



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

**Ústav technologie obrábění,
projektování a metrologie**

**Analýza metod pro měření zbytkových
napětí a vhodnost jejich použití**

**Residual stress measurement methods and
its application**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021

Tomáš BURKET

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Burket** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **483151**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza metod pro měření zbytkových napětí a vhodnost jejich použití

Název bakalářské práce anglicky:

Residual stress measurement methods and its application

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor zadané problematiky
2. Experimentální měření zbytkových napětí
3. Vyhodnocení a závěr

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vítězslav Rázek, CSc., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. za poskytnutí věcných připomínek, odborné vedení mé práce a vstřícný přístup. Také děkuji své rodině za podporu během celého studia.

Anotační list

Jméno autora:	Tomáš Burket
Název BP:	Analýza metod pro měření zbytkových napětí a vhodnost jejich použití
Anglický název BP:	Residual stress measurement methods and its application
Akademický rok:	2020/2021
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojínského inženýrství
Studijní obor:	Bez oboru
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí BP:	Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
Bibliografické údaje:	Počet stran 35 Počet obrázků 18 Počet tabulek 2
Klíčová slova:	zbytková napětí, metody měření, zhodnocení metod
Keywords:	residual stress, measurement methods, suitability of methods
Anotace:	Bakalářská práce je zaměřena na rozbor metod používaných k měření zbytkových napětí. Práce obsahuje část věnovanou vzniku a důsledkům přítomnosti zbytkových napětí v materiálu. Další část se zabývá detailním popisem a teoretickým rozбором vybraných metod. Dále je zpracován přehled v současnosti komerčně dostupných zařízení využívajících různé metody měření. V poslední části je v přehledných tabulkách vypracováno zhodnocení metod dle různých hledisek.
Abstract:	This bachelor thesis is focused on the analysis of methods used to measure residual stresses. This work contains a section devoted to the origin and consequences of the presence of residual stresses in the material. The next part deals with a detailed description and theoretical analysis of selected methods. Furthermore, an overview of currently commercially available devices is presented. The last part deals with suitability of the methods and an overview in form of tables is created.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	2
1. Úvod	3
2. Zbytková napětí.....	4
2.1. Vymezení pojmu	4
2.2. Klasifikace	4
2.3. Vznik	5
2.4. Důsledky přítomnosti zbytkových napětí	6
2.4.1. Statická pevnost.....	7
2.4.2. Dynamická pevnost a únava.....	7
2.4.3. Deformace při uvolnění zbytkových napětí.....	7
3. Metody pro měření zbytkových napětí.....	8
4. Mechanické metody	9
4.1. Odvrtávací metoda	9
4.1.1. Teoretické pozadí a principy tenzometrické metody	10
4.1.2. Stanovení kalibračních koeficientů pro slepý otvor a výpočet gradientu napětí ...	12
4.1.3. Zhodnocení a vhodnost použití	13
4.2. Metoda sloupku.....	13
4.3. Dělicí metoda.....	14
4.4. Metoda kontur.....	15
5. Difrakční metody	16
5.1. Rentgenová difrakční tenzometrie.....	16
5.1.1. Teoretické pozadí a principy rentgenové difrakční tenzometrie	16
5.1.2. Metoda $\sin 2\psi$	19
5.1.3. Určení gradientu napětí	21
5.1.1. Zhodnocení a vhodnost použití	21
6. Magnetické metody.....	22
6.1. Teoretické pozadí magnetických metod	22
6.2. Barkhausenův šum.....	23
6.2.1. Zhodnocení a vhodnost použití	24
7. Ultrazvukové metody	24
8. Zařízení užívaná v praxi.....	25
9. Zhodnocení a porovnání metod	29
9.1. Praktická hlediska	29
9.2. Materiálová omezení	29
9.3. Kvalitativní hlediska	29
10. Závěr.....	33
Seznam obrázků.....	34
Seznam tabulek.....	34
Seznam použité literatury	35

Seznam použitých zkratk a symbolů

ZN	Zbytková napětí	
ASTM	American Society for Testing and Materials	
MKP	Metoda konečných prvků	
XRD	Rentgenová difrakce	
RTG	Rentgenové záření	
CMM	Souřadnicový měřicí stroj	
EDM	Elektroerozivní obrábění	
σ	Napětí normálové	[MPa]
τ	Napětí tečné	[MPa]
ε	Poměrná deformace	[-]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
μ	Poissonovo číslo	[-]
d	Vzdálenost atomových rovin	[mm]
λ	Vlnová délka	[mm]
θ	Braggův úhel	[°]
$h k l$	Millerovy indexy	[-]
B	Magnetická indukce	[T]
H	Intenzita magnetického pole	[A/m]
MP	Magnetoelastický parametr	[-]

1. Úvod

Zbytková napětí jsou do materiálu vnášena při téměř každém výrobním procesu včetně běžných technologiích jako obrábění, lití, tváření nebo svařování. Také se může zbytkové napětí v materiálu objevit postupně během provozu součásti. Zbytková napětí lze definovat jako napětí, která zůstávají v materiálu bez působení vnějších sil a teplotních gradientů. Někdy se označují jako vnitřní pnutí. Tato napětí jsou v součásti v rovnováze.

I přesto, že se zbytková napětí v součástech tak často vyskytují, může dojít k jejich snadnému přehlížení a ignorování, jelikož se na první pohled neprojevují. K viditelným projevům dochází až ve chvíli narušení zmíněné rovnováhy, součást se deformuje. Z dlouhodobého hlediska mohou zbytková napětí zapříčinit zhoršení některých vlastností materiálu a způsobit předčasnou poruchu.

Prvně použité metody měření zbytkových napětí spočívaly v rozříznutí materiálu a pozorování změn rozměrů. Postupem času se staly tyto metody sofistikovanější a kvantitativní. V pozdějších obdobích docházelo souběžně k vývoji nedestruktivních metod. V nedávných letech se vývoj měření soustředil na zdokonalení metod a možnosti vyšetřování napětí ve větších hloubkách nebo průřezech. Mimo jiné nastal i pokrok při predikci vzniku zbytkových napětí při výrobě.

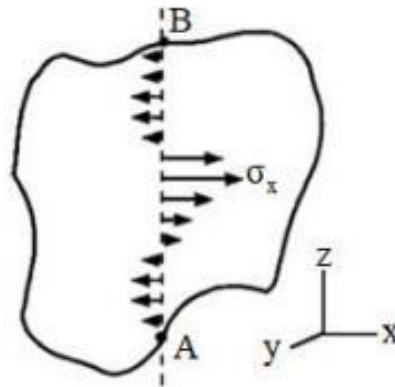
Tato bakalářská práce si klade za cíl zpracovat zhodnocení metod dle několika různých hledisek. Toto zhodnocení je ve formě přehledných tabulek, které čtenáři poskytnou ucelený pohled na dostupné metody, jejich omezení a dosažitelné výsledky. Dále jsou v této práci popsány vybrané metody a důraz je kladen na teoretické pozadí těchto metod. Pro pochopení problematiky jsou zmíněny okolnosti vzniku a důsledky přítomnosti zbytkových napětí v materiálu. Část práce je věnována přehledu v současnosti komerčně dostupných zařízení využívajících různé metody měření.

2. Zbytková napětí

2.1. Vymezení pojmu

V materiálu mohou existovat dva typy vnitřních napětí, vložena (okamžitá) a zbytková. Celkové napětí je superpozicí obou těchto napětí. Vložena napětí jsou napětí způsobená působením vnějších zatížení existující v oblasti elastických deformací, které po odeznění těchto zatížení zaniknou. Druhým typem jsou napětí zbytková. Tato napětí po odeznění vnějších zatížení nezanikají a zůstávají v materiálu. [1]

Vnitřní napětí v materiálu jsou navzájem v rovnováze. Existence tahových napětí je vykompenzována napětími tlakovými. Při narušení rovnováhy se napětí snaží vykompenzovat toto narušení, což se projeví deformací materiálu. Tento princip lze využít ke zjištění velikosti zbytkových napětí a jejich polohy. Na Obr. 1 je schematicky znázorněn příklad průběhu napětí v řezu. [1] [3]



Obr. 1 Rozložení zbytkových napětí v řezu součásti [3]

2.2. Klasifikace

Zbytková napětí se dají dělit dle různých kritérií, nejčastěji je to podle objemu, ve kterém jsou homogenní, nemění směr ani znaménko. Takto se ZN označují jako I. II. a III. druhu (dle Macherauche a Tietze). [3]

I. druhu – Makroskopická napětí

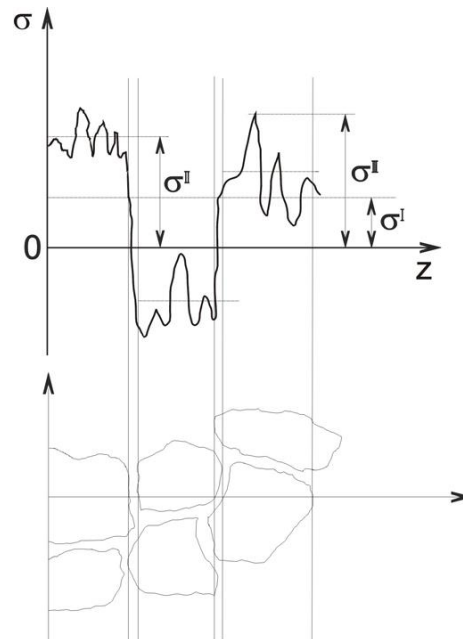
Jsou homogenní v oblasti srovnatelné s velikostí mnoha zrn (rozměry řádově mm). V řezu součástí dosahují tato zbytková napětí rovnováhy a mají přibližně stejný směr. Jsou odpovědná za makroskopické změny tvaru a vznik trhlin.

II. druhu – Mikroskopická napětí

Jsou homogenní v oblasti srovnatelné s velikostí jednotlivých zrn. Rovnováhy dosahují v oblasti více zrn.

III. druhu – Submikroskopická napětí

Jsou rozlišitelná v rozměrech více meziatomových vzdáleností. Rovnováhy dosahují ve větších oblastech v rámci jednoho zrna. Mohou být odpovědná za mřížkové poruchy (bodové, čárové, plošné). [3]



Obr. 2 Schematické znázornění Makroskopických (σ_I), Mikroskopických (σ_{II}) a Submikroskopických (σ_{III}) napětí jednofázového polykrystalického materiálu [3]

2.3. Vznik

Při výrobě a zpracování materiálu dochází zpravidla vždy ke vzniku zbytkových napětí. Mohou pocházet z různých zdrojů a mohou být již přítomná v neopracovaném materiálu. Vznikají v různých etapách při výrobě a při zatěžování nebo montáži již vyrobené součásti.

