

## LABORATORNÍ VÝUKA EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZY ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ NA ČVUT V PRAZE

### LABORATORY TEACHING OF EXPERIMENTAL RESIDUAL STRESS ANALYSIS AT THE CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Nikolaj GANEV<sup>1</sup>, Stanislav HOLÝ<sup>2</sup>

#### *Abstrakt*

Cílem příspěvku je prezentace nabídky teoretické průpravy a praktických cvičení z oblasti analýzy zbytkové napjatosti povrchových vrstev objektů z technicky důležitých kovů na ČVUT v Praze. Referát bude rovněž obsahovat informace o letošní modernizaci dosavadní výuky předmětu "Experimentální analýza reziduálních napětí" pro posluchače magisterského i postgraduálního studia oborů fyzikálního a materiálového inženýrství, aplikované mechaniky i technologických konstrukčních oborů na třech fakultách ČVUT: Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské, Fakultě strojní a Fakultě stavební.

**Klíčová slova:** laboratorní výuka, experimentální analýza napjatosti, zbytkové napětí.

#### *Abstract*

The goal of the contribution is to present the supply of theoretical and laboratory training in residual stress analysis of surface layers of technically significant metals at the Czech Technical University (CTU) in Prague. The paper contains information about this year's innovation of the course "*Experimental analysis of residual stresses*" for both the undergraduate and postgraduate students of physical engineering, material sciences, applied mechanics, and technological and constructional fields of study at the three faculties of the CTU in Prague, i.e. Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, and Faculty of Civil Engineering.

**Keywords:** laboratory teaching, experimental stress analysis, residual stresses.

## ÚVOD

V roce 1996 byly ve spolupráci tenzometrických pracovišť třech fakult ČVUT v Praze (Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Fakulta strojní, Fakulta stavební) vytvořeny podmínky k zahájení výuky předmětu Experimentální analýza reziduálních napětí pro ty posluchače 4. až 5. ročníku, jejichž učební plány jsou z oboru fyzikálního nebo materiálového inženýrství. Teoretická výuka je doplněna 10 praktickými cvičeními, při nichž jsou různé tenzometrické metody (Sachsova, odvrtávací, rentgenografická s fotografickou nebo počítačovou detekcí difraktovaného záření, mikroskopické měření deformací) aplikovány k charakterizaci povrchové zbytkové napjatosti vyvolané některými technologiemi mechanického opracování kovů na bázi železa.

V poslední době (po vstupu ČR do EU) je od zahraničních zákazníků stále častěji požadováno, aby do technické dokumentace výrobků našeho strojírenského i chemického

<sup>1</sup> doc. Ing. Nikolaj GANEV, CSc., FJaFI, ČVÚT v Praze, [ganev@troja.fjfi.cvut.cz](mailto:ganev@troja.fjfi.cvut.cz)

<sup>2</sup> prof. Ing. Stanislav HOLÝ, CS., UMBaM, FSj ČVÚT v Praze, [holys@fsid.cvut.cz](mailto:holys@fsid.cvut.cz).

Lektoroval: Dr.h.c. prof. Ing. František TREBUŇA, CSc., KAMaM, Sjf TU v Košiciach, [frantisek.trebuna@tuke.sk](mailto:frantisek.trebuna@tuke.sk)

průmyslu (plasty) byly zahrnuty také údaje o zbytkové napjatosti. Příprava nových úloh ilustrujících řešení konkrétních problémů tenzometrické diagnostiky je proto nezbytnou součástí výchovy odborníků v oblasti materiálového a fyzikálního inženýrství na ČVUT.

## SOUČASNÝ STAV VÝUKY

V letošním roce byl pedagogickému kolektivu zajišťujícímu tuto výuku udělen grant Fondu rozvoje vysokých škol MŠMT ČR 2017/2006 *Rozšíření laboratorní výuky experimentální analýzy mechanických napětí pro posluchače FS, FJFI, FSv ČVUT*. Výsledkem plnění tohoto projektu bude vytvoření čtyř nových laboratorních cvičení, která zpřístupní studujícím magisterského i doktorského studia současné trendy vývoje experimentální analýzy napětí, z nich vyplývající postupy měření a jejich aplikace v průmyslové praxi a materiálovém výzkumu:

- 1) Rentgenografická diagnostika hloubkového profilu zbytkových napětí v povrchových vrstvách rozměrných pružin z legované oceli (aplikace metody jedné expozice bez referenční látky s fotografickou detekcí difraktovaného záření).
- 2) Rtg stanovení povrchových napětí vyvolaných elektroerozivním obráběním ocelí (měření metodou „ $\sin^2\psi$ “ na  $\omega$ -goniometru).
- 3) Stanovení předpětí ve skleněném potrubí s bandáží ze skelného laminátu (kombinace odporové tenzometrie a fotoelasticimetrie).
- 4) Určení elastických charakteristik technických materiálů s tlakově předpjatou povrchovou vrstvou (využití ohybové zkoušky a odporové tenzometrie).

