

E xperimentální 2007

A nalýza 2007

N apětí

LASER DRILLING UTILIZATION FOR THE HOLE-DRILLING RESIDUAL STRESS MEASUREMENT METHOD

VYUŽITÍ LASEROVÉHO ODVRTÁVÁNÍ PRO MĚŘENÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ ODVRTÁVACÍ METODOU

Michal Švantner¹, Ondřej Soukup², Jiří Tesař³, Stanislav Němeček⁴, Tomáš Baroch⁵

Abstract: The hole drilling method is one of the most widely used method of residual stress measurement. Residual stress is evaluated based on measurement (generally by resistance strain gauges) of strain that relieves due to drilling a small hole in a measured material surface. High-speed drilling is the most acceptable drilling technique, which does not cause additional residual stresses generation. Special face-mills driven by an air turbine of speed up to 300 000 rpm are used for the drilling. This technology is suitable for many common materials, for example for steels. However, its application to very hard materials causes rapid mill wear, the hole shape does not agree with the theoretical requirements and the method is not applicable in some cases at all. Hence alternative methods of the hole drilling are developed, for example electro-discharge or abrasive-jet machining. Using of high-efficiency pulsed lasers for the hole drilling is analyzed in this contribution. Possibility of producing of the hole of required shape and dimensions is verified. The drilling thermal influence on the measured sample is determined by means of IR thermography and structural analysis. The residual stress measurement is carried out using laser drilling and strain gauge rosettes. The results are compared with the standard high-speed drilling.

Keywords: residual stress, hole-drilling method, laser drilling

1. Úvod

Zbytkové napětí [1] je charakterizováno jako napětí, které se vyskytuje v materiálu bez vnějšího zatížení. Vzniká v důsledku technologického postupu výroby a zpracování materiálu a ovlivňuje jeho pevnostní, únavové ale i korozní charakteristiky. Vzhledem k významu zbytkových napětí a zvyšujícím se požadavkům na jejich stanovení v moderních technologiích jsou proto zdokonalovány původní a rozvíjeny nové metody jejich měření.

Jednou z nejčastěji používaných metod měření zbytkového napětí je odvrtávací metoda [2]. Tato metoda je založena na vytvoření malého otvoru v povrchu materiálu, které způsobí uvolnění zbytkových napětí provázené deformací v okolí odvrtaného otvoru. Uvolněná deformace je měřena a na jejím základě je vyhodnoceno původní zbytkové napětí v materiálu. Odvrtávací metodou lze měřit makroskopické zbytkové napětí v rovině povrchu materiálu. Prostorové rozlišení metody je cca. 50 mm², lze vyhodnotit profil napětí do hloubky materiálu

¹ Ing. Michal Švantner, Ph.D., ZČU, NTC, Termomechanika technologických procesů, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, tel.: +420 377421088, e-mail: msvantne@ntc.zcu.cz

² Ondřej Soukup, ZČU, FAV, Katedra fyziky, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, e-mail: osoukup@seznam.cz

³ Ing. Jiří Tesař, ZČU, NTC, Termomechanika technologických procesů, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, tel.: +420 377421088, e-mail: tesar@ntc.zcu.cz

⁴ Ing. Stanislav Němeček, Ph.D., Matex PM, s.r.o., Teslova 7, 301 00 Plzeň, tel.: +420 374802082, e-mail: nemecek@matexpm.com

⁵ Tomáš Baroch, Matex PM, s.r.o., Teslova 7, 301 00 Plzeň, tel.: +420 374802082, e-mail: tbaroch@post.cz

až do přibližně 0.5 mm od povrchu (v závislosti na poloměru otvoru). Metoda je omezena především způsobem měření deformací a technologií odvrtání otvoru.

