

NOVÉ MOŽNOSTI MECHANICKÝCH METOD ANALÝZY ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ

NEW POSSIBILITIES OF THE MECHANICAL METHODS OF THE RESIDUAL STRAINS ANALYSIS

Berka L., Růžek M., Sova M.

Abstract

Residual stresses caused by technological processes are parts of stress state of bodies. They are stresses of the first kind mostly and they cause a deformation and influence the next exploitation of the machine parts. An investigation of the measurement of residual stresses is therefore very important. Two groups of methods are used for it mainly. The first one is represented by the measurement of strains of the crystalline grid by means of the X-ray diffraction. The second one is represented by the measurement of mechanical strains, when the part of the body volume is removed. The advance in this direction can be reached when new technologies of cutting and microscopic methods of strain measurement are used.

1. Úvod

Mechanická napětí existující v tělese (jako uzavřeném systému) bez působení vnějších sil a momentů, jakož i jiných nemechanických účinků, jsou souhrnně označována za *zbytková napětí* [1]. Pod tímto pojmem budeme rozumět stav víceosé napjatosti působící v uzavřeném systému, jehož *všechny části mají stejnou teplotu. Vnitřní síly a momenty spojené se zbytkovým napětím jsou v mechanické rovnováze*, tj. součet vnitřních sil vzhledem k libovolnému řezu uvažovaným systémem je nulový stejně jako součet vnitřních momentů vzhledem k libovolné ose procházející systémem. Systém je uzavřený také vůči nemechanickým stavovým veličinám, které v něm mohou mechanické účinky vyvolat.

Zbytková napětí jsou vždy důsledkem nehomogenity lokální deformace. Pokud by deformace proběhla stejnoměrně v celém objemu materiálu, t.j. v každém jeho bodě současně a stejným způsobem, pak zbytková napětí nevzniknou. V materiálech užívaných technickou praxí vzniká technologií výroby i dalším zpracováním celá řada různých stavů zbytkové napjatosti. *Pevné látky bez zbytkových napětí principiálně neexistují.*

Pro technickou praxi jsou důležitá především *zbytková napětí I. druhu*. Jejich existence se projevuje řadou prakticky významných efektů. K nejvýznamějším patří geometrické důsledky zásahu do napětové rovnováhy. Tím, že rozměrové a tvarové změny doprovázejí ustavení nového rovnovážného stavu, ovlivňují využitelnost součástí nebo technologií jejího dalšího zpracování. Účinek tlakových předpětí příznivě ovlivňuje životnost, provozní spolehlivost a korozní odolnost součástí.

2. Metody měření zbytkových napětí [2]

Ke zjišťování stavu napjatosti v modelech i reálných součástkách existuje dnes značné množství experimentálních postupů založených na vztahu mezi napětím a určitou charakteristikou zkoumaného objektu.

Některé z nich dovolují získat o zbytkových napětích jen kvalitativní informace, mnohé jsou však vhodné i k určení značně přesných kvantitativních údajů. Podle toho, do jaké míry vyžadují zásah do celistvosti studovaného vzorku, mohou být metody klasifikovány jako

- *destruktivní* (založené na měření deformací vyvolaných odstraněním části objemu - povrchové vrstvy se zbytkovým napětím),
- *polodestruktivní* (jejich aplikací dojde jen ke znehodnocení jen malé části objemu, někdy záměrně přidávaného při výrobě součástky),
- *nedestruktivní* (součástky se měřením nepoškodí).

Pokud jde o *principy měření zbytkových napětí*, jedná se vždy o *měření zbytkových deformací*. Protože vznik zbytkových napětí souvisí s nehomogenitou a anizotropií plastických deformací, je třeba při stanovení zbytkových napětí uvažovat nelineárně elastický stav materiálu. *Stanovení elastických charakteristik* pro daný stav materiálu a součásti představuje, vedle měření zbytkové deformace, *druhý základní problém*. Použití lineárně elastické teorie v podobě zobecněného Hookova zákona totiž způsobuje, že hodnoty zbytkových napětí stanovené různými metodami vykazují značné rozdíly.