Dle mechanismu vzniku lze rozlišovat tyto případy:

Elasticko-plastické deformace vznikají působením síly, která způsobuje plastické přetvoření v části průřezu, zatímco jiná část zůstává namáhána elasticky. Obvykle je povrch deformován již plasticky a jádro zůstává elastické. Z technické plasticity víme, že po překročení meze kluzu a následném odlehčení se těleso již nevrátí do původního tvaru. Odlehčení probíhá po přímce, rovnoběžné s přímkou elastické deformace materiálu. Dosažená deformace tak nezmizí celá, ale pouze její elastická část. Zbývající část deformace je již trvalou, a pokud jí bráníme, zapříčiňuje zbytková napětí. Zbytková napětí poté určíme podle poučky: *Zbytková napětí v součásti vzniklá po odlehčení lze vypočítat jako rozdíl výsledných napětí a hodnot napětí stanovených pro ideální elastické těleso v celém rozsahu zatěžování.* [9]

Což lze formálně zapsat jako:

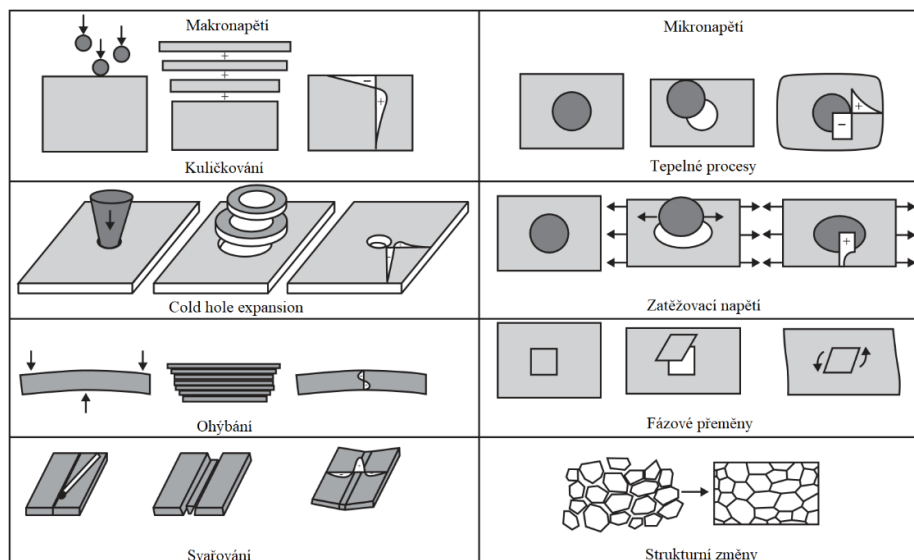
$$\sigma_{zb} = \sigma_{skut.} - \sigma_{el.}^{fikt} \quad (1)$$

Příkladem mohou být technologie jako tažení a válcování za studena, kuličkování, lisování nebo namáhání již používaných součástí (kuličková ložiska, koleje).

Vznik **teplotních gradientů** způsobí změny objemu a při následném nerovnoměrném ochlazování dochází ke vzniku zbytkových napětí. Při vyšších teplotách jsou často doprovázeny fázovými transformacemi, které zapříčiňují změnu měrného objemu, typu krystalické mřížky a mechanických vlastností. Příkladem mohou být tepelná zpracování jako kalení, odlévání a sváření. Vznikají tak obvykle tahová napětí na povrchu a tlaková v jádře.

Chemické procesy, u kterých může docházet k chemickým reakcím pronikajících částic cizích látek do materiálu (difuze, absorpce). Typicky to mohou být procesy jako oxidace, koroze, galvanické pokovování, zinkování nebo žárové stříkání.

Kombinace mechanismů. U většiny výrobních technologií dochází ke kombinaci těchto efektů. Např. u třískového obrábění (soustružení, frézování, broušení) dochází mimo mechanického přetvoření povrchové vrstvy také k tepelnému ovlivnění, které vzrůstá při neideálních podmínkách (opotřebení nástroje, špatné chlazení, velký úběr). [3] [4] [6]



Obr. 3 Příklady vzniku zbytkových napětí při některých typických technologiích, přeloženo z [4]

Přestože se tato práce věnuje měření zbytkových napětí převážně v součástech z kovů, je zde pro názornost uveden i následující příklad vzniku zbytkových napětí v kompozitních materiálech. Když je laminát ochlazován z jeho vytvrzovací teploty vznikají z důvodu tepelně-vlhkostního nesouladu mezi vrstvami zbytková napětí. Tato zbytková napětí závisí na konstrukci laminátu, materiálových vlastnostech vrstev a také na výrobním procesu.

2.4. Důsledky přítomnosti zbytkových napětí

V součástech používaných v technické praxi existuje prakticky téměř vždy určitá zbytková napjatost. Následkem mohou být efekty škodlivé i přínosné, a to v závislosti na smyslu a rozložení ZN.

Mezi negativní následky (zpravidla tahových napětí) patří snížení meze únavy, snížení odolnosti proti křehkému lomu nebo napěťová koroze. Často se lze setkat se vznikem trhlin v tepelně ovlivněné oblasti v okolí svarů při chladnutí.

Pozitivní dopad mohou mít tlaková napětí na únavovou pevnost, zabraňují šíření trhlin.

2.4.1. Statická pevnost

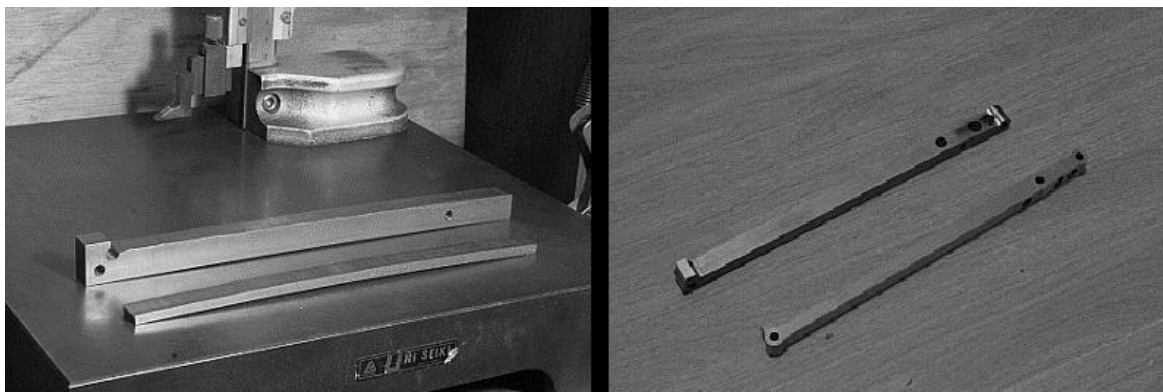
Jelikož jsou tyto napětí v rovnováze, nemusí být jejich existence na první pohled patrná. Avšak musí být brány v potaz stejně jako vložená napětí způsobená zatížením. Tato zbytková napětí je tedy nutno chápat jako předpětí a v oblasti elastické deformace je počítat v superpozici s napětím od zatížení. [1]

2.4.2. Dynamická pevnost a únava

Na rozdíl od statického zatěžování, dynamické zatížení závisí na vlastnostech materiálu v nejnamáhanějším místě. To se nachází u obvyklých případů zatěžování v povrchové vrstvě. Navíc v povrchové vrstvě je únavová citlivost největší, z důvodu nejpravděpodobnějšího výskytu vakantních míst a možnosti deformace zrn. Takto mohou mít pozitivní dopad tlaková napětí vyvolaná v povrchových vrstvách, kde zvyšují životnost dynamicky namáhaných součástí. Zabraňují šíření trhlin. Toho se využívá v technické praxi např. kuličkováním, kdy jsou do povrchové vrstvy vnášena tlaková napětí. Tahová napětí naopak škodí, snižují únavovou pevnost. [1]

2.4.3. Deformace při uvolnění zbytkových napětí

Jak bylo řečeno v kap. 2.1, vnitřní napětí v materiálu jsou v rovnováze. Při narušení rovnováhy se je snaží napětí vykompenzovat a dochází k deformacím materiálu. Tato skutečnost může značně ovlivňovat výsledný tvar součásti, pokud má výroba několik operací a v některé z nich dochází k úběru materiálu nebo tepelnému ovlivnění. Deformace součásti může být v některých případech výrazná, jak je vidět na obr. 4 [7], kdy při výrobě táhla byla na pásové pile odříznuta část polotovaru a v důsledku uvolněných zbytkových napětí se součást ohnula. Po odříznutí druhé symetrické části se součást zpět narovнала. Lze usoudit, že při výrobě polotovaru došlo k značnému vnesení zbytkových napětí. [4]



Obr. 4 Deformace součásti po odříznutí části polotovaru [7]

3. Metody pro měření zbytkových napětí

V dnešní době je již rozšířená řada metod pro měření zbytkových napětí, a to jak experimentálních pro laboratorní použití, tak vhodných do průmyslu. Existují zařízení stacionární i přenosná.

Metody se dají rozdělit dle narušení celistvosti materiálu na:

Destruktivní

Dochází k ovlivnění tělesa, po kterém již není možné jej v praxi využívat nebo k úplnému narušení celistvosti tělesa, při kterém již nemůže plnit svou funkci.

Semidestruktivní

Ovlivněná část je malá a nemá zásadní vliv na funkci a spolehlivost nebo lze způsobené narušení opravit.

Nedestruktivní

Nedochází k ovlivnění celistvosti zkoumaného tělesa. [3]

Další rozdělení lze provést dle fyzikálního principu (konkrétní metody jsou popsány v následných kapitolách):

Mechanické metody

Obvykle se jedná o metody destruktivní nebo semidestruktivní. Jsou založené na uvolnění napětí (projeví se deformací) po odebrání části materiálu. Tyto deformace (relaxace) jsou obvykle elastické, tudíž lze sledovat lineární závislost mezi projevenou deformací a uvolněným zbytkovým napětím. Při některých aplikacích lze velikost a polohu zbytkových napětí určit analyticky, v jiných případech je nutná experimentální kalibrace nebo užití MKP. Použit se dají pouze k určení makroskopických zbytkových napětí, a to jen jejich průměrnou velikost po průřezu odebrané části (vrstvě). Pro materiály s vysokým gradientem zbytkových napětí dostáváme tedy po vrstvách značně rozdílné výsledky. [3]

Difrakční metody

Jsou založeny na rentgenografické difrakci a určují mřížkovou deformaci krystalických materiálů na základě měření Braggových úhlů. Poskytují možnost provádět měření nedestruktivně a měřený předmět nadále využívat. Přístroj musí být tedy přenosný a schopný měřit přímo na zkoumaném tělese, nebo musí být možné těleso přenést k zařízení bez ovlivnění ZN. Zbytková napětí lze vyhodnotit jako rovinnou napjatost v povrchové vrstvě. Pokud je třeba vyhodnotit zbytková napětí pod povrchem je nutné odebírat vrstvy materiálu a vyvarovat se většímu ovlivnění stavu napjatosti. Lze pomocí nich vyhodnotit všechny tři druhy napětí. Nevýhodou jsou nákladné přístroje – difraktometry. Lze také využít synchrotronové nebo neutronového záření, kde je princip stejný, avšak záření může pronikat hlouběji do materiálu. Vybudování a užívání těchto zařízení je však extrémně náročné a nákladné. [5]

Magnetické metody

Vychází ze souvislostí mezi napětím a některými magnetickými vlastnostmi materiálu. Určují všechny tři druhy napětí, ale nejsou schopny mezi nimi rozlišovat. Jsou použitelné pouze pro feromagnetické materiály. Např. metoda určující Barkhausenův šum nebo magnetostrikční metoda. [3] [5]

Ultrazvukové metody

Pracují na změně rychlosti šíření ultrazvukového vlnění v závislosti na přítomném napětí. Určují všechny tři druhy napětí, ale nejsou schopny mezi nimi rozlišovat. [3]

Chemické metody

Využívají změn při chemických reakcích a jejich vztahů s napětím. Příkladem je koroze pod napětím, difuze vodíku. [3]

Optické metody

Ramanova spektroskopie, fotoelastická metoda, Moiré interferometrie [3]

4. Mechanické metody

4.1. Odvrtávací metoda

Metoda spočívá ve vrtání malé díry (obvykle \varnothing 1-4 mm) na povrchu vzorku do hloubky zhruba průměru díry, která vyvolá uvolnění zbytkových napětí. Tato relaxace způsobí deformace v okolí otvoru, které jsou měřeny a z nich je následně vyhodnocováno původní zbytkové napětí. K měření se využívají odporové tenzometry uspořádané do růžice. Progresivní přístupy k měření deformací využívají optické metody. [4]

Metoda bývá nazývána i jako Matharova metoda dle autora Josefa Mathara (Německo, Aachen), který v roce 1934 publikoval a popsal principy zjišťování zbytkových napětí pro jednoosou napjatost. Tato metoda byla i díky vývoji v tenzometrii dále několikrát vylepšena dalšími autory (Soete a Vancrombrugge, Kelsey, Kirsch, Schajer). [4]

Odvrtávací metoda, nebo také metoda postupného odvrtávání, je velmi rozšířenou a oblíbenou z důvodu možnosti rychlého poskytnutí spolehlivých výsledků. Nyní je standardizovaná jako ASTM E837 [10].