Uvolněná deformace je ve většině případů měřena odporovými tenzometry, vyvíjeny jsou metody bezkontaktního měření deformací [3, 4]. Odvrtání otvoru má být provedeno tak, aby nedocházelo ke vzniku dalších napětí vlivem procesu odvrtávání a aby měl otvor daný tvar a hloubku. Jako nejvhodnější se jeví z hlediska splnění těchto požadavků zejména použití vysokorychlostního odvrtávání (HSC - high speed cutting) pomocí wolfram-karbidových čelních fréz poháněných vzduchovou turbínkou. Touto technologií je u běžných materiálů (např. oceli) dosaženo dostačující kvality otvoru a je splněna podmínka minimálního ovlivnění okolního materiálu vlivem odvrtávání. Použití této metody je ovšem velmi problematické např. u tvrdých otěruvzdorných materiálů, kdy je nutné použít diamantové "odbrušovací" frézy. V takovém případě dochází vedle úběru měřeného materiálu také ke změně tvaru nástroje, je obtížné stanovení skutečné hloubky otvoru, tvar otvoru neodpovídá teoretickým předpokladům a v některých případech odvrtání vůbec nelze provést.

Z těchto důvodů jsou hledány alternativní metody odvrtání otvoru, ke kterým patří např. abrazivní otryskávání [5] nebo elektro-jiskrové odvrtávání [6]. Jednou z možností, jak nahradit standardní odvrtávací techniky, je také použití vysoce výkonných pulzních laserů [7]. Tyto lasery soustřeďují velmi vysoký energetický výkon (stovky MW/cm²) do velmi krátkého pulzu (jednotky mikrosekund a méně). Při interakci s materiálem může docházet k přímému odpaření materiálu bez významného tepelného ovlivnění jeho okolí. Tento proces se nazývá studená ablace a umožňuje velmi přesné odvrtání otvoru požadovaného tvaru a hloubky i do materiálů, u kterých by použití standardních mechanických metod bylo velmi komplikované.

2. Experiment

V práci jsou analyzovány možnosti využití laserového odvrtávání pro odvrtávací metodu měření zbytkových napětí. Pozornost se přitom soustřeďuje především na měření tvrdých otěruvzdorných materiálů, kde se vyskytují problémy při použití standardních metod odvrtávání (odvrtávání pomocí vysokorychlostní vzduchové turbíny). Měření a analýzy jsou proto provedeny pro vzorek povlaku cermetu Cr₃C₂-NiCr o tloušťce cca 0.5 mm vytvořeného technologií vysokorychlostního žárového nástřiku.

Pro laserové odvrtávání je použit pulzní pevnolátkový Nd:YAG laser Lintech BLS-100. Výkon laseru je 100 W (maximální výstupní výkon v kontinuálním režimu), vlnová délka je 1064 nm a délka pulzu 5 μs. Šířka laserového svazku je 0.01 mm - otvor o poloměru cca. 1 mm je tedy vytvořen postupným skenováním. Frekvence pulzů je 12 kHz, rychlost pojezdu 100 mm/s. Výsledky laserového odvrtávání jsou porovnány se standardním postupem měření zbytkových napětí. Pro standardní měření zbytkových napětí je použito zařízení SINT MTS3000 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik, které umožňuje přesné odvrtání otvoru pomocí vysokorychlostní vzduchové turbíny (až 300 ot./min), a diamantová fréza. Odvrtávání je v obou případech prováděno postupně po krocích 20-50 μm. Uvolněné deformace jsou měřeny standardními tenzometrickými ASTM růžicemi HBM 1.5/120RY61S se třemi měřicími elementy.

Porovnání vysokorychlostního a laserového odvrtávání pro měření zbytkových napětí zahrnuje analýzy a měření:

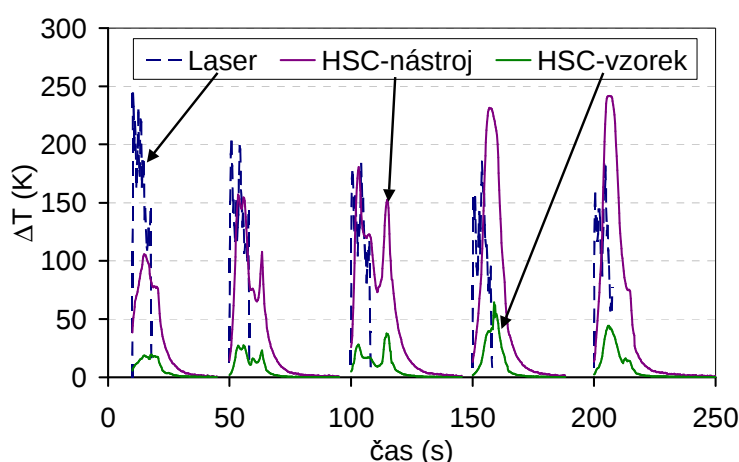
- Měření teploty v průběhu odvrtávání pomocí IR (infračervené) termografie. Je měřena maximální teplota materiálu v blízkosti odvrtávaného otvoru, v případě vysokorychlostního odvrtávání také maximální teplota frézy [8].