Pro měření zbytkových deformací I. druhu se nejčastěji používají *přímé metody mechanické* (měří se geometricky definované deformace) a *metody fyzikální-difrakční* (měří se deformace krystalické mřížky). Z uvedeného plyne, že použití difrakčních metod má omezené použití. Pro měření zbytkových napětí v tenkých povrchových vrstvách krystalických látek je však rentgenová difrakce hlavní experimentální metodou.

3. Mechanické metody stanovení zbytkových napětí

Mechanické metody jsou v principu *destruktivní*, proto k uvolnění celého nebo části objemu vzorku od účinku zbytkových napětí nacházejících se v povrchové vrstvě je třeba tuto vrstvu nebo příslušnou část objemu odstranit nebo separovat řezem. Druhý způsob je označován za *polodestruktivní*, neboť odstraňovanou část objemu vzorku lze minimalizovat aniž by byla narušena funkčnost dílu.

První způsob - *destruktivní* - se nejčastěji užívá ke stanovení zbytkových napětí v *tenkých povrchových vrstvách*. Po jejich odstranění, jež se provádí ku př. elektrolytickým rozpouštěním, aby nedocházelo ke vzniku nové zbytkové napjatosti, dochází k ohybu zbylé části vzorku. Z deformace, měřené na spodní straně vzorku a z jeho počáteční i zmenšené tloušťky, lze pak s použitím známé hodnoty modulu pružnosti vypočítat velikost zbytkového napětí v odstraněné vrstvě materiálu. Opakováním tohoto postupu lze získat i průběh gradientu zbytkových napětí po tloušťce vzorku.

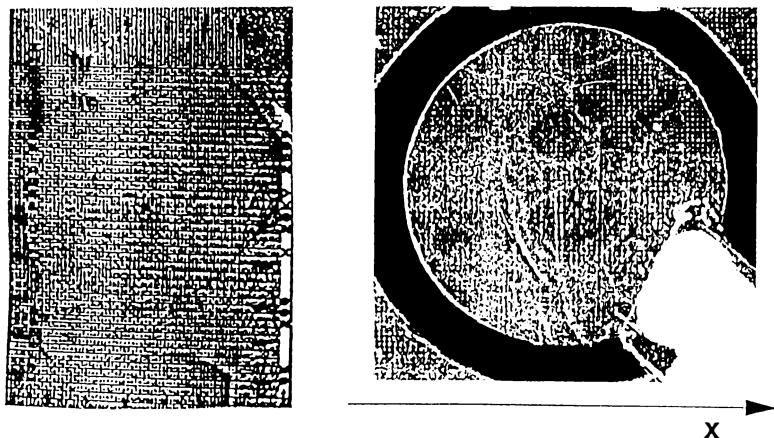
Druhý způsob - *polodestruktivní* - je znám pod označením "hole drilling, ring cutting, core drilling" a je užíván ze všech metod nejčastěji. Podstatou této metody je *uvolnění zbytkových napětí vyvrtáním otvoru nebo drážky*. Při nejjednoduším uspořádání - vrtání otvoru - se v místě měření zbytkových deformací nalepí růžice tří odporových tensometrů, jež se k tomuto účelu speciálně vyrábí. Po jejich zapojení a nastavení nulových hodnot na měřicím tensometrickém můstku se *pod středem tensometrické růžice postupně vrtá*, s použitím speciálního přípravku, *otvor*. Pro zvolené hloubky otvoru se na měřicím můstku postupně zaznamenávají hodnoty

deformací a z nich s použitím speciálních přepočtových modelů se počítají zbytková napětí. *Přepočtové modely transformují naměřené hodnoty deformací do místa, v němž je vyvrtán otvor a eliminují některé nedostatky metody - vliv zpřůměrování nelineárního průběhu deformace po délce tensometru. K měření deformací vně otvoru nebo drážky lze použít i jiné metody, zejména interferenční, čímž se do jisté míry odstraní uvedená nevýhoda.*

4. Použití mikroskopických metod měření deformací

Nové možnosti do laboratorní analýzy zbytkových napětí vnáší *mikroskopická metoda měření deformací*, která principiálně využívá uvolnění zbytkových napětí v *malém objemu materiálu ohraničeném drážkou*. Deformace se v tomto případě měří ve vnitřní oblasti drážky, kde je jejich pole homogenní a při dostatečné hloubce drážky (asi 1,5 násobek průměru) zcela bez vlivu napjatosti vlastního tělesa. K uvolnění zbytkových napětí v malém objemu materiálu je vhodné použít bezkontaktního vrtání nebo řezání, jakými jsou elektrojiskrové technologie nebo pulsní laser. Při jejich použití lze *uvolňovaný objem* minimalizovat až na rozměry několika desetin mm.