Využití metody předpokládá, že ve zkoumané oblasti (tenzometrická růžice) je homogenní zbytková napjatost a hlavní napětí kolmé k povrchu se rovná nule ve všech vrstvách. Z pohledu pružnosti a pevnosti je tedy uvažováno těleso typu stěny. Dále předpokládáme, že před i po vyvrtání otvoru je v oblasti lineárně elastická napjatost. [4]

4.1.1. Teoretické pozadí a principy tenzometrické metody

Teoretické základy pro odvrtávací metodu byly nejprve vypracovány pro průchozí otvor se zbytkovou napjatostí homogenní po tloušťce.

Uvažujme oblast tenké stěny s jednoosou zbytkovou napjatostí σ_x . Napjatost v kterémkoliv bodě $P(R, \varphi)$ lze vyjádřit v polárních souřadnicích jako

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{\sigma_x}{2} \cdot (1 + \cos 2\varphi) \\ \sigma_t &= \frac{\sigma_x}{2} \cdot (1 + \cos 2\varphi) \\ \tau_r &= -\frac{\sigma_x}{2} \cdot \sin 2\varphi\end{aligned}\quad (2)$$

Po vyvrtání malého průchozího otvoru dojde ke změně napětí v jeho okolí. Řešení bylo provedeno G. Kirschem, který vyjádřil napětí v bodě $P(R, \varphi)$ po vyvrtání díry jako

$$\begin{aligned}\sigma_r' &= \frac{\sigma_x}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{r^2}\right) + \frac{\sigma_x}{2} \cdot \left(1 + \frac{3}{r^4} - \frac{4}{r^2}\right) \cos 2\varphi \\ \sigma_t' &= \frac{\sigma_x}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{r^2}\right) - \frac{\sigma_x}{2} \cdot \left(1 + \frac{3}{r^4}\right) \\ \tau_r' &= -\frac{\sigma_x}{2} \cdot \left(1 - \frac{3}{r^4} - \frac{2}{r^2}\right) \sin 2\varphi,\end{aligned}\quad (3)$$

kde $r = \frac{R}{R_0}$, R je vzdálenost bodu P od středu díry, R_0 je poloměr díry a φ je úhel natočení. Změnu napětí z původního stavu do stavu po vyvrtání díry určíme jako rozdíl příslušných napětí

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_r &= \sigma_r' - \sigma_r \\ \Delta\sigma_t &= \sigma_t' - \sigma_t \\ \Delta\tau_r &= \tau_r' - \tau_r\end{aligned}\quad (4)$$

Dosazením rovnic (2) a (3) do rovnice (5) získáme vztah pro uvolněné napětí. Pokud je závislost mezi napětím a deformací lineární, lze dosadit do Hookova zákona pro rovinnou napjatost. Takto získáme uvolněné poměrné deformace v bodě $P(R, \varphi)$ ve tvaru

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= -\frac{\sigma_x(1+\mu)}{2E} \left[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cos 2\varphi + \frac{4}{r^2(1+\mu)} \cos 2\varphi \right] \\ \varepsilon_t &= -\frac{\sigma_x(1+\mu)}{2E} \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \cos 2\varphi - \frac{4\mu}{r^2(1+\mu)} \cos 2\varphi \right]\end{aligned}\quad (5)$$

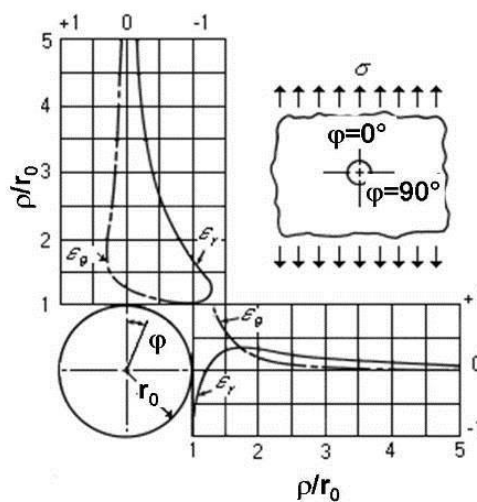
Rovnice (4) lze zapsat ve zjednodušeném tvaru

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \sigma_x(A + B \cdot \cos 2\varphi) \\ \varepsilon_t &= \sigma_x(-A + C \cdot \cos 2\varphi),\end{aligned}\quad (6)$$

kde

$$\begin{aligned}
 A &= -\frac{(1+\mu)}{2E} \left[\frac{1}{r^2} \right] \\
 B &= -\frac{(1+\mu)}{2E} \left[-\frac{3}{r^4} + \frac{4}{r^2(1+\mu)} \right] \\
 C &= -\frac{(1+\mu)}{2E} \left[\frac{3}{r^4} - \frac{4\mu}{r^2(1+\mu)} \right]
 \end{aligned} \tag{7}$$

Z rovnic ve tvaru (5) lze usuzovat, že pro kružnici s poloměrem R má poměrná deformace v tangenciálním i radiálním směru sinusový průběh. Tento průběh je znázorněn na obr. 5 [11]. Plyne z něj, že pro $\varphi = 0^\circ$ (směr osy většího hlavního napětí) je uvolněná radiální deformace ε_r podstatně větší, než tangenciální deformace ε_t . Z toho důvodu jsou používány tenzometrické růžice s radiálně orientovanými mřížkami. Z průběhů je dále zřetelné i nevhodnější umístění tenzometrů, a to pro $r = (2,5 \div 3,4)$.



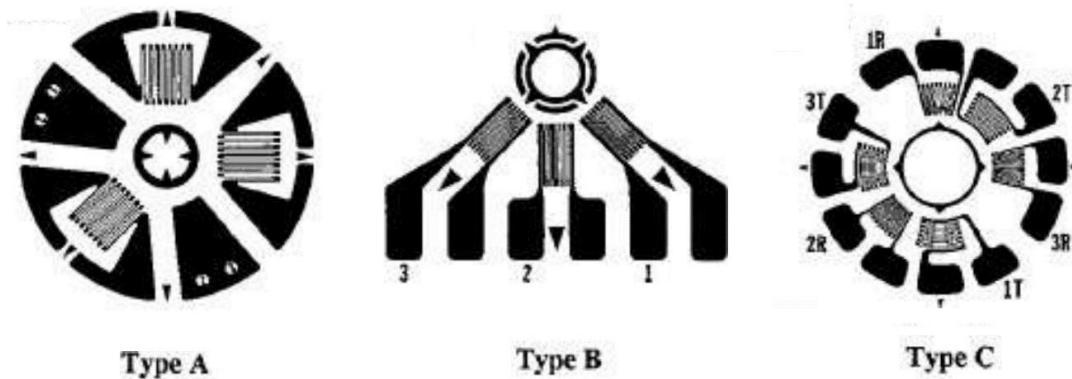
Obr. 5 Závislost uvolněné radiální a tangenciální deformace na vzdálenosti od středu vyvrtané díry [11]

Toto odvození uvažuje jen jednoosou napjatost, avšak v praxi bývá zbytková napjatost obvykle dvouosá. Jelikož předpokládáme lineárně pružný stav materiálu, je možno využít principu superpozice a algebraicky sečíst poměrné radiální deformace ve směru y a x a vyjádřit je jako

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_r &= \varepsilon_r^x + \varepsilon_r^y = \sigma_x(A + B \cdot \cos 2\varphi) - \sigma_y(A - B \cdot \cos 2\varphi) \\
 \varepsilon_r &= A \cdot (\sigma_x + \sigma_y) + B \cdot (\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos 2\varphi.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Pro získání obou hlavních napětí σ_x, σ_y a úhlu φ je nutno experimentálně zjistit hodnoty radiálních deformací pro tři nezávislé směry. Směry mohou být libovolné, avšak směry pootočené o 45° dávají nejjednodušší analytické řešení.

Norma ASTM E837 uvádí tři v praxi používaná uspořádání tenzometrické růžice.



Obr. 6 Schémata uspořádání odporových tenzometrických růžic pro určení zbytkových napětí. [10]

Rovnice (7) představuje základní rovnici k výpočtu zbytkových napětí, avšak pouze pro idealizovaný případ lineárně elastické dvouosé napjatosti homogenního a izotropního tělesa typu stěny. Otvor je uvažován jako malý průchozí a napětí je homogenní po hloubce. [2] [3] [11]

4.1.2. Stanovení kalibračních koeficientů pro slepý otvor a výpočet gradientu napětí

V reálných aplikacích se nelze spokojit s idealizovaným případem, je nutno zahrnout vliv konečné hloubky otvoru. Při vyvrtání slepého otvoru vzniká složitá lokální napjatost, avšak bylo dokázáno, že lze s dostatečnou přesností použít stejné vztahy jako pro otvor průchozí s vhodnými kalibračními koeficienty A a B . Tyto koeficienty určíme buďto experimentální kalibrací nebo numericky s využitím MKP. Při experimentálním zjišťování kalibračních koeficientů se na trhacím stroji vyvodí jednoosá napjatost na zkušebním vzorku. Vzorek je plochý a má rozměry vhodné k vyloučení okrajových efektů. Zkoušky se musí opakovat pro každý druh tenzometrické růžice, každý průměr vrtaného otvoru a materiál. [3] [4]

Pro použití v praxi také nelze uvažovat homogenní průběh napětí po hloubce. Ke stanovení gradientu napětí je možné použít více metod (zde uvedeny tři nejpoužívanější).

Metoda přírůstků deformace (Incremental Strain Method)

Metoda stojí na předpokladu, že přírůstek deformace v každém kroku (odvrtané vrstvě) změřený na povrchu závisí pouze na střední hodnotě zbytkového napětí v dané vrstvě. Metoda tedy nebere v potaz ovlivnění již uvolněných deformací z důvodu zvětšení hloubky otvoru.