- Zjištění tvaru otvoru pomocí laserové konfokální mikroskopie - pravidelnost, kolmost stěn, rovnoměrnost odvrtávání.
- Velikost tepelně ovlivněné oblasti pomocí strukturní metalografické analýzy. Jsou zjišťovány případné fázové změny nebo oblast natavení materiálu v okolí otvoru.
- Měření zbytkového napětí [9]. Deformace jsou měřeny po celou dobu odvrtávání. Zbytkové napětí je vyhodnoceno integrální metodou na základě uvolněných deformací po vychladnutí a ustálení (několik minut po ukončení odvrtávání). Koeficienty pro integrální metodu jsou vypočteny numericky [10] pro daný poloměr otvoru. Hloubka otvoru při laserovém odvrtávání je stanovena na základě předchozího kalibračního měření.

3. Výsledky

3.1 Měření teplot

Měření teplot během odvrtávání diamantovou frézou ukázalo, že teplota měřeného vzorku v blízkosti otvoru se zvýší přibližně o 50 K, tedy pouze minimálně. Většinu tepla odvede odvrtávací nástroj, jehož teplota se zvýší až o 200 K. Nárůst teploty nástroje je v tomto případě podobný jako při odvrtávání ocelového vzorku standardní wolfram karbidovou frézou [8]. Maximální teplota vzorku je ovšem 2 až 3 krát vyšší než v případě uvedeném v [8], což je způsobeno jinou technikou odvrtávání ale i nižší vodivostí měřeného materiálu. Při laserovém odvrtávání je část tepla absorbována do měřeného vzorku a způsobuje jeho lokální ohřev o 150 až 200 K.



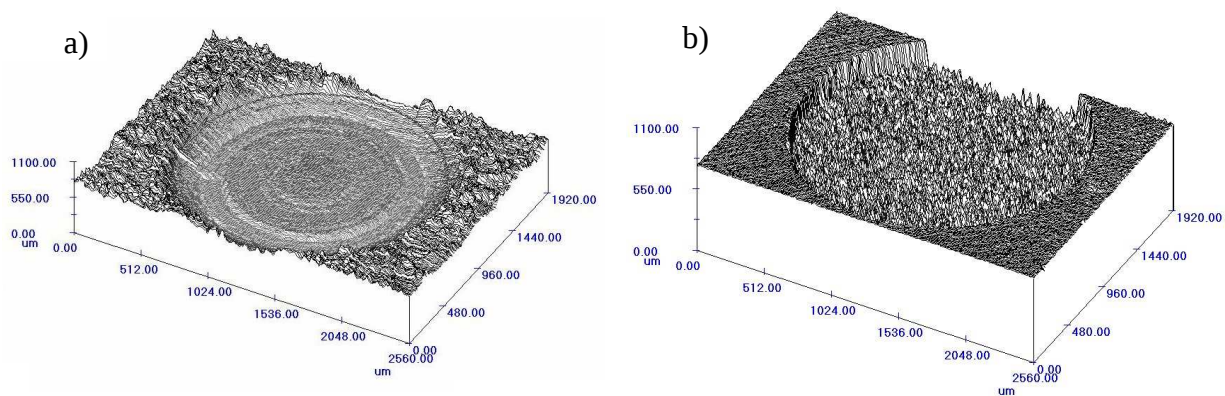
Obr.1. Nárůst teploty vzorku a nástroje v průběhu laserového a HSC odvrtávání.