K měření deformací mikroskopickými metodami [3] (jsou to metody optické) je třeba *opatřit povrch vzorku*, v místě kde se deformace měří, mřížkou. Její typ závisí na principu měřicí metody. Pro mikroskopické měření deformací lze užít tyto metody - *interferenční, stereoskopickou nebo digitální obrazovou analýzu*. V případě *stereoskopické metody* lze se při vhodné morfologii povrchu obejít i *bez této mřížky*, což přináší značnou výhodu, neboť její zhotovení *optickou nebo elektronovou litografií* je dosti pracné a omezuje i velikost vzorku. Některé z těchto nevýhod odstraňují *mřížky ryté*, jež jsou vhodné pro *metody interferenční a stereoskopické*.



Obr. 1.

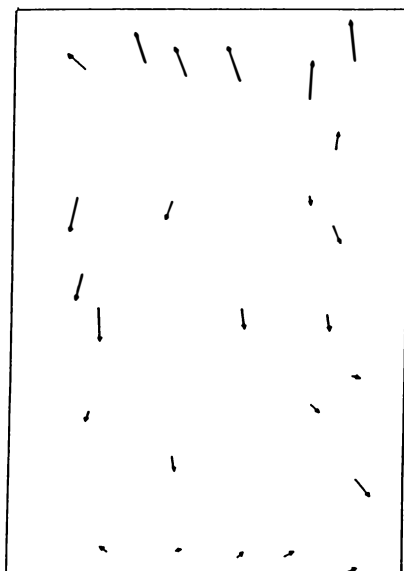
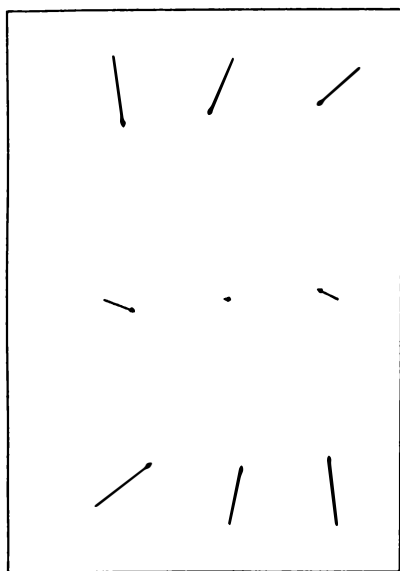
Na obrázku 1 vlevo je mikroskopický snímek ryté mřížky s hustotou 330 čar/mm při 200 násobném zvětšení. Vpravo je mikroskopický snímek mřížky s otvory 30 μ m vzdálenými 50 μ m, zhotovené světelnou litografií při 25 násobném zvětšení.

Princip stereoskopické metody spočívá v komparaci mikroskopických snímků měřeného místa pořízených před a po uvolnění zbytkových napětí zpravidla kruhovou drážkou. Pro pořízení měřických snímků, lze použít jak optický, tak i elektronový rastrovací mikroskop. Komparace příslušných dvojic snímků se provádí v kartografickém stereo-komparátoru. Výsledkem *stereoskopického vyhodnocení* jsou paralaxy, tj. odchylky v souřadnicích stejných bodů z dvojice komparovaných snímků. Počáteční souřadnice a paralaxy jsou *vstupními údaji pro numerickou afinní transformaci*, jejíž koeficienty představují průměrné hodnoty gradientů deformace v dané oblasti. Z nich se dále již počítá tenzor deformace.