Metoda průměrných napětí

Metoda spočívá v tom, že homogenní ekvivalentní zbytkové napětí přes celou hloubku otvoru se rovná průměru homogenních ekvivalentních napětí, působících v rozmezí všech přírůstků hloubek otvoru. Ekvivalentním ZN se rozumí ZN homogenní po celé hloubce otvoru, které způsobí na povrchu po odvrtání uvolnění deformací stejné velikosti jako by způsobilo skutečné nehomogenní napětí.

Integrální metoda (aut. Bijak – Zochowski)

Uvažuje součet velikostí jednotlivých příspěvků uvolněných deformací od jednotlivých zbytkových napětí po celé hloubce otvoru najednou. Průběh má tedy tvar schodovité funkce. Podstatné pro tuto metodu je stanovení matice kalibračních činitelů, kde každá dvojice činitelů odpovídá jedné odebrané vrstvě. [3] [4]

Dále používané metody jsou např. metoda ekvivalentních homogenních napětí, metoda mocninné řady nebo metoda příčinkových funkcí.

4.1.3. Zhodnocení a vhodnost použití

Pro dosažení přesných výsledků platí tyto faktory a omezení:

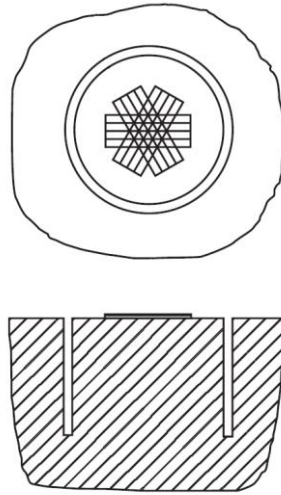
- Vnesená napětí při vrtání musí být co nejmenší, což vytváří požadavek na ostrý nástroj vhodný k vytvoření otvoru.
- Při vrtání díry je třeba dbát na excentricitu díry a stanovení nulové polohy.
- Nutné je také pečlivé nalepení tenzometrické růžice. Povrch musí být přiměřeně rovný a hladký.
- Předpokladem pro tuto metodu je homogenní stav napjatosti v oblasti měření. Např. v blízkosti svarů toto nemusí být splněno.
- Zjišťování velkých gradientů napětí po hloubce vyžaduje postupovat po malých přírůstcích hloubky. Doporučuje se 0,05 – 0,1 mm.
- Vzhledem k materiálu je metoda univerzální, avšak je nutné znát materiálové konstanty (μ, E) a aby byl materiál dostatečně homogenní a izotropní.
- Metoda klade střední nároky na zkušenosti a schopnosti operátora.

Obecně lze říci, že při dodržení všech náležitostí při instalaci tenzometru, vrtání díry, měření a správné interpretaci dat je odvrtávací metoda schopna poskytnout přesné výsledky. Vzhledem k materiálu je poměrně univerzální. Lze ji využít jak k laboratornímu měření, tak i při měření na součástech nacházejících se na pracovišti. [3] [4] [11]

4.2. Metoda sloupku

Při této metodě je odebrání materiálu docíleno odfrézováním mezikružím. Vytvoří se tak sloupek, na kterém se měří deformace pomocí přilepené tenzometrické růžice. Oproti odvrtávací metodě tvar odebrané části vytváří náročnější požadavky na konstrukci

přístroje, je nutné zajistit neustálé připojení tenzometrů. Metodu lze použít také k vyšetřování gradientu zbytkových napětí po hloubce, avšak je nutné znát kalibrační koeficienty zjištěné buďto experimentálně nebo pomocí MKP.



Obr. 7 Metoda sloupku [4]

Tuto metodu lze zařadit mezi polodestruktivní, avšak dochází k narušení větší oblasti a je proto vhodná pro součásti větších rozměrů. V porovnání s odvrtávací metodou dosahuje metoda sloupku lepší citlivosti a nejsou kladeny takové nároky na přesnost rozměrů a tvaru. [3] [4]

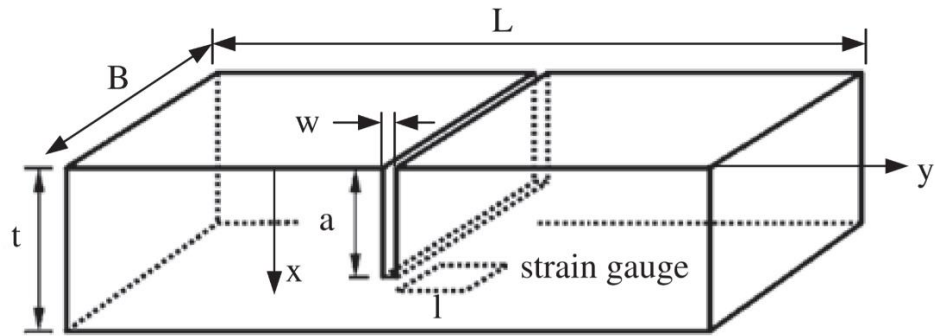
Za zmínku dále stojí metoda vrtání hlubokých děr (Deep hole drilling method), která je zvláštní kombinací odvrtávací metody a metody sloupku. Měříme při ní pomocí speciální sondy deformace v hluboké díře během odebrání mezikruží (vytváření sloupku). Výhodou této metody je schopnost zjišťování ZN hluboko pod povrchem. Uplatnění nalézá při vyšetřování ZN ve velkých skalních masách. [4]

4.3. Dělicí metoda

Dělicí metoda (Slitting method) umožňuje měření zbytkového napětí kolmého na rovinu provedeného řezu součástí. ZN zjišťujeme pomocí měření deformací vyvolaných odstraněním části, a to lze pro některé případy provést analyticky nebo s využitím MKP.

Tato metoda nalézá využití při laboratorním měření, neklade vysoké nároky na vybavení a dosahuje dobré opakovatelnosti. [12]

Na obr. 8 [12] je znázorněna typická aplikace této metody, kdy je do součásti tvaru kvádrů vytvořena inkrementálně drážka (nejčastěji elektroerozivním obráběním). V tomto uspořádání jsou uvolněné deformace měřeny na opačné straně pomocí můstkového tenzometru, což je vhodné pro měření zbytkových napětí po hloubce. Pro měření napětí blízko na povrchu je vhodnější uspořádání s tenzometry na stejné straně jako je vytvořená drážka.



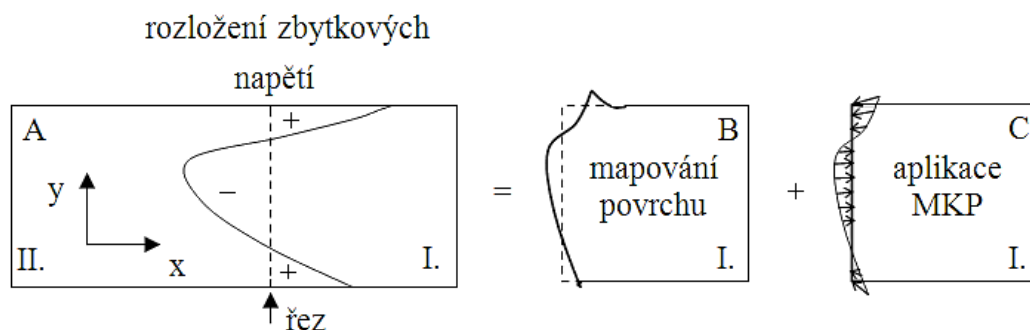
Obr. 8 Typické uspořádání měření dělicí metodou [12]

Metoda je vhodná pro zjišťování zbytkových napětí měnicích se po hloubce roviny provedeného řezu, které se výrazně neliší po šířce roviny. Metoda je z důvodu potřeby technologie k vytváření drážky, při které dojde k minimálnímu ovlivnění materiálu, využitelná pro laboratorní měření. Dělicí metoda je necitlivá ke změnám v mikrostruktuře, nalézá značné využití při měření ZN v kompozitech. [12]

4.4. Metoda kontur

Metoda kontur je perspektivní měřicí technika pro mapování zbytkových napětí v normálovém směru k provedenému řezu. Je vcelku nová, poprvé byla představena v roce 2000. Je nutné provést řez celým průřezem součásti, metoda je tedy zcela destruktivní.

Princip spočívá v provedení kompletního řezu součástí, čímž dojde k uvolnění zbytkových napětí, která se projeví deformacemi na obou plochách řezu. Tyto deformace jsou následně změřeny na CMM dotykovou sondou nebo laserem. Data získaná z obou ploch jsou zprůměrována a vložena do MKP modelu součásti. Následně se realizuje MKP analýza modelu totožného tvaru zkoumaného vzorku s posunutími v rovině řezu získanými z měření viz obr. 9 [6]. Za předpokladu elastických deformací a znalosti původního tvaru lze zpětně zjistit rozložení zbytkových napětí v normálovém směru k ploše řezu. [6]



Obr. 9 Princip metody kontur [6]

Stejně jako u jiných mechanických metod se předpokládá, že se materiál při řezání chová pružně a technologie řezání sama o sobě nevnáší napětí do povrchu řezu. Dále jsou kladeny vysoké nároky na rovinnost provedeného řezu a konstantní šířku úběru. V praxi je technologie řezání nejvýznamnějším přispěvatelem nejistoty. Používá se

elektroerozivního obrábění s drátovými elektrodami (Wire EDM), jelikož mezi nástrojem a obrobkem nepůsobí mechanické síly. Princip elektrojiskrového obrábění spočívá ve využití řízeného elektrického oblouku vzniklého mezi elektrodou a obráběným dílem, který pomalu odebírá materiál. Elektroeroze se jeví jako nejvhodnější technologie, avšak limituje nás použitelnými materiály vzorku, a to pouze na elektricky vodivé materiály. [6] [4]

Metoda se opírá o Buecknerův princip superpozice, který nevyžaduje, aby materiál byl izotropní či homogenní, přestože je to ve většině případů splněno. Pouze předpokládá elastické chování. Je možné do MKP analýzy zanést rozdílné vlastnosti v částech průřezu. Toto lze využít například u vyšetřování ZN ve svarech a jejich okolí.