Porovnání teplot vzorku a nástroje v prvních pěti krocích v průběhu laserového odvrtávání a vysokorychlostního odvrtávání diamantovou frézou je ukázáno na obr.1

3.2 Analýza tvaru otvoru a tepelného ovlivnění

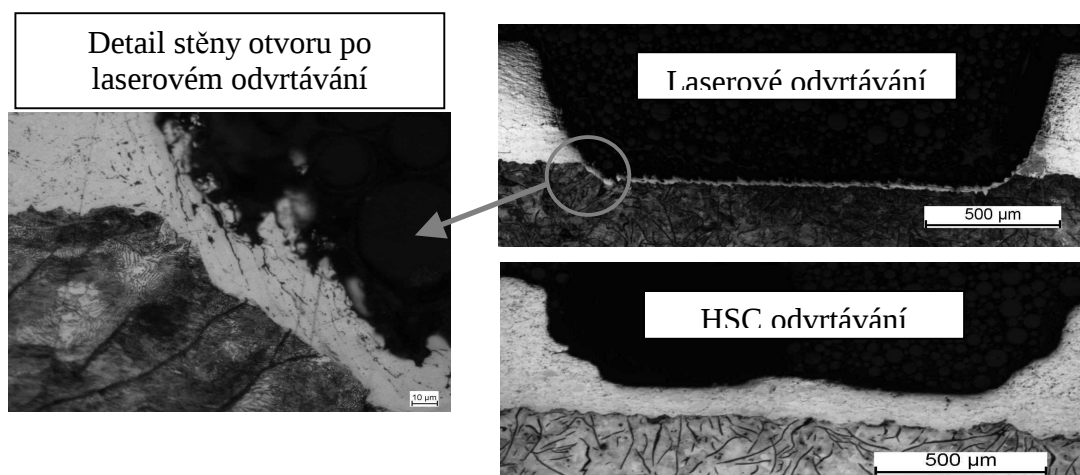
Tvary otvorů vytvořených HSC odvrtáváním a laserovým odvrtáváním zaznamenané pomocí laserového konfokálního mikroskopu jsou ukázány na obr.2. Z porovnání jsou patrné změny tvaru diamantového nástroje v průběhu odvrtávání. Otvor je nepravidelný, jeho průměr a hloubka (tvar povrchu dna) se mění v závislosti na opotřebení frézy. Ostatní experimenty ukázaly, že odchylky od předpokládaného tvaru otvoru se zvětšují s jeho rostoucí hloubkou, tj. se zvyšujícím se opotřebením nástroje. Laserovým odvrtáváním vznikl rovnoměrnější otvor, jehož průměr se s rostoucí hloubkou zmenšuje pouze velmi mírně. Dno je ploché, oproti HSC odvrtávání je patrná vyšší drsnost, kterou lze ovšem ovlivnit změnou parametrů laseru.

Metalografická analýza na obr.3 ukazuje, že ani v jednom případě nedochází k výraznému tepelnému ovlivnění materiálu v okolí otvoru. V blízkosti povrchu laserově odvrtaného otvoru je pozorována tenká (cca. 10 μm , viz detail na obr.3) vrstvička s odlišnou strukturou než



Obr.2. Tvar otvoru vytvořeného HSC odvrtáváním (a) a laserovým odvrtáváním (b).

okolní materiál. Tato vrstva se vyskytuje jak u stěn povlaku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ tak substrátu (šedá litina). EDX mikroskopickou sondou je ovšem zjištěno, že je z více než 95 % tvořena prvkem Fe. Předpokládá se proto, že se jedná o zkondenzované páry substrátu a nikoliv o natavenou vrstvu odvrtávaného povlaku.



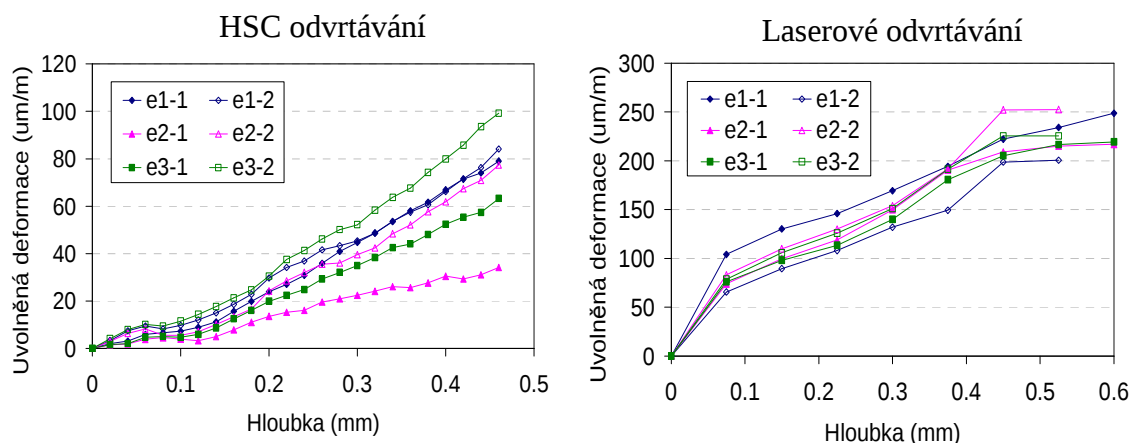
Obr.3. Metalografická analýza materiálu v blízkosti otvoru po HSC a laserovém odvrtávání.