Studenti dostanou možnost řešit takové reálné problémy současné strojírenské výroby, jako např. diagnostika hloubkového profilu zbytkových napětí v povrchových vrstvách rozměrných objektů, stanovení povrchových napětí vyvolaných elektroerozivním obráběním ocelí, stanovení předpětí ve skleněném potrubí s bandáží ze skelného laminátu nebo určení elastických charakteristik technických materiálů s tlakově předpjatou povrchovou vrstvou. Nová praktická cvičení jsou určena především studentům ČVUT, kteří navštěvují výuku předmětu *Experimentální analýza reziduálních napětí* nebo povinně volitelné, popř. doporučené předměty *Experimentální analýza konstrukcí I a II* a *Základy inženýrského experimentu* na fakultě strojní a *Difrakční analýza mechanických napětí* na fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské. Ve školním roce 2004/2005 byly tyto předměty vyučovány pro cca 65 studentů ČVUT.

## ZÁVER

Nově vytvořené přednáškové podklady i laboratorní úlohy rozšíří obsah dnešních programů uvedených předmětů, zvýší efektivitu výuky na obou fakultách a stanou se vzorem pro výuku mezifakultní. Tím přispějí významně k integraci výuky na ČVUT a posílí její interdisciplinární charakter.

Postupy a výsledky projektu budou znamenat i doplnění znalostí a získání praktických návyků studujících prakticky všech tří stupňů VŠ vzdělávání. Výsledky budou sdělitelné a přenositelné na další VŠ pracoviště v Čechách a na Slovensku.

Tento příspěvek vznikl za podpory projektu 2017/2006 Rozšíření laboratorní výuky experimentální analýzy mechanických napětí pro posluchače FS, FJFI, FSv ČVUT Fondu rozvoje vysokých škol MŠMT ČR.

## LITERATURA

- [1.] KRAUS, I., GANEV N.: *Difrakční analýza mechanických napětí*, skripta ČVUT, Praha 1995.
- [2.] KRAUS, I., GANEV N.: *Technické aplikace difrakční analýzy*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2004.
- [3.] VLK, M. et al: *Experimentální mechanika*, VUT Brno 2003, Dostupný na [http://www.umt.fme.vutbr.cz/SKRIPTA/vlk2/experimentalni\\_mechanika.pdf](http://www.umt.fme.vutbr.cz/SKRIPTA/vlk2/experimentalni_mechanika.pdf)
- [4.] TREBUŇA, F., ŠIMČÁK, F.: *Kvantifikácia zvyškových napätí tenzometrickými metodami*. Grafotlač, Prešov, 2005. 134 str., ISBN 80-8073-227-2

Příloha

**Sylabus předmětu**  
**Experimentální analýza reziduálních napětí**  
**pro posluchače FJFI, FS a FSv ČVUT**

*(Nově zařazené partie v roce 2006 jsou uvedeny tučně kurzívou.)*

### 1. Úvod

#### 1.1 Vybrané partie z mechaniky kontinua (FS)

Pojem napětí a přetvoření, rovnice rovnováhy prvku, hlavní napětí, vztahy mezi napětím a prodloužením, prostředí izotropní a anizotropní, základní rovnice teorie pružnosti, mezní stavy, vnitřní napětí-druhy, vznik a význam pro technickou praxi.

#### 1.2 Princip difrakčních metod (FJFI)

Základní vlastnosti rentgenového a neutronového záření, Braggova rovnice a její geometrická interpretace, fotografické metody, difraktometrická technika, hlavní charakteristiky difrakčních linií, hloubka vnikání, mřížková deformace, obecný vztah difrakčního měření napětí, rentgenografické elastické konstanty, charakteristické rysy difrakční tenzometrie.

#### 1.3 Mechanismus vzniku reziduálních napětí (FSv)

Materiály a jejich struktura, strukturní úrovně, vlastnosti materiálů a jejich změny vyvolané působením mechanických, tepelných a jiných fyzikálních účinků, vliv technologických operací na nehomogenitu struktury a fyzikálních vlastností, nehomogenita pole deformací a teplot, účinky reziduálních napětí na vlastnosti výrobků.