Chyby lze rozdělit na symetrické a antisymetrické. Antisymetrické lze odstranit průměrováním a vyhlazením. Výsledky v okolí okrajů součásti je nutné brát s vysokou nejistotou z důvodu vyboulení vzorku. Tato chyba je symetrická, lze ji částečně minimalizovat tuhým upnutím, dostatečně blízko řezu. [4] [5] [6]

5. Difrakční metody

5.1. Rentgenová difrakční tenzometrie

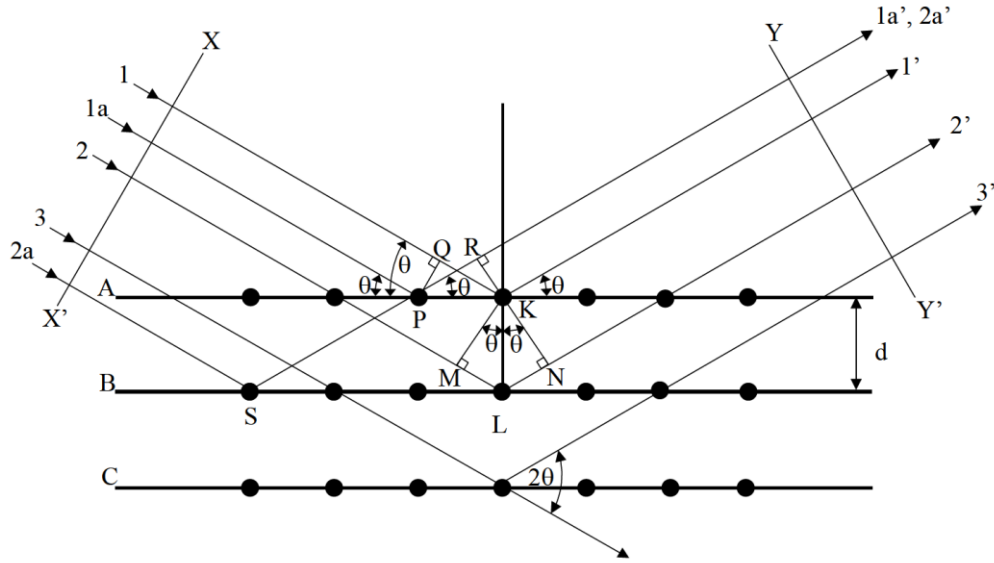
5.1.1. Teoretické pozadí a principy rentgenové difrakční tenzometrie

Podstatou rentgenové difrakce (XRD) je určení mřížkových deformací (změn vzdáleností atomových mřížkových rovin) a jejich přepočtu na napětí pomocí vztahů lineární teorie elasticity. Využívá se při tom rozptylu (neboli difrakce) rtg paprsků na krystalech.

Uvažujme materiál s krystalickou strukturou, který se skládá z mnoha krystalů, který může být definována jako *pevná látka složená z atomů uspořádaných do ve třech směrech periodického vzoru*. [13] [1]

V roce 1912 analyzoval W.L. Bragg výsledky z experimentů prováděných německým fyzikem von Laue, při kterých byl vložen vzorek krystalické látky do dráhy rentgenového paprsku. Dále byly uspořádány fotografické desky, aby zachytily všechna odražená záření na kterých se po experimentu vytvořil vzor skvrn. Odražené záření bylo výrazněji zaznamenáno tam, kde došlo ke konstruktivní interferenci. Bragg formuloval podmínky, za kterých ke vzniku těchto interferenčních maxim dochází. [13]

Abychom vysvětlili Braggův zákon, nejprve uvažujme jednu rovinu atomů (řádek označen A na obr. 10). Paprsky 1 a 1a narazí na atomy K a P a jsou rozptýleny ve všech směrech. Pouze ve směrech 1' a 1a' jsou rozptýlené paprsky ve fázi, a dochází ke konstruktivní interferenci. Paprsky jsou ve fázi, jelikož vzdálenosti mezi rovinami (vlnoplochy) XX' a YY' jsou pro ně stejné. Zesílení tedy nastane, pokud dopadající a odražené paprsky svírají s atomovou rovinou A stejný úhel, zde označen θ . [13] [3]



Obr. 10 Difrakce rentgenových paprsků na krystalové mřížce. [13]

Veškeré paprsky, které jsou rozptýleny atomy ve stejné rovině a rovinách s ní rovnoběžnými, budou také ve fázi a tím zvýší intenzitu odraženého (difraktovaného) paprsku. Vzájemný posun paprsků 1 a 2 vyplývá z obr. 10.

$$ML + LN = d \sin\theta + d \sin\theta \quad (9)$$

Požadavek pro konstruktivní interferenci paprsků rozptýlených atomy v různých rovinách lze formulovat jako podmínku, aby se vzájemný posun paprsků rovnal celočíselnému násobku vlnové délky. Takto dostáváme formulaci známou jako Braggův zákon [13]

$$n\lambda = 2d \sin\theta, \quad (10)$$

kde n je celé číslo, λ je vlnová délka záření, d je vzdálenost rovin a θ je Braggův úhel. Mřížková deformace je definována jako poměrná změna meziatomové vzdálenosti

$$\varepsilon_{mř} = \frac{d_{\varphi,\psi} - d_0}{d_0} = \frac{\Delta d}{d_0}. \quad (11)$$

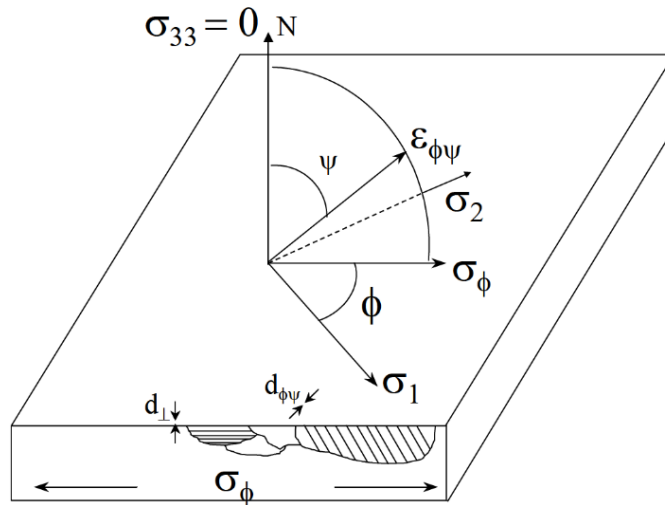
Při změně vzdálenosti rovin dojde ke změně Braggova úhlu podle Braggova zákona. Pokud zdiferencujeme rovnici (10), přičemž λ budeme považovat za konst. dostáváme

$$\begin{aligned} \partial\lambda &= 2 \partial d \sin\theta + 2d \partial\theta \cos\theta \\ 0 &= \partial d \sin\theta + d \partial\theta \cos\theta. \end{aligned} \quad (12)$$

Z rovnic (11) a (12) můžeme vyjádřit mřížkovou deformaci

$$\varepsilon_{\varphi,\psi}^{mř} = \frac{\partial d}{d_0} = -\partial\theta \cot\theta = -\cot\theta_0 (\theta_{\varphi,\psi} - \theta_0) = \varepsilon_{\varphi,\psi}, \quad (13)$$

kde $\varepsilon_{\varphi,\psi}$ je deformace ve směru definovaném úhly φ, ψ viz obr. 11.



Obr. 11 Schéma difrakčních rovin daných úhly φ, ψ v systému souřadnic spojeném se vzorkem [13]

Pro určení deformací využíváme předpokladu, že jsme oprávněni ztotožnit rentgenograficky měřené mřížkové deformace s deformacemi, které lze podle teorie elasticity očekávat ve směru φ, ψ , což lze také formulovat jako rovnici (13). [4] [13]

K popsání obecného stavu napjatosti potřebujeme znát všech devět (šest nezávislých) složek symetrického tenzoru druhého řádu.

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Vztah mezi složkami tenzoru napětí a deformace je dán rozšířeným Hookovým zákonem

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1 + \mu} \left[\varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \frac{\mu}{1 - 2\mu} (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \right], \quad (15)$$

kde E je Youngův modul elasticity a μ je Poissonovo č., $\delta_{ij} = 1$ pro $i=j$ a $\delta_{ij} = 0$ pro $i \neq j$.

Transformací tenzoru deformace (transformační matice pro úhly φ a ψ) dostáváme vztah

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = [\varepsilon_{11} \cos^2 \varphi + \varepsilon_{12} \sin 2\varphi + \varepsilon_{22} \sin^2 \varphi] \sin^2 \psi + [\varepsilon_{13} \cos \varphi + \varepsilon_{23} \sin \varphi] \sin 2\psi + \varepsilon_{33} \cos^2 \psi. \quad (16)$$

Využitím Hookova zákona a dosazením za deformace do (16) dostáváme

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\varphi,\psi} = & \frac{\mu + 1}{E} (\sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi) \sin^2 \psi + \\ & + \frac{\mu + 1}{E} \sigma_{33} \cos^2 \varphi + \frac{\mu + 1}{E} (\sigma_{13} \cos \varphi + \sigma_{23} \sin \varphi) \sin(2\psi) - \\ & - \frac{\mu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) . \end{aligned} \quad (17)$$

Pokud se spokojíme s předpokladem dvouosého stavu napjatosti v rovině povrchu (všechny složky tenzoru (14) kromě σ_{11} a σ_{22} budou nulové), tak rovnice (16) degraduje na

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{1 + \mu}{E} (\sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi) \sin^2 \psi - \frac{\mu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) . \quad (18)$$

Byly zavedeny tzv. rentgenografické elastické konstanty závislé na modulu pružnosti v tahu a Poissonově čísle, které představují konstanty v obou členech rovnice (17)

$$\begin{aligned} s_1 &= -\frac{\mu}{E} \\ \frac{1}{2} s_2 &= \frac{(1 + \mu)}{E} . \end{aligned} \quad (19)$$

Pro účely rentgenové tenzometrie se využívá rovnice (18) ve tvaru upraveném dosazením těchto konstant. Tyto materiálové konstanty je s ohledem na elastickou anizotropii vhodnější vyšetřovat experimentálně pro každý systém rovin (hkl) samostatně, než výpočtem z modulu pružnosti v tahu a Poissonova čísla. [13]

Vzdálenost rovin v krystalické mřížce se mění pouze elastickou deformací, a nikoliv deformací skluzem. Tato metoda tak detekuje pouze změny mezirovinných vzdáleností způsobené elastickým mechanickým napětím.

5.1.2. Metoda $\sin^2\psi$

Nejčastěji používanou metodou pro stanovení napětí je metoda $\sin^2\psi$. Ve zvoleném směru φ se provede několik měření při různých náklonech ψ (viz obr. 11). Zaznamenají se hodnoty mezirovinné vzdálenosti $d_{\varphi=\text{konst},\psi}$, které odpovídají naměřeným hodnotám difrakčních úhlů $\theta_{\varphi=\text{konst},\psi}$. Při znalosti mezirovinné vzdálenosti v nenapjatém stavu d_0 lze po proložení dat vynést lineární závislost $\varepsilon_{\varphi=\text{konst},\psi} - \sin^2\psi$.

Za hodnotu d_0 lze s dostatečnou přesností považovat $d_{\psi=0^\circ}$ (deformaci kolmou k povrchu považujeme za nulovou), což je patrné z obr. 12 nebo hodnotu tabelovanou pro daný typ materiálu případně hodnotu experimentálně zjištěnou.