3.2 Měření zbytkového napětí

Zbytkové napětí je měřeno na několika místech jednoho vzorku. Pro HSC i laserové odvrtávání jsou provedena 2 měření pro vyloučení náhodných chyb a ověření jeho opakovatelnosti.

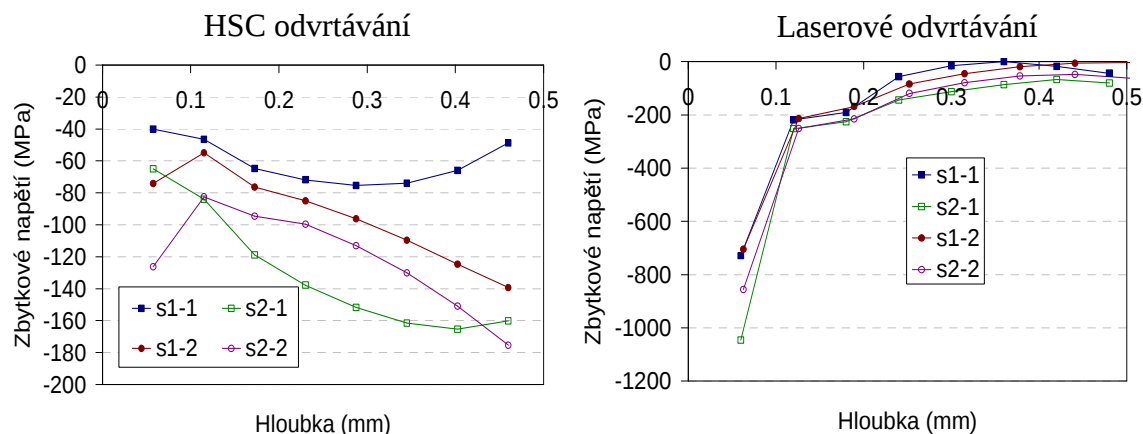
Na obr.4 jsou vykreslené deformace postupně uvolněné při HSC a laserovém odvrtávání otvoru. Průběh deformací uvolněných při HSC odvrtávání je charakteristický pro použití diamantové frézy. Čelo nástroje je tvořeno jednotlivými náhodně rozloženými diamantovými zrny a jeho geometrie je proto do jisté míry neurčitá. Z tohoto důvodu je velmi problematické určit tzv. nulovou hloubku odvrtávání a náběh křivek je velmi pozvolný až do úplného záběru frézy - typicky několik desítek μm . Poté je nárůst uvolněné deformace poměrně plynulý a uvolněná deformace v hloubce 0.45 mm ve všech směrech dosahuje hodnot od 40 do 150 $\mu\text{m}/\text{m}$ pro obě provedená měření.

U laserového odvrtávání je patrný skok v prvním kroku z nuly na téměř 100 $\mu\text{m}/\text{m}$. Tento skok je způsoben interakcí laserového paprsku s povrchem tenzometru, který má jiné optické



Obr.4. Uvolněné deformace při HSC a laserovém odvrtání otvoru

a tepelné vlastnosti než měřený materiál. Dochází k ohřevu vlastního tenzometru a k vyššímu nárůstu teploty než v dalších krocích, což je patrné také z průběhů teplot na obr.1. Tento ohřev má za následek vznik trvalé "zdánlivé" deformace. Další průběh uvolněné deformace je



Obr.5. Zbytkové napětí podle integrální metody při HSC a laserovém odvrtání otvoru

již plynulý a deformace se postupně zvýší až na cca 250 $\mu\text{m/m}$ v hloubce 0.6 mm.