Přesnost stereoskopické metody měření deformací lze prakticky kontrolovat vyhodnocením deformace snímků vzorků pořízených při rozdílném zvětšení. Poměrné zvětšení je totiž ekvivalentní poměrné deformaci. Na následujících obrázcích jsou

Mřížka, zvětšení 990 - 1000

Vzorek hliník
zvětšení 150 -150



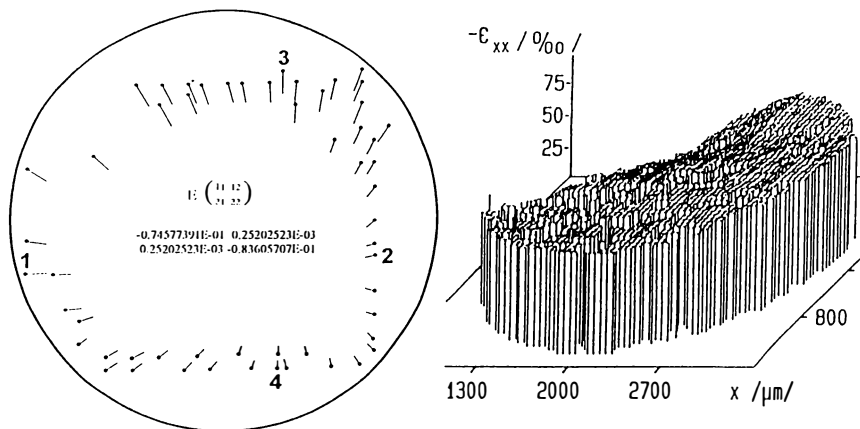
-0.11658639E-01 0.43395624E-03
0.43395624E-03 -0.11399716E-01

$E \begin{pmatrix} 11 & 12 \\ 21 & 22 \end{pmatrix}$

0.10487437E-02 -0.11372975E-03
-0.11372975E-03 0.90599060E-03

Obr. 2.

vedeny výsledky takového testu. Obrázek 2 vlevo ukazuje výsledek poměrného zvětšení ryté mřížky o 1% při počátečním 1000 násobném zvětšení. Na obrázku vpravo jsou zobrazeny chyby z vyhodnocení dvou snímků povrchu vzorku bez mřížky pořízených při stejném zvětšení. Tato kontrola dává informaci o relativní přesnosti měření vzhledem k výsledným hodnotám měřených deformací.

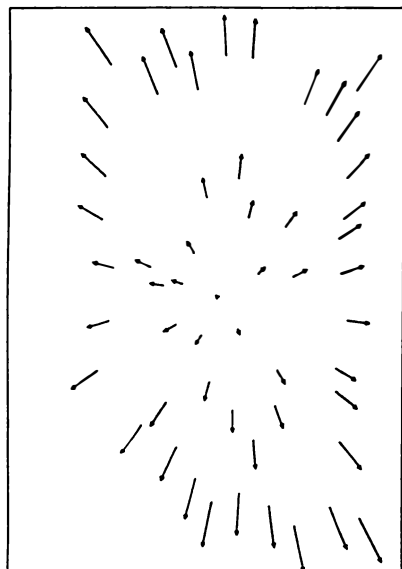


Obr. 3.

Na obrázku 3 vlevo jsou zobrazena posunutí bodů ryté mřížky a průběh deformace ve vnitřní oblasti uvolňovací drážky zjištěný digitální obrazovou analýzou snímku mřížky zobrazené světelnou litografií.

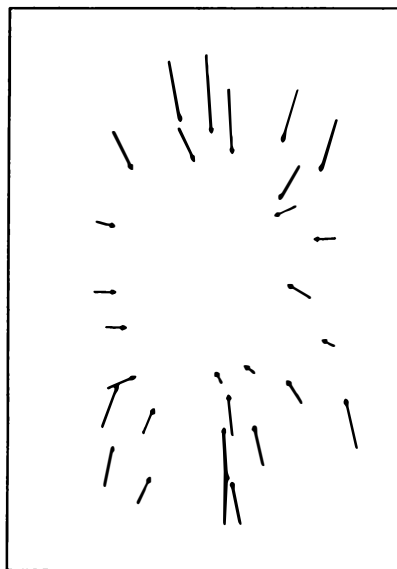
Vzorek - ocel s balotínací, povrchová vrstva [J]
Snímky č. 292-338