Pokud do rovnice (18) dosadíme vyjádření napětí odpovídající úhlu φ

$$\sigma_\varphi = \sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \cdot \sin^2 \varphi , \quad (20)$$

dostáváme

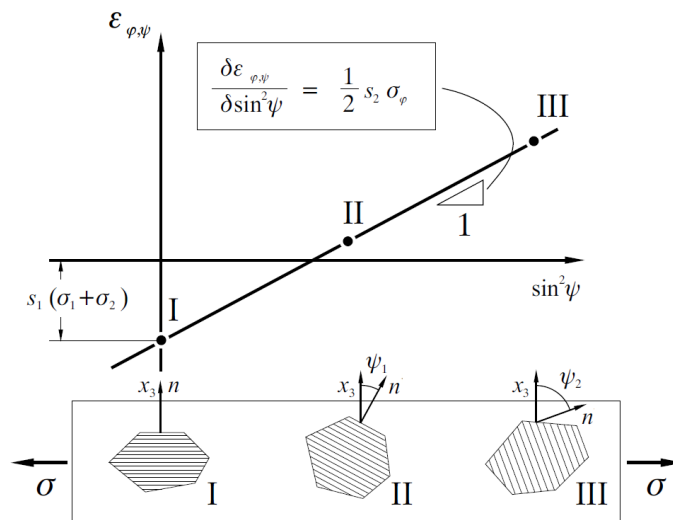
$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{1}{2} \cdot s_2 \cdot \sigma_{\varphi} \cdot \sin^2 \psi + s_1 (\sigma_x + \sigma_y). \quad (21)$$

Tato rovnice nám umožňuje vypočítat napětí v libovolném směru φ z mezivínné vzdálenosti určené ze dvou měření provedených v rovině kolmé k povrchu a ve směr zjišťovaného napětí. Dále je možné sledovat, že pro každý úhel φ existuje lineární závislost mezi $\varepsilon_{\varphi\psi}$ a $\sin^2 \varphi$. Jak je znázorněno na obr. 12 pro $\varphi = \text{konst}$ tvoří naměřená data po proložení přímkou. Sklon proložené přímkou odpovídá

$$\frac{\partial \varepsilon_{\varphi,\psi}}{\partial \sin^2 \varphi} = \frac{(1 + \mu)}{E} \sigma_{\varphi} \quad (22)$$

a počátek představuje

$$\varepsilon_{\varphi,\psi=0} = -\frac{\mu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2). \quad (23)$$



Obr. 12 Závislost $\varepsilon_{\varphi\psi} - \sin^2 \varphi$. Princip měření napětí metodou $\sin^2 \varphi$ [13]

Napětí v libovolném směru lze poté při znalosti materiálových konstant stanovit z grafu výpočtem gradientu přímkou viz rce (22). Při znalosti napětí σ_{φ} , $\sigma_{\varphi+90^\circ}$, $\sigma_{\varphi+45^\circ}$ a vztahu

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_{\varphi} + \sigma_{\varphi+90^\circ} = \sigma_{\varphi-45^\circ} + \sigma_{\varphi+45^\circ}, \quad (24)$$

který vyplývá z rovnice (18), lze určit velikosti a směr hlavních napětí.

Metodu $\sin^2\psi$ a její další variace je možné v praxi korektně použít pouze tehdy, jsou-li v objemu, ve kterém zjišťujeme zbytková napětí, splněny následující předpoklady:

- po povrchu i po hloubce homogenní dvouosý stav napjatosti (při nesplnění dostáváme nelineární závislost $\varepsilon_{\varphi,\psi} - \sin^2\psi$)
- směry souřadného systému hlavních napětí (osy elipsoidu napětí) jsou rovnoběžné s povrchem vzorku
- homogenita materiálu – v praxi je nutno brát v úvahu při zpracování naměřených dat
- izotropní materiál [4] [13]

5.1.3. Určení gradientu napětí

Při nehomogenní napjatosti po hloubce dostáváme nelineární závislost $\varepsilon_{\varphi,\psi} - \sin^2\psi$. Z jejího zakřivení lze určit gradient. Změnu zbytkového napětí jako funkci hloubky lze pomocí difrakčních metod určit také ve spojení s metodami schopnými odebrání vrstev materiálu. Využívá se metod, při kterých nedochází k výraznému ovlivnění stavu napjatosti. Jakékoli mechanické obrábění používané k odstranění povrchových vrstev tuto podmínku nesplňuje. V praxi se využívá metody elektrolytického rozpouštění. Odstranění vrstvy materiálu lze dosáhnout ponořením kovového vzorku do nádrže obsahující směs kyselin nasycených solemi kovů. Poté, co je do nádrže vložena katoda a anoda, prochází roztokem a vzorkem proud. Po určité době se vzorek z nádrže vyjme a omyje. Tento proces se běžně používá pro elektrochemické leštění ve velkém měřítku. V laboratorním měřítku je roztok a proud aplikován lokálně na vyšetřovanou oblast. Velikost odebrané vrstvy se řídí prvním Faradayovým zákonem. Lze také použít chemické odleptávání tenkých vrstev. [13]

5.1.1. Zhodnocení a vhodnost použití

Rentgenová difrakce nám poskytuje velmi efektivní způsob nedestruktivního vyšetřování krystalických vzorků. Metoda patří k náročnějším z hlediska provedení experimentu a interpretace výsledků měření. Stroje a vybavení potřebné k provedení experimentu kladou vysoké nároky na obsluhu i na finanční stránku.

Specifické vlastnosti rentgenové difrakční tenzometrie:

- Informace o napjatosti v materiálu jsou v tloušťce $10^{-2} - 10^{-3}$ mm (povrchová vrstva).
- Omezení pouze na krystalické materiály nebo jejich fáze (kovové i nekovové).
- Data lze získat z malé části povrchu. Lze stanovit napětí na jednotlivých složkách vícefázových soustav.
- Vzdálenost rovin mění pouze elastická deformace nikoliv skluz, detekujeme pouze elastická mechanická napětí.
- Možnost rozlišení mezi zbytkovými napětími I. a II. druhu (makroskopická napětí způsobí změnu polohy difrakčních linií, mikroskopická se projeví rozšířením linií).

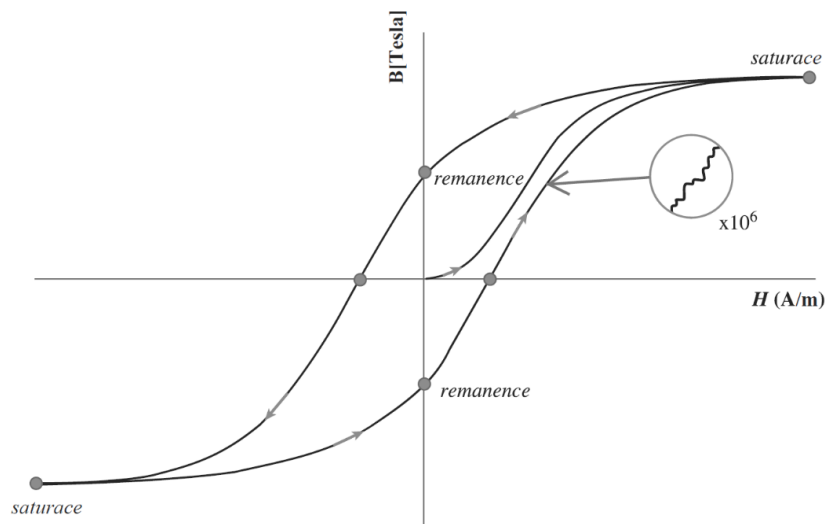
- Při spojení s metodou elektrolytického rozpouštění lze stanovit gradient napětí s hloubkou po přírůstcích.
- Metoda klade značné nároky na interpretaci dat. Věrohodnějších výsledků dosáhneme při bližší znalosti povahy stavu napjatosti. [4] [13]

6. Magnetické metody

6.1. Teoretické pozadí magnetických metod

Barkhausenův šum by poprvé popsán v roce 1919 prof. H. G. Barkhausenem, který při svém experimentu pozoroval praskání v reproduktoru po přiblížení či vzdálení magnetu od jádra. Další výzkum ukázal, že tento šum souvisí s nespojitostmi v procesu magnetizace feromagnetického materiálu.

Feromagnetické látky jsou přirozeně magnetické a mohou být magnetizovány vystavením magnetickému poli, například z elektromagnetické cívky. Obr. 13 ukazuje typickou nelineární závislost mezi magnetickou indukcí B a intenzitou aplikovaného magnetického pole H . Provedením jednoho cyklu magnetování získáme hysterezní smyčku. Diagram ilustruje charakteristický tvar křivky s nasycením magnetické indukce při vysokých kladných a záporných hodnotách intenzity magnetického pole a remanentní (zbytkovou) magnetizaci při odeznění magnetického pole.



Obr. 13 Hysterezní smyčka, přeloženo z [4]

Kromě toho, že závislost není lineární, není odezva (magnetizace) ani plynulá. Indukovaný magnetismus reaguje na aplikované magnetické pole v malých nepravidelných skocích odpovídajících magnetickým změnám v malých oblastech materiálu. Tyto oblasti, kde atomární dipóly jsou seřazeny do stejného směru, se nazývají Weissovy domény. Každá doména je magnetizována podél krystalografického směru snadné magnetizace. Například u železa α je to ve směru hrany elementární krychlové buňky (1,0,0). Domény jsou od sebe odděleny doménovými stěnami, na kterých se mění orientace jednotlivých dipólů. Při

absenci magnetického pole jsou magnetické domény náhodně orientovány, což činí celkovou magnetizaci materiálu nulovou. Pokud je materiál vystaven magnetickému poli, mají magnetické domény tendenci se srovnávat ve směru magnetického pole. Doména, která má orientaci nejbližší magnetickému poli, zvětšuje svou velikost pohybem doménových stěn, a to na úkor ostatních domén. Pokud působící magnetické pole neustále zvyšujeme, nastává bod, kdy se veškeré magnetické domény orientují rovnoběžně s působícím magnetickým polem. Tento stav nazýváme saturací. Při snížení intenzity magnetického pole na nulu mají magnetické domény tendenci vrátit se zpět do původního stavu. Avšak prvky jako precipitáty, hranice zrn, vměstky nebo dislokace brání pohybu stěny domény a energie je vynaložena na jejich překonání. Materiál se tedy nevrátí do původního stavu a my sledujeme hysterezi ve formě zbytkové magnetizace. Výdaje energie vedou ke skokové změně magnetizace materiálu, kterou lze přímo pozorovat na hysterezní smyčce. Tyto skoky generují signál zvaný Barkhausenův šum. [4] [14] [16]

6.2. Barkhausenův šum

Metoda nám poskytuje komplexní informaci o stavu materiálu v povrchové vrstvě. Signál je tlumen vlivem vířivých proudů indukovaných měnícím se magnetickým polem. Závislost útlumu signálu na hloubce je exponenciální. Ovlivňuje jej především magnetická permeabilita, el. vodivost materiálu a frekvence magnetického pole.

Intenzitu signálu Barkhausenova šumu ovlivňují dvě důležité charakteristiky materiálu. Jednou z nich je přítomnost a rozložení elastických napětí. Ty mají dopad na cestu, po které se domény ubírají směrem ke snadnému směru magnetizace. Tento jev se nazývá magnetoelastická interakce. V důsledku magnetoelastické interakce tlaková napětí snižují intenzitu šumu, zatímco tahová napětí ji zvýší (uvažujeme materiál s pozitivní magnetostrikcí např. Fe, Co, většina ocelí).

Další důležitou materiálovou charakteristikou ovlivňující Barkhausenův šum je metalurgická mikrostruktura vzorku. Tento vliv lze obecně popsat z hlediska tvrdosti, intenzita šumu v mikrostrukturách charakterizovaných zvyšováním tvrdosti klesá. Děje se tak v důsledku bránění pohybu doménových stěn na mřížkové úrovni. Lze takto detekovat většinu běžných povrchových vad např. oduhličené nebo nezakalené oblasti či spáleniny po broušení.

