



KVALITA POVRCHOVÉ VRSTVY: VÝZKUM VYBRANÝCH PARAMETRŮ INTEGRITY POVRCHU PŘI OBRÁBĚNÍ MATERIÁLŮ LETECKÉHO PRŮMYSLU

Doktorský program:
Studijní obor:
Ústav:
Akademický rok:
Školitel:
Školitel specialista:

Strojní Inženýrství
Strojírenská technologie
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
2021/2022
prof. Ing. František Holešovský
Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

Klíčová slova:

- Zbytková napětí
- Mikrotvrdość
- Integrita povrchu
- Titanové slitiny
- Inconel
- Zpevňovací technologie
- Shotpeening
- Elektrolytické rozpouštění

Disertační práce 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 mikrotvrdości povrchu a vazby mezi jednotlivými složkami integrity povrchu jsou pro jednotlivé zkoumané materiály zobrazeny.

Cíle

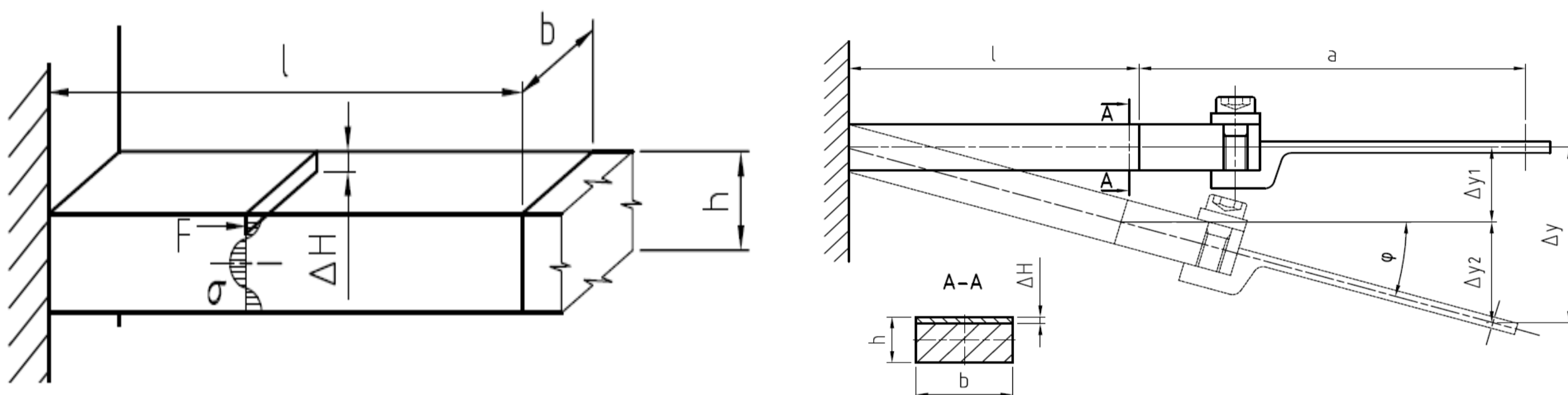
Cílem disertační práce je systematické určení vlastností integrity povrchu v závislosti na použité technologii u perspektivních technických materiálů využitelných v pokročilých technických oborech jako je letectví, energetika, medicínský a zbrojní průmysl.

Díličí cíle potřebné pro splnění hlavního cíle:

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

Metoda měření zbytkových napětí

Vyvinutá metoda pracuje na základě kontinuálního snímání uvolněné deformace během elektrolytického rozpouštění vymezené plochy měřeného vzorku. Vzorek představuje vetknutý nosník.



Pro jednotlivé složky měřené deformace lze zavést vztahy:

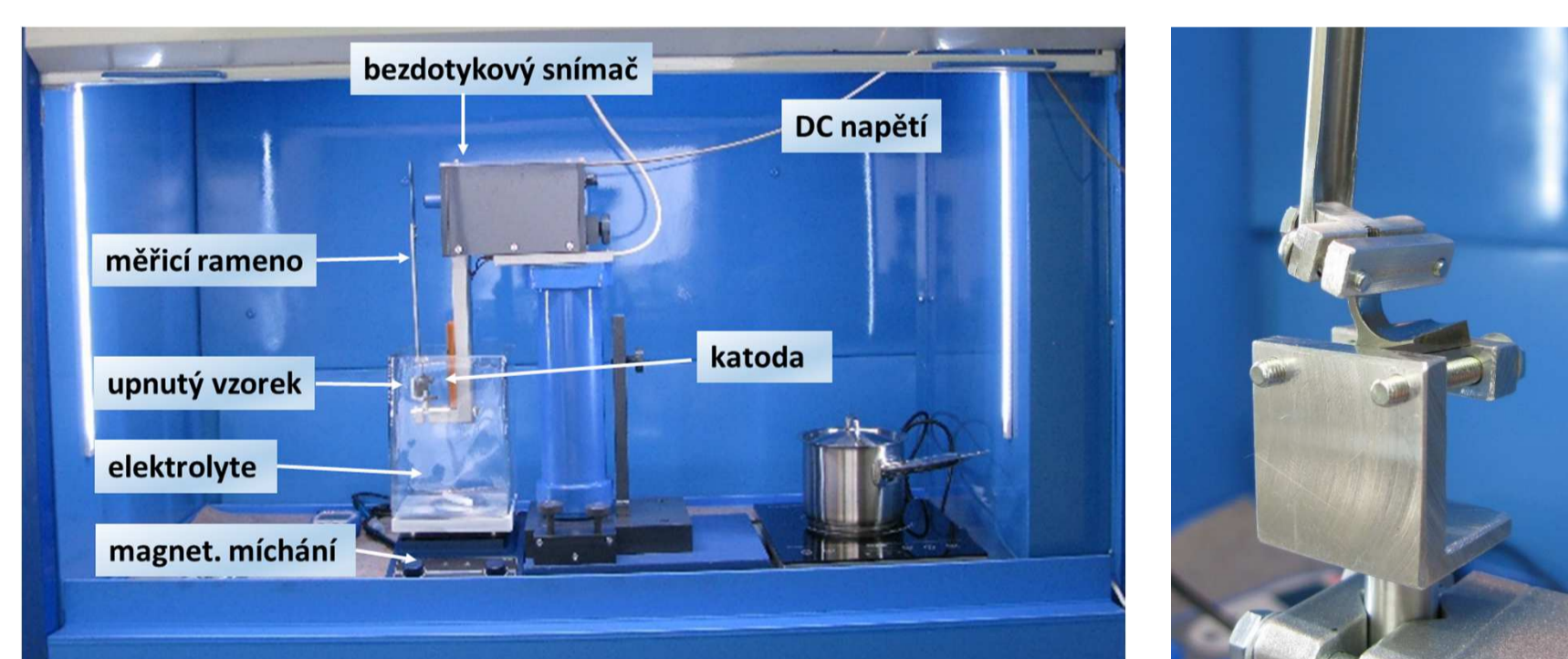
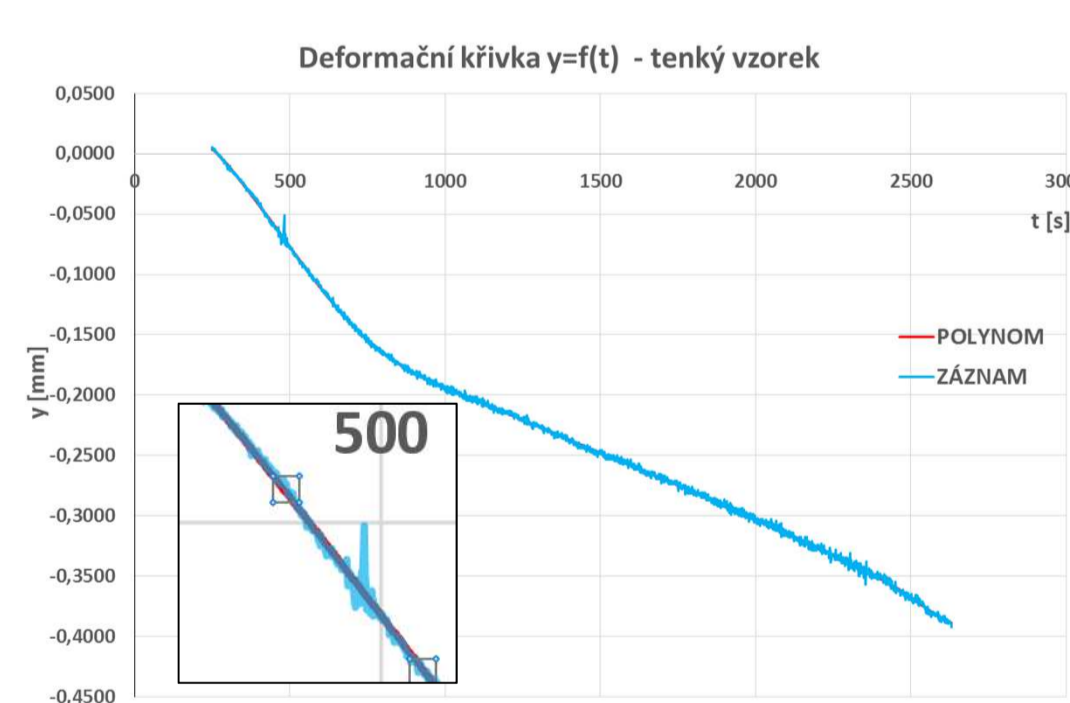
$$\Delta y_1 = \frac{1}{E \cdot I} \int_0^l M_o \cdot x \cdot dx = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \frac{M_o \cdot l^2}{2}$$