Vzorek - ocel s balotínací, O
Snímky č. 296-339



$0.37997365E-01$ $-0.17651616E-02$
 $-0.17651616E-02$ $0.37770152E-01$

$E = \begin{pmatrix} 11 & 12 \\ 21 & 22 \end{pmatrix}$



$-0.11955470E-01$ $-0.68467751E-03$
 $-0.68467751E-03$ $-0.80209970E-02$

Obr. 4.

Na obrázku 4 jsou zobrazena posunutí a uvedeny tenzory deformace $\mathbf{E}$ od uvolněných zbytkových napětí v ocelové desce tloušťky 10mm po balotinaci. Stereoskopická analýza mikroskopických snímků povrchu (100 násobné zvětšení) se prováděla na přirozených (strukturních) objektech povrchu. Na obrázku vlevo jsou zobrazena posunutí komparovaných bodů po uvolnění zbytkových napětí kruhovou drážkou o průměru 2mm, vytvořenou pulsním CO₂ laserem fy COHERENT. Na obrázku vpravo jsou zobrazena posunutí komparovaných bodů na proužku povrchové vrstvy tloušťky 0,5mm a šířky 2mm uvolněné řezem rovnoběžným s povrchem a dvěma řezy kolmými k hraně a povrchu vzorku.

Ze směru vektorů posunutí je patrný rozdíl ve zbytkové napjatosti povrchové vrstvy a vnitřního objemu. Rozšíření indikované uvolněním povrchové vrstvy signalizuje tlaková zbytková napětí, zkrácení indikované na povrchu objemového prvku uvnitř kruhového zářezu, signalizuje tahová napětí. Uvedené výsledky jsou v souladu se známými poznatky a doplňují je kvantitativními údaji, t.j. hodnotami složek tenzoru deformace $\mathbf{E}$. Z uvedeného je zřejmá důležitost způsobu určení zbytkových napětí jak se zřetelem k jejich kvalitativním tak i kvantitativním hodnotám.

Závěr:

Nové mechanické způsoby dělení materiálu, představované elektrojiskrovým a laserovými technologiemi jsou též vhodné prostředky pro užití v laboratorním výzkumu zbytkových napětí. Umožňují totiž minimalizovat objem materiálu v němž jsou uvolňována pravidelná napětí, aniž by byly ovlivněny jeho mechanické vlastnosti, a tím minimalizují i poškození vyšetřované součásti. K měření deformací se pak použijí mikroskopické metody. S použitím popsaných experimentálně technických prostředků bude možné snadněji a přesněji řešit, otázky gradientu reziduálních napětí ve směru kolmém k povrchu tělesa. Ve spojení s teoretickým řešením úlohy a napjatosti a deformaci oblasti uvnitř „mělké“ drážky $h/d < 1$ lze stanovit na základě změřeného radiálního rozložení deformací, průběh gradientu zbytkových napětí.

Použití nových experimentálních prostředků pro analýzu zbytkových napětí umožňuje řešit jak nové problémy tak zpřesnit dosavadní metody.

Literatura

- [1] NECKÁŘ F., KVASNIČKA I., Vybrané statě z úběru materiálu. Skriptum FS ČVUT, Praha 1991.
- [2] BERKA L., KRAUS I., KVASNIČKA I., Metal '96, Tanger s.r.o., Ostrava 1996.
- [3] BERKA L., SOVA M., RŮŽEK M., FISCHER G., Sborník 33. konference EAN '95, VUT Brno, 1995.

Rozvoj mikroskopických metod měření deformací a jejich užití k analýze zbytkových napětí je podporován grantem GA ČR číslo 106/95/0596.

Ladislav Berka, Ing. CSc., FSv - ČVUT Praha,
Miloslav Růžek, Doc. Ing. CSc., FSv - ČVUT Praha,
Miloš Sova, Ing. CSc., FSv - ČVUT Praha,
Thákurova 7, 166 29 Praha 6, ČR.