Primárně nejsme schopni touto metodou měřit přímo zbytková napětí. Výstupem při měření je veličina nazývaná magnetoelastický parametr (MP). MP odpovídá amplitudě získaného signálu buzeného střídavým elektromagnetickým polem. Pro získání informace o stavu zbytkových napětí je nutné provést kalibraci – získat kalibrační křivku. Kalibrace se provádí pro vzorek daného druhu materiálu, pokud možno i se stejným tepelným zpracováním. Kalibrace se obvykle realizuje na kalibračním zařízení, kdy je při namáhání vzorku měřeno napětí pomocí tenzometrů a současně metodou Barkhausenova šumu hodnota MP. [4] [14] [16]

6.2.1. Zhodnocení a vhodnost použití

Metoda Barkhausenova šumu patří mezi nedestruktivní. Nevýhodou je omezení pouze na feromagnetické materiály. Čas měření je krátký, v řádu pár sekund. Metoda je proto vhodná pro kontrolu dílů při sériové výrobě. Změřený MP vypovídá o celkové struktuře a vlastnostech dílu, lze dle něj detekovat změny stavu zbytkových napětí, tvrdosti a mikrostrukturní vady. Dle aktuálních hodnot lze poté i upravovat podmínky výrobního procesu (zpětná vazba). Při každé změně ve výrobě (technologické podmínky, materiály) je nutné provádět kalibraci a stanovit přípustné hodnoty MP. Měřicí hloubka se liší dle materiálu a frekvence generovaného signálu obvykle mezi 0,01 – 1 mm. [4]

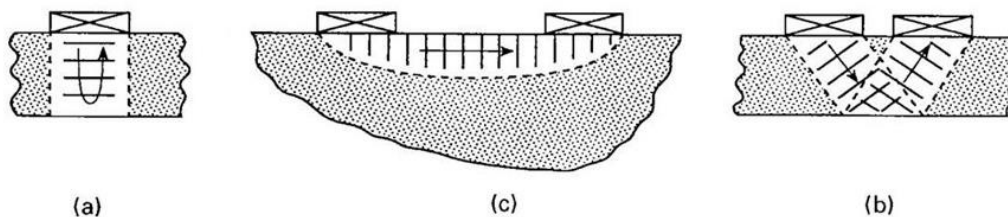
7. Ultrazvukové metody

Měření pomocí ultrazvukových metod je založeno na akustickoelastickém jevu, podle kterého je rychlost šíření vlnění v pevných látkách závislá na přítomném mechanickém napětí.

Rozlišujeme dva typy vlnění – objemové, které se šíří v neomezeném prostředí všemi směry a povrchové, které se šíří pouze poblíž daného rozhraní. Z objemových využíváme vlny podélné, u kterých částice kmitají podél směru šíření (deformace objemu) a příčné, kdy částice kmitají v rovině kolmé ke směru šíření (deformace tvaru). Povrchové vlny užíváme Rayleighovy, u kterých se částice pohybují kolmo ke směru šíření po povrchu a pod povrchem do hloubky rovné přibližně vlnové délce.

Pro měření zbytkových napětí lze použít různé uspořádání ultrazvukových sond kterým odpovídají výše zmíněné druhy vln a způsob, jakým zbytková napětí měříme.

Uspořádání, ve kterém se pro přijímání i vysílání ultrazvukových vln používá stejná sonda se nazývá pulse-echo (obr. 14a). Uplatňují se při ní podélné vlny. V tomto případě jsme schopni určit průměr zbytkových napětí přes celou tloušťku materiálu. Uspořádání na obr. 14b a 14c se nazývá pitch-catch.



Obr. 14 Uspořádání ultrazvukových metod, pulse-echo (a), pitch-catch (b) (c) [15]

Při užití příčného vlnění jsme schopni z rozdílu rychlostí dvou vln polarizovaných kolmo na směr šíření určit rozdíl hlavních napětí. Konfigurace s Rayleighovými vlnami nám umožňuje získat informaci o průměrné hodnotě zbytkových napětí v omezené hloubce. Tuto hloubku můžeme přizpůsobit změnou frekvence vlnění a tím vyšetřit gradient napětí. Hloubka penetrace pro obvyklé aplikace a materiály dosahuje až několika milimetrů. [3] [4]

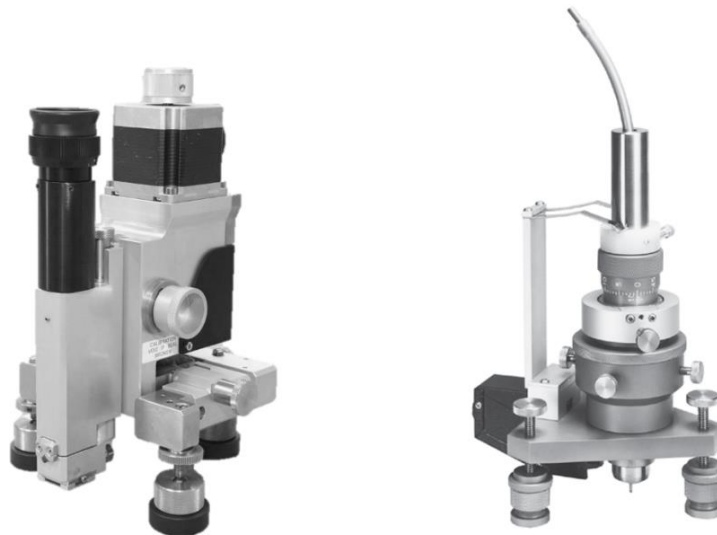
Nejistota při použití ultrazvuku k měření zbytkových napětí mimo jiné vzniká při určování rychlosti ultrazvuku. Ta není ovlivněna pouze napětím, ale i mnoha dalšími mikrostrukturálními vlastnostmi jako je velikost zrna, existence dalších fází, krystalická struktura nebo poruchy. Přítomnost těchto faktorů se negativně podepisuje na určení zbytkových napětí a zatím je nelze efektivně odfiltrovat. Výhodné jsou časy měření, které dosahují maximálně několika sekund. Velikost vyšetřovaného objemu se pohybuje v řádu jednotek mm³. [3] [4] [15]

8. Zařízení užívaná v praxi

Odvrtávací zařízení

K odvrtání otvoru ve středu tenzometrické růžice jsou využívána speciální vrtací zařízení. Ta obvykle spolu s dalším příslušenstvím poskytují tyto funkce:

- vysokorychlostní pohon se sklíčidlem nebo kleštinou pro uchycení vrtacího nástroje,
- odvrtání otvoru s přesnou geometrií a minimálními vnesenými napětími,
- zařízení pro ustavení polohy osy nástroje do středu tenzometrické růžice,
- zajištění posuvu frézy a odečítání hloubky,
- upevnění celého vrtacího zařízení pevně vzhledem ke vzorku,
- změření skutečného průměru otvoru,
- odečítání deformací po odvrtání otvorů (získání dat z tenzometrů),
- zpracování získaných dat.



Obr. 15 Zařízení pro odvrtávání otvorů SINT MTS3000 – Restan (vlevo) a Micro-measurements RS-200 (vpravo) [17] [18]

SINT MTS3000 – Restan

Pohon je u tohoto přístroje řešen vzduchovou turbínou. Otáčky nástroje jsou udávány až 400 tis. ot/min. Přesné umístění otvoru je zajištěno zaměřovacím mikroskopem a mikrometrickými šrouby. Pro ovládání hloubky vrtání je využit krokový motor. Počítač řídí vzduchovou turbínu a hloubku vrtání. Když je vhodně propojen s tenzometry zaznamenává uvolněné napětí. Výrobce doporučuje, aby velikost díry nepřesahovala 2 mm, a to jak v průměru, tak i do hloubky. Přístroj umožňuje excentrické upevnění vrtacího motoru v jeho držáku tak, aby vrtal orbitálním pohybem. Tímto způsobem dosáhneme menšího opotřebení nástroje a nižších vnesených napětí. [17]

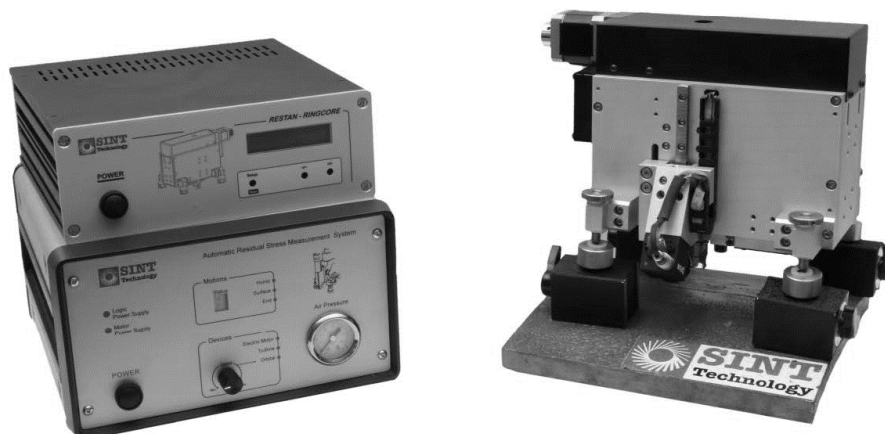
Micro-Measurements RS-200

Tento přístroj také používá motor se vzduchovou turbínou a odnímatelný zaměřovací mikroskop. Hloubka vrtání se ovládá ručně pomocí mikrometrického šroubu umístěného kolem pouzdra vrtáku. [18]

Zařízení pro metodu sloupku

SINT MTS3000 – Ringcore

Jednou z hlavních výhod metody sloupku je její větší citlivost a menší vliv chyby excentricity, jelikož ta má tendenci se sama kompenzovat. Další výhodou je možnost stanovit gradient napětí do větších hloubek, výrobce uvádí hloubku až 5 mm. Nevýhodou je poškození větší části materiálu. U tohoto typu je větší průměr odvrtného mezikruží 18 mm. Odvrtávání je docíleno nástrojem, který by se dal popsat jako dutá fréza. Kabely od tenzometrické růžice jsou zakryty a vedou vnitřkem nástroje. Zajímavostí je kamera a laserový kříž na spodní ploše zařízení, které jsou určeny k vystředění osy nástroje. Vlastní proces vrtání je řízen automaticky, uživatel si zvolí pouze požadovanou hloubku drážky a počet úběrů. Celý systém se skládá z vrtacího zařízení, elektronické řídicí jednotky, digitálního zesilovače signálu z tenzometrů a osobního počítače ke zpracování výsledků. [19]



Obr. 16 Zařízení pro metodu sloupku SINT MTS3000 – Ringcore, řídicí jednotka (vlevo) a vrtací zařízení (vpravo) [19]

Aplikace tenzometrů na vzorek

Takřka všechny mechanické metody využívají tenzometrů. U nich je zásadní správně provedená instalace. Proto bych uvedl pár základních kroků při lepení snímačů:

- příprava povrchu vzorku (vyčištění, odmaštění, zdrsnění),
- vyznačení pozice a lepení tenzometrické růžice,
- pájení kabelů,
- zakrytí holých drátů a povrchu tenzometrů ochranou vrstvou,
- zapojení a testování měřicího obvodu.

RTG Difraktometry

Difraktometry používané pro měření zbytkových napětí jsou v zásadě konstrukčně stejné, jako práškové difraktometry, liší se však následujícími způsoby.