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

Úpravou lze vyjádřit vztah pro napětí σ a skutečné napětí v n-té vrstvě σ_n :

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

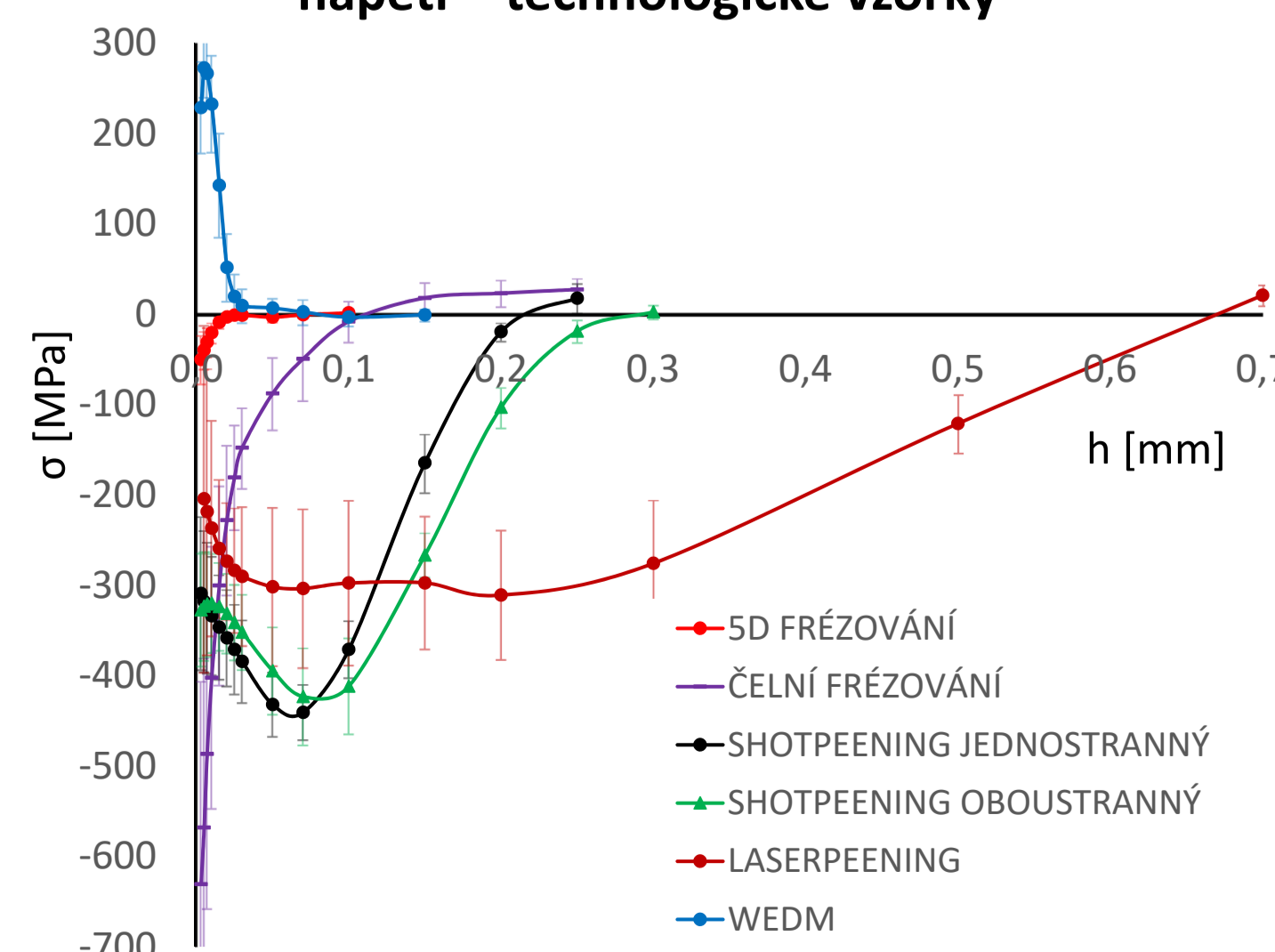
$$\sigma_n = \sigma_{vn} - \sum_1^n \sigma_{v(n-1)} \cdot \frac{4 \cdot \Delta H_n}{h_n}$$