### 2. Základy teorie a techniky nejdůležitějších tenzometrických metod

#### 2.1 Metody mechanické (FS)

Snímače mechanické a elektrické, odporové tenzometry, křehké laky, reflexní fotoelasticimetrie.

Metoda Sachsova (princip, postupy, vyhodnocení, omezení), metoda odvrťovací (princip, modifikace, vztahy, vyhodnocení, omezení), metoda postupného odebírání vrstev (princip, vztahy, omezení).

#### 2.2 Metody fyzikální

Metody ultrazvukové (princip, přístrojová technika, vyhodnocení, omezení), magnetické metody měření napětí (princip, přístrojová technika).

### 2.3 Metody difrakční (FJFI)

Rentgenografická tenzometrická technika (difraktometry, aparatury s fotografickou registrací difraktovaného záření, *detekce záření pomocí polohově citlivých detektorů*), metodika měření napětí monochromatickým zářením (homogenní a nehomogenní stav napjatosti), faktory ovlivňující difrakční tenzometrická měření (rozměry koherentních oblastí, elastická anizotropie, textura), energiově disperzní difraktometrie, tenzometrická analýza tepelnými neutrony, *mobilní a přenosná zařízení pro rentgenografickou analýzu makroskopických zbytkových napětí*, příklady aplikací rentgenografických tenzometrických metod na homogenní i nehomogenní stavy napjatosti kovových materiálů a keramických látek, *tenzometrická diagnostika strojírenských výrobků a kovových konstrukcí velkých rozměrů a členitého tvaru, měření „v terénu“*.

### 2.4 Mikroskopická analýza deformací materiálových struktur (FSv)

Fyzikální a technické základy mikroskopie, druhy mikroskopie podle použitého záření a podle interakce s látkou, experimentální mechanicko-optické metody měření deformací, Moiré interferometrie, fotogrammetrie, digitální obrazová analýza, zobrazovací přístroje a technika, analýza deformací v mikrostrukturách, mikroskopické analogie optických metod měření deformací (přístroje, příprava vzorků, mřížky), aplikace mikroskopických metod měření deformací k analýze reziduálních napětí, polodestruktivní metody uvolnění reziduálních napětí, použití nových technologií (přístroje a zařízení), příklady analýzy reziduálních deformací ve vzorcích materiálů a součástí.

## 3. Praktická cvičení z tenzometrických metod

- 3.1 Sachsova metoda (FS).
- 3.2 Metoda odvtávací.
- 3.3 Metoda pásků (FS).
- 3.4 Rentgenografická tenzometrická analýza homogenních reziduálních napětí metodami založenými na fotografické detekci difraktovaného rentgenového záření (FJFI).
- 3.5 Difrakto-metrická analýza povrchové distribuce reziduálních napětí (FJFI).
- 3.6 Napěťový profil vyvolaný balotínováním chromniklové oceli (FJFI)
- 3.7 Kontrola úrovně makroskopických zbytkových napětí na rozměrných strojních dílech s využitím přenosného rentgenového tenzometru TRIM (FJFI).
- 3.8 Stanovení rentgenografických elastických konstant materiálů na bázi Fe v mechanické zkušebně FS ČVUT pomocí přenosného rentgenového tenzometru TRIM (FJFI + FS).
- 3.9 Analýza deformace materiálových mikrostruktur pomocí mikroskopického měření deformací (FSv).
- 3.10 Analýza napětí s použitím mikroskopických metod měření deformací (FSv).
- 3.11 *Rentgenografická diagnostika hloubkového profilu zbytkových napětí v povrchových vrstvách rozměrných pružin z legované oceli (aplikace metody jedné expozice bez referenční látky s fotografickou detekcí difraktovaného záření).*
- 3.12 *Rtg stanovení povrchových napětí vyvolaných elektroerozivním obráběním ocelí (měření metodou „ $\sin^2\psi$ “ na  $\omega$ -goniometru).*
- 3.13 *Stanovení předpětí ve skleněném potrubí s bandáží ze skelného laminátu (kombinace odporové tenzometrie a fotoelasticimetrie)*
- 3.14 *Určení elastických charakteristik technických materiálů s tlakově předpjatou povrchovou vrstvou (využití ohybové zkoušky a odporové tenzometrie)*