Na obr.5 jsou hloubkové profily zbytkového napětí v hlavních směrech ($s_1 \sim \sigma_{\max}$, $s_2 \sim \sigma_{\min}$) vyhodnocené pomocí integrální metody. V obou případech je výsledkem tlakové zbytkové napětí v povlaku, což odpovídá předpokladům pro povlaky cermetů vytvořené HVOF technologií. V případě HSC odvrtávání zbytkové napětí s hloubkou mírně roste, hodnoty s_1 i s_2 se pohybují v rozsahu od 50 do 160 MPa. Tyto hodnoty napětí odpovídají výsledkům jiných měření na tomto typu povlaku [9]. Ve vyhodnocení zbytkových napětí z laserového odvrtávání se projevilo tepelné ovlivnění tenzometru v prvním kroku. Vyhodnocené napětí v dalších krocích je cca. 250 MPa postupně klesá až na hodnotu okolo 50 MPa.

4. Závěr

Provedené experimenty ukazují, že použitý laser nesplňuje dostatečně podmínky pro studenou ablaci a není tedy příliš vhodný pro použití v odvrtávací metodě měření zbytkových napětí. Vlivem jeho působení dochází k příliš vysokému ohřevu materiálu. Tento ohřev nezpůsobuje strukturní přeměny, nicméně v důsledku jeho působení vznikají trvalé deformace v okolí

odvrtávaného otvoru, které nedovolují hodnověrné vyhodnocení zbytkového napětí. Pro odvrtávací metodu měření zbytkových napětí by bylo vhodnější použití Nd:YAG nebo excimerových laserů o vlnové délce menší než 500 nm (viditelná a UV oblast) a kratší délce pulzu.

I přes uvedené problémy se nicméně ukázalo, že pomocí vysoce výkonných pulzních laserů lze vytvořit otvor potřebné kvality a s dobrou opakovatelností i v případech, kdy je použití HSC odvrtávání velmi problematické. Laserová ablace by proto mohla najít uplatnění při měření zbytkových napětí v moderních, mechanicky velmi odolných materiálech. Použití laserového odvrtávání by mohlo přinést také další možnosti rozvoje metody, především rozvíjejících se bezkontaktních optických metod měření deformací.

Poděkování: Tento projekt byl realizován za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu v rámci projektu č. 2A-1TP1/080 "Nové experimentální systémy pro výzkum termomechanických nestabilit tribologických procesů ve strojních zařízeních" a za podpory firmy Lintech.

Literatura

- [1] Hauk V.: *Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Elsevier Science B.V., 1997.
- [2] Grant P.V., Lord J.D., Whiehead P.S.: *The Measurement of Residual Stresses by the Incremental Hole Drilling Technique*, Measurement Good Practice Guide No.53, National Physics Laboratory, Teddington, 2002.
- [3] Steinzig M., Ponslet E.: *Residual stress measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry Part II*, Experimental Techniques, 2003, 27 (4), 17-21.
- [4] Steinzig M., Ponslet E.: *Residual stress measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry Part I*, Experimental Techniques, 2003, 27 (3), 43-46.
- [5] Flaman M.T., Herring J.A.: *Comparison of Four Hole-Producing Techniques for the Center-Hole Residual-Stress Measurement Method*, Experimental Techniques, 1982, 9 (8), 30-32.
- [6] Hwa-Teng Lee, Rehbach W.P., Hsu F.-Ch., Tzu-Yao Tai, Hsu E.: *The study of EDM hole-drilling method for measuring residual stress in SKD11 tool steel*, Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149, 88–93.
- [7] Sparrow E.M.: *Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities*. Numerical Heat Transfer, 2004, 149, 2-17.
- [8] Honner M., Litos P., Svantner M.: *Thermography analyses of the hole-drilling residual stress measuring technique*, Infrared Physics and Technology, 2004, 45 (2), 131-142.
- [9] Svantner M.: *Zjišťování zbytkových napětí ve vícevrstvých strukturách*, Disertační práce, ZČU v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Plzeň, 2004.
- [10] Svantner M.: *Numerical support for residual stress measurement by the hole-drilling method*, Journal of Computational and Applied Mechanics, 2005, 6 (1), 129-143.