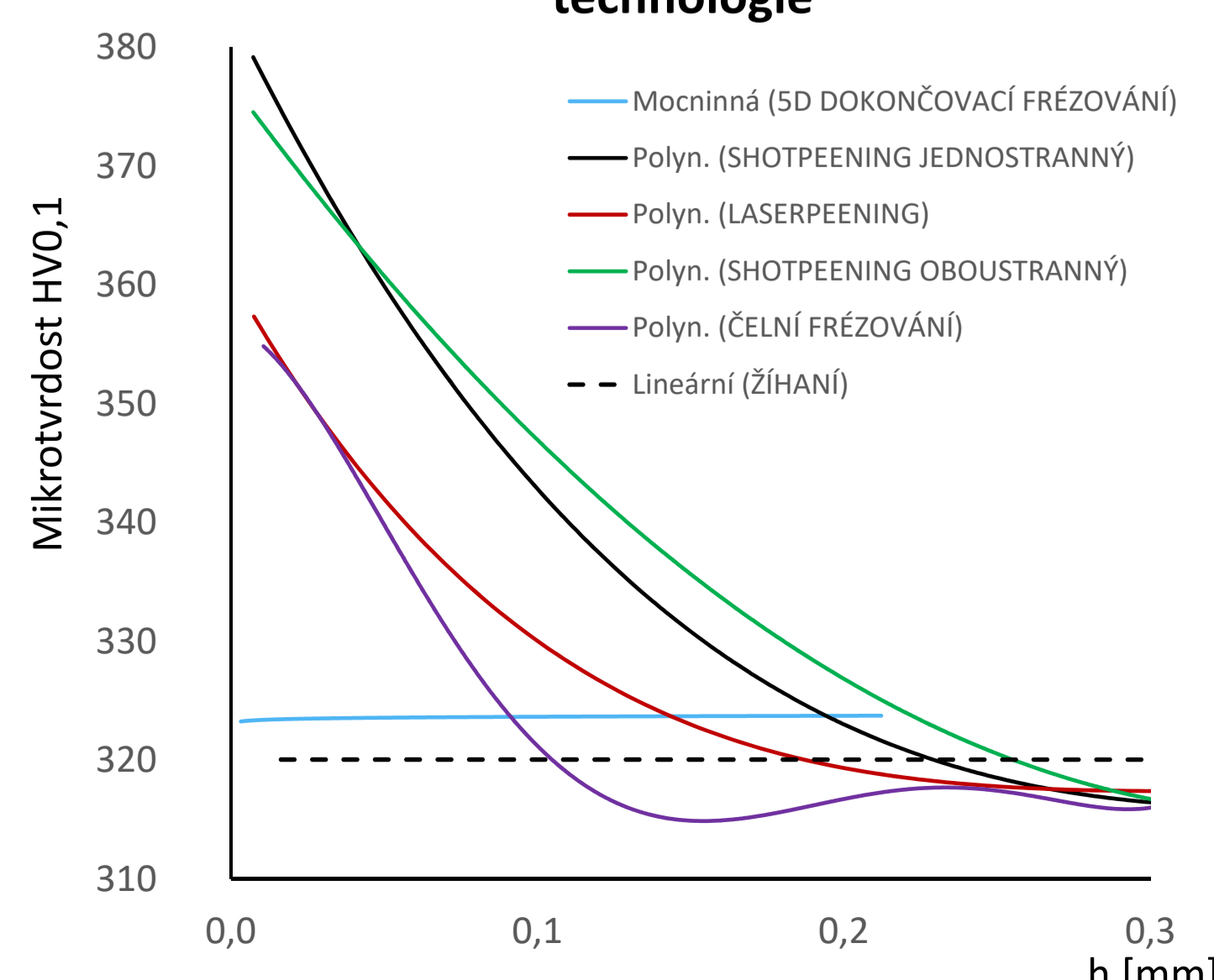
Integrita povrchu titanových slitin – Ti6Al4V

