC, Z. et al. Odborná zpráva o průběhu projektu za rok 2018. [Výzkumná zpráva] 2018.
- [44] PITRMUC, Z. et al. Zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2018. [Výzkumná zpráva] 2018.
- [45] PITRMUC, Z. et al. Zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích projektu TH03010089 za rok 2018. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2018.
- [46] PITRMUC, Z. et al. Odborná zpráva o průběhu projektu za rok 2017. [Výzkumná zpráva] 2017.
- [47] PITRMUC, Z., V. RÁZEK a P. NOVÁK. Zpráva o měření zbytkových napětí 2017. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2017.
- [48] PITRMUC, Z. Optimalizace laserového svařování nerezových ocelí. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2017.
- [49] PITRMUC, Z. et al. Zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2017. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav

- technologie obrábění, projektování a metrologie, 2017. Zpráva č. TH01011405-PZ-2017.
- [50] BERÁNEK, L. et al. Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2017. [Výzkumná zpráva] Velká Bíteš: PBS Velká Bíteš, 2017.
- [51] PITRMUC, Z., V. RÁZEK a P. NOVÁK. Zpráva o měření zbytkových napětí 2018. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2017.
- [52] PITRMUC, Z. Optimalizace laserového svařování nerezových ocelí v roce 2018. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2017.
- [53] KYNCL, J. et al. Odborná zpráva o průběhu projektu za rok 2016. [Výzkumná zpráva] 2016.
- [54] PITRMUC, Z. a A. SAVINOV. Optimalizace laserového svařování nerezových ocelí. [Výzkumná zpráva] Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje, 2016.
- [55] PITRMUC, Z., V. RÁZEK a P. NOVÁK. Zpráva o měření zbytkových napětí 2016. [Výzkumná zpráva] GE Aviation, 2016.
- [56] RÁZEK, V., J. KAFKA a Z. PITRMUC. Zpráva o měření zbytkových napětí 2015. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2015.
- [57] PITRMUC, Z. et al. Zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2015. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2015.
- [58] PITRMUC, Z. et al. Zařízení pro vysokocyklové únavové zkoušky lopatek a Metodika testování lopatek blisku 1. stupně. [Výzkumná zpráva] Praha: GE Aviation Czech, 2015.
- [59] PITRMUC, Z. Výzkumná zpráva o možnostech odstranění HVOF nástříků prostřednictvím elektrolytického rozpouštění. [Výzkumná zpráva] 2015.
- [60] RÁZEK, V., J. KAFKA a Z. PITRMUC. Zpráva o měření zbytkových napětí 2014. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2014.
- [61] BARCAL, J. et al. Analytické činnosti v oblasti integrity povrchu a měření zbytkových napětí. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2014.