Výzkum jednotlivých složek integrity povrchu byl proveden pro technologie: čelní frézování, 5D dokončovací frézování, shotpeening, laser shock peening, drátové řezání WEDM, vibrační kuličkování, SPM leštění a jejich kombinace potenciálně využitelné pro dynamicky namáhané součásti v leteckém průmyslu.

Charakteristické průběhy zbytkových napětí - technologické vzorky

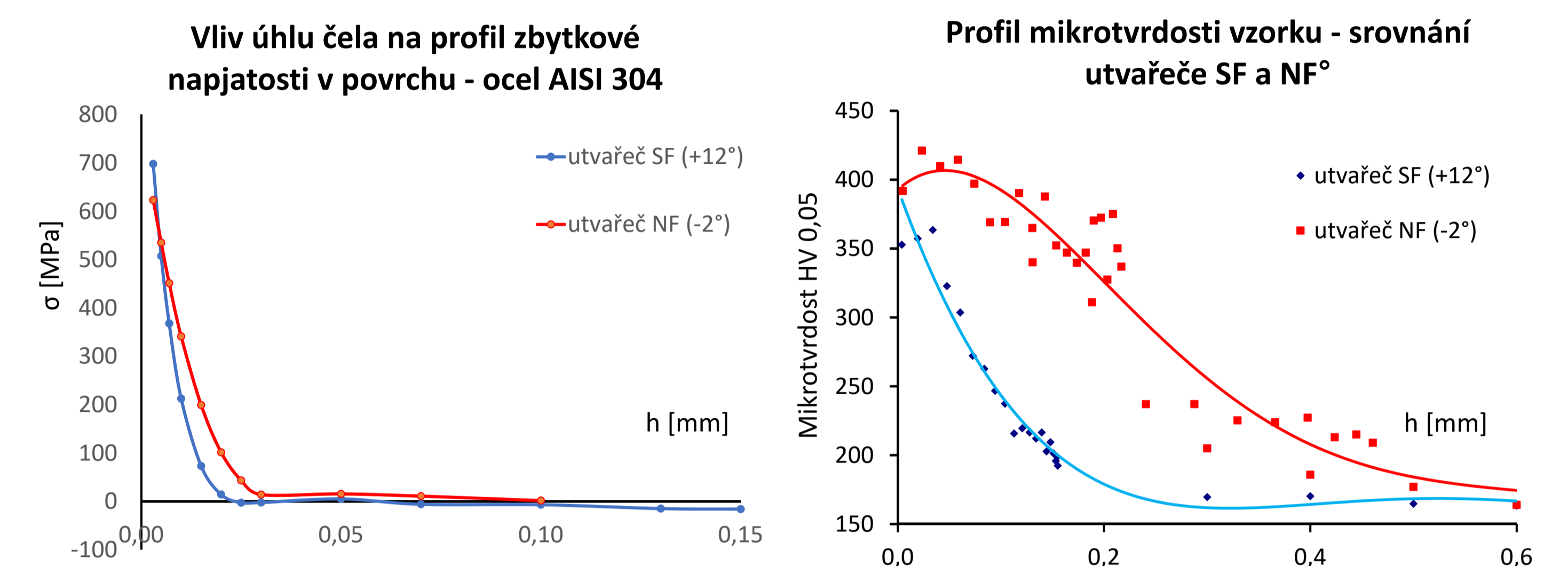


Průběhy mikrotvrdości HV 0,1 pro vybrané technologie



Integrita povrchu po soustružení nerezových ocelí

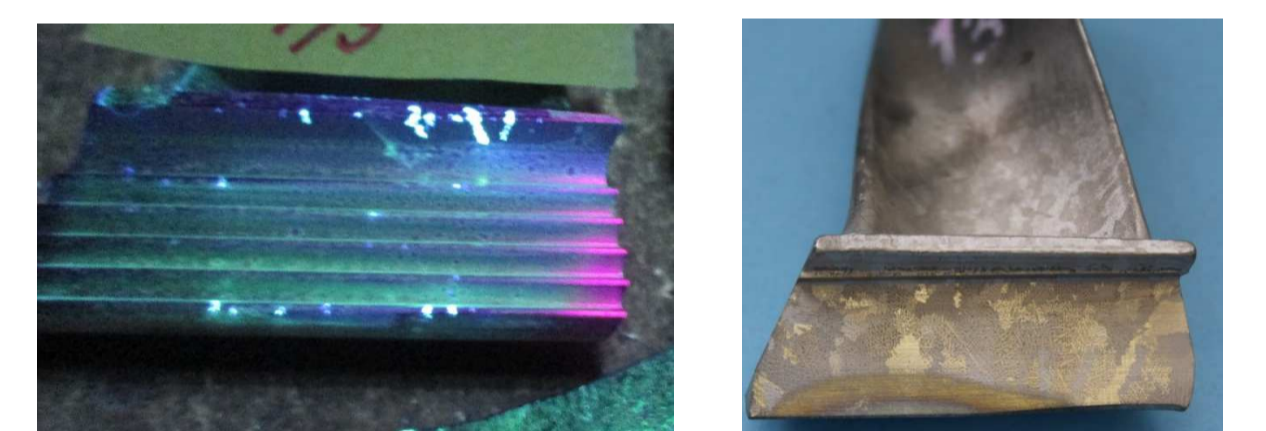
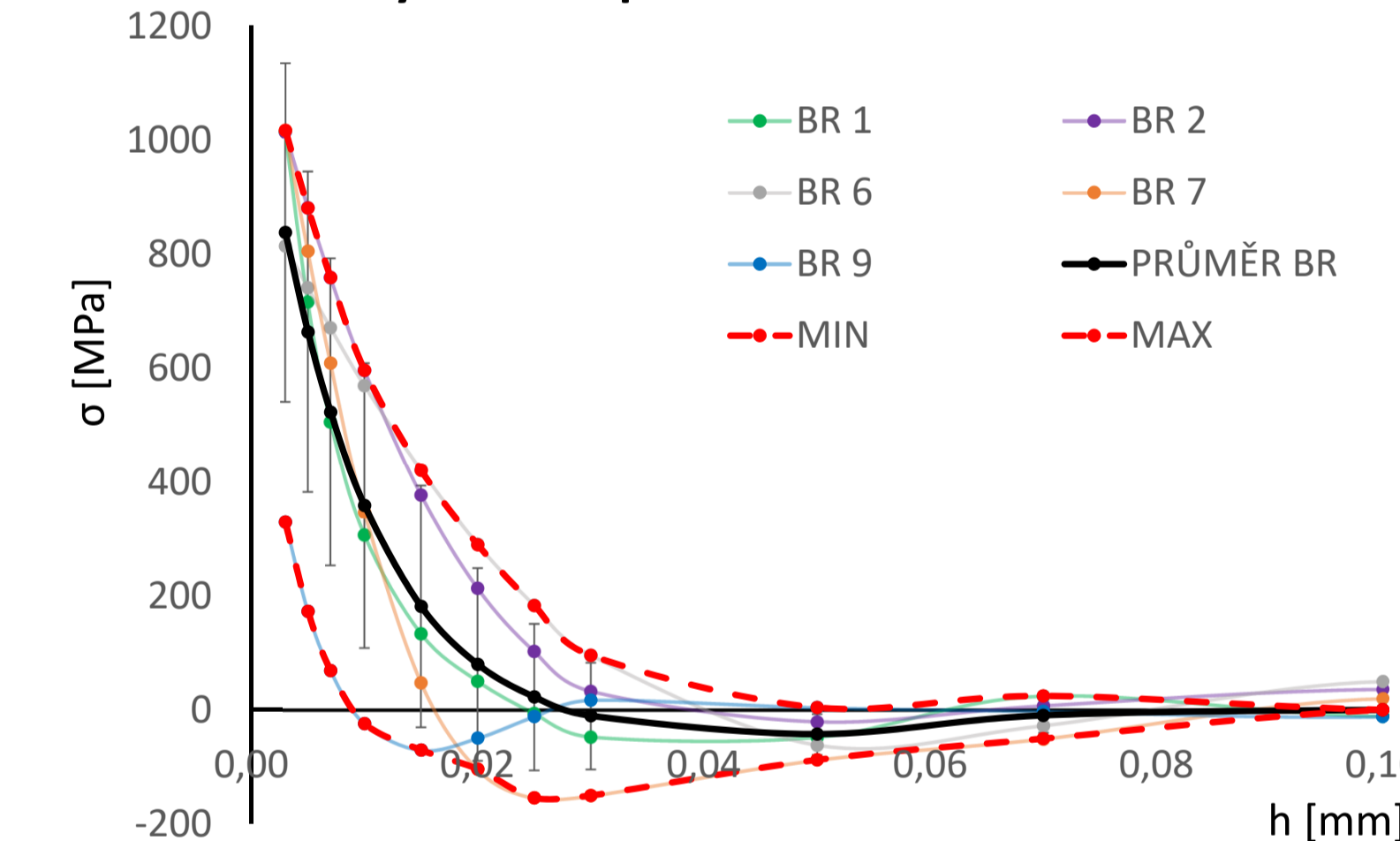
Předmětem výzkumu byly povrchy po soustružení destičkami s různými úhly čela γ_o utvařeče SF (pozitivní +12°) a NF (negativní -2°).



Integrita povrchu po broušení lopatek z Inconelu 713 LC

Hloubkové broušení představuje pro výrobu závěsů lopatek z niklových superslitin nejproduktivnější a nejekonomičtější způsob výroby. Vlastnosti slitiny a vysoké silové i tepelné zatížení obrobku vyvozuje v povrchu nežádoucí vysoké tahové zbytkové napětí.

Zbytková napětí - hloubkové broušení



Závěry

- Byla vyvinuta a optimalizována mechanická metoda měření hloubkových průběhů zbytkových napětí a byla zhodnocena její spolehlivost.
- Výsledky vyvinuté metody se shodují se standardizovanou metodou rentgenové difrakce ve smyslu, ve stanovení hloubek přechodu z oblasti tlakových do tahových zbytkových napětí. Neshoda byla naopak zjištěna ve stanovení absolutních hodnot napětí.
- Na základě experimentálního měření slitiny Ti6Al4V po různých technologiích dokončení byly charakterizovány typické stavy povrchu složek integrity povrchu pro tyto technologie
- U slitiny Ti6Al4V byla zjištěna minimální tendence k nárůstu mikrotvrdości napříč technologiemi a navzdory převládajícímu mechanismu zpevnění plastickou deformací.
- Po soustružení austenitické nerezové oceli AISI 304 dochází k výraznému nárůstu mikrotvrdości povrchu (až 430 HV0,1), tvorbě deformačního martenzitu a vzniku tahových zbytkových napětí.
- Slitina Inconel 713LC se vyznačuje výraznou strukturální stabilitou povrchové vrstvy. Po hloubkovém broušení byla zjištěna tahová zbytková napětí v povrchu bez dalších doprovodných projevů ve struktuře a profilu mikrotvrdości.

Publikace autora

Cílem disertační práce je systematické určení vlastností integrity povrchu v závislosti na použité technologii u perspektivních technických materiálů využitelných v pokročilých technických

- 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
- 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.
- 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*, Špindlerův mlýn, 2017-06-27/2017-06-29. Jaroměř: Kudláček Jan, Ing., 2017. s. 106-110. ISBN 978-80-87583-22-7.
- 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>