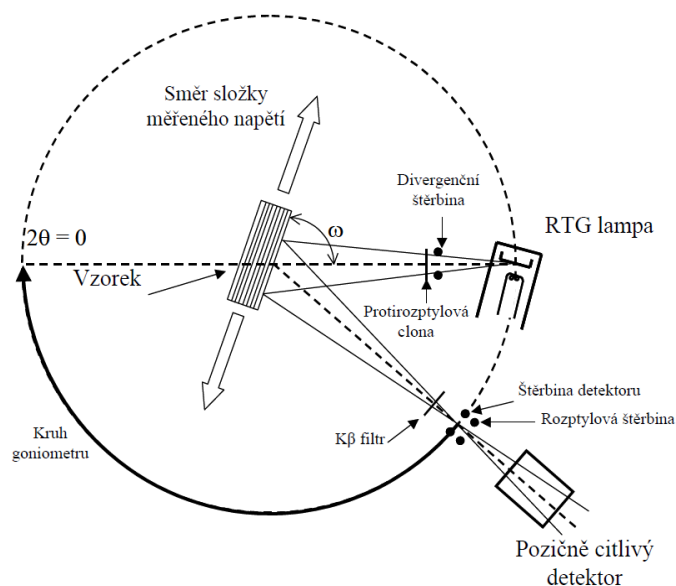
Maximální úhel 2θ je větší, obvykle až 165° . Většina práškových difraktometrů nemůže překročit 145° . Při měření při vyšších hodnotách 2θ lze měřit přesněji malé změny v mezivínné vzdálenosti.

Difraktometr má více os otáčení než standardní práškový difraktometr. To umožňuje, aby byl vzorek nakloněn (otočen) v souladu s požadavky metody $\sin^2\psi$.

Obvykle mohou vyšetřovat i rozměrnější vzorky, jelikož odříznutí části materiálu není žádoucí. [13]

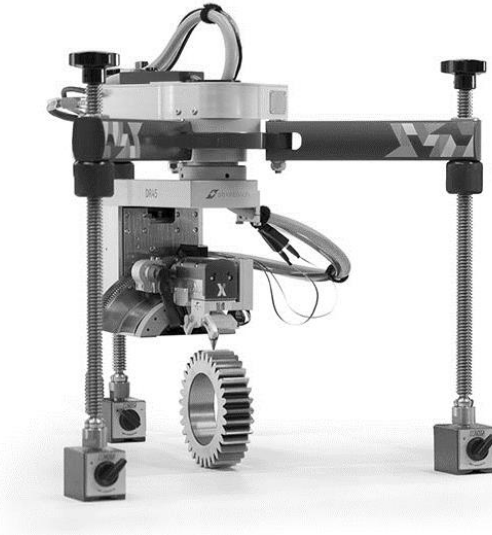
Difraktometry schopné měřit zbytkové napětí lze rozdělit do dvou typů, oba mají mnoho dalších variant:

- **Pevná laboratorní zařízení.** Tyto stroje jsou obvykle schopné provádět i jiné formy rentgenové difrakční analýzy, například identifikaci fázového složení vzorku. Schématické zobrazení hlavních komponent lze vidět na obr. 17.



Obr. 17 Schématické zobrazení hlavních prvků laboratorního rtg difraktometru, přeloženo z [13]

- Mobilní zařízení.** Ty jsou navrženy speciálně pro analýzu napětí. Rozměrově bývají o dost menší a jsou přizpůsobená k přenášení. Obecně jsou konstrukčně mnohem jednodušší než laboratorní zařízení. Poskytují přístup i k malým oblastem a tvarově složitějším součástem, jako jsou například zuby ozubeného kola. Komerčně dostupná zařízení jsou například Stresstech Xstress DR45 (na obr. 12) nebo řada difraktometrů Proto iXRD.[13]



Obr. 18 Mobilní difraktometr Stresstech Xstress DR45. [13]

Magnetické metody

Stresstech Rollscan

Finská firma Stresstech vyrábí přístroj měřící stav integrity povrchu pomocí metody Barkhausenova šumu s názvem Rollscan. Existuje několik nastaveb tohoto přístroje uzpůsobených k efektivnějšímu měření, jako je například GearScan pro ozubená kola nebo CamScan pro vačkové hřídele.

Celé měřicí zařízení má tyto části:

- hlavní analyzátor Rollscan
- snímač tvarově uzpůsobený pro testovanou součást
- volitelné vybavení pro manipulaci s komponentami (stožan)
- software pro sběr dat (ViewScan) a analýzu (MicroScan).

Během měření se cyklicky magnetizuje vzorek a snímá se indukovaný signál – Barkhausenův šum. Konstrukce snímačů je vždy podobná, liší se tvarem. Ten se odvíjí od potřeby maximálního kontaktu s plochou vzorku. Jsou k dispozici snímače uzpůsobené k měření kroužků ložisek, válců motorů, zubů ozubených kol nebo univerzální snímače.

Každý snímač má dva páry pólů. Jeden pár je připojen na magnetizační cívku, která budí střídavé elektromagnetické pole. Díky tomuto poli je materiál lokálně magnetizován. Druhým párem jsou póly snímací. Tyto póly jsou připojeny na snímací cívku, která společně s vyhodnocovací elektronikou snímá změnu magnetizace. [14]

9. Zhodnocení a porovnání metod

Cílem této bakalářské práce je zpracovat komplexní zhodnocení metod dle několika různých hledisek. Pro přehledné zhodnocení bude vhodná forma tabulek, která čtenáři poskytne ucelený pohled na dostupné metody, jejich omezení a dosažitelné výsledky. Některé hodnoty z tabulek lze uvažovat pro výběr napřímo, některé jsou vyjádřeny jen jako srovnání s ostatními uvedenými.

9.1. Praktická hlediska

Primární otázka při volbě metody by měla být, zdali je pro nás přijatelné poškození součásti. Pokud poškození nepřichází v úvahu jsou vhodné difrakční nebo ultrazvukové metody. Také přichází v úvahu magnetické metody, jejichž potenciál je primárně v kontrole při sériové výrobě. Většinu mechanických metod můžeme využít, pokud nám nevadí zničení součásti. Pokud je pro nás přijatelné poškození v malé míře, můžeme využít mechanické metody označené jako semidestruktivní.

Téměř všechny metody měření byly původně vyvinuty jako laboratorní. Některé metody vyžadují kontrolované prostředí a lze je provádět pouze v laboratoři, například metodu kontur. Jiná měření lze přizpůsobit pro použití na místě zkoumaného prvku. Několik výrobců vyrábí přenosná zařízení speciálně určená pro aplikace mimo laboratoř.

Časovou náročnost zohledňujeme při potřebě kontroly většího množství součástí, typicky při sériové výrobě dílů, na které jsou kladeny vysoké požadavky.

Dalšími dílčími praktickými hledisky je cena zařízení, náročnost na obsluhu nebo existence standardu.

9.2. Materiálová omezení

Obecně lze říci, že mechanické (relaxační) metody lze použít pro naprostou většinu materiálů, obvykle předpokládají homogenní materiál a izotropii. Popřípadě některé metody jsou schopny při zpracování výsledků pomocí MKP pracovat s odlišnými vlastnostmi v různých směrech a oblastech. Pro difrakční měření jsou požadovány krystalické materiály a pro magnetické metody feromagnetické materiály.

Vyšetřování zbytkových napětí v povlacích nalézá své využití, ale je nutné vždy zvážit možnost použití pro konkrétní materiál, tloušťku vrstvy a dostupnou metodu.

Stav a očištění povrchu může mít u některých metod značný vliv na výsledky. U difrakčních metod může hrubý povrch způsobit nejednoznačnou interpretaci výsledků. Pro mechanické metody musíme být schopni korektní instalace tenzometrů, pokud je metoda využívá. U magnetických metod chceme mít co největší kontaktní plochu mezi snímačem a vzorkem. Obecně lze dodat, že při úpravě povrchu nelze užívat technologie, při nichž dochází k ovlivnění stavu zbytkových napětí – typicky třískové obrábění.

9.3. Kvalitativní hlediska

Rozlišení lze uvažovat dvojí – s hloubkou nebo prostorové. Rozlišení s hloubkou obvykle odpovídá minimální hloubce, ze které získáváme informaci o napětí. Pro

mechanické metody je to např. tloušťka inkrementálně odebírané vrstvy. Maximální hloubka se může značně lišit. Difrakční metody obvykle stanovují napětí blízko povrchu. Existují i metody schopné 2D mapování zbytkových napětí v celém průřezu.

V publikacích na téma zbytkových napětí se v českém prostředí často opakuje jedna obligátní tabulka, kterou od sebe autoři přebírají. Ta ovšem neposkytuje komplexnější pohled na dostupné metody.

Informace o přesnostech byly čerpány z více zdrojů, avšak některé dohledané hodnoty se liší i v desítkách MPa. Je nutné si vždy dosažitelné přesnosti ověřit u výrobců konkrétních zařízení. Přesnosti také občas nebývají uváděny v absolutních hodnotách, ale v procentech z meze kluzu.

Poznámky k tabulce 2

- (1) Lze nanést průsvitnou vrstvu na vzorek jiného materiálu a tím zkoumat rozložení napětí na něm.
- (2) Rozlišení se řídí použitou metodou měření deformace (např CCM, laser).
- (3) Rozlišení s hloubkou záleží na použité metodě odebírání tenkých vrstev.
- (4) První hodnota je pro povrchové vlny, druhá pro objemové.
- (5) Výsledky metody nejsou kvantitativní.

METODA	Destruktivní	Přenosné / lab. zařízení	Kontaktní	Norma	Časová náročnost	Cena zařízení	Odbornost obsluhy
Odvrtávací	semidestruktivní	obojí	ano	ASTM E837	rychlá/střední	střední	nižší/střední
Sloupku	semidestruktivní	obojí	ano	ne	rychlá/střední	střední	nižší/střední
Dělicí	destruktivní	laboratorní	ano	ne	střední	nižší	nižší
Odebírání vrstev	destruktivní	laboratorní	ano	ne	vyšší	střední	střední
Kontur	destruktivní	laboratorní	ano	ne	střední	vyšší	střední
XRD	nedestruktivní	obojí	ne	ne	rychlá/střední	vyšší	střední/vysoká
Neutronová dif.	nedestruktivní	laboratorní	ne	ISO 21432	vyšší	extrémní	vysoká
Barkhausenův šum	nedestruktivní	obojí	ano	ne	rapidní	střední	nižší/střední
Ultrazvuková	nedestruktivní	obojí	ano	ne	rychlá	střední	střední
Fotoelastická	nedestruktivní	laboratorní	ano	ne	rychlá	střední	nižší/střední

Tabulka 1 Porovnání metod – praktické hledisko.

METODA	Typické materiály	Materiálové omezení	Stav, úprava povrchu	Rozlišení	Maximální Hloubka	Druh napětí	Stav napětí	Přesnost
Odvrtávací	kovy, plasty, keramika, kompozity	-	rovinný, možnost přilepení tenzometrů	50-100 μm	1-2 mm	Makro	jednoosý dvouosý	± 20 MPa
Sloupku	kovy, plasty, keramika, kompozity	-	rovinný, možnost přilepení tenzometrů	50-100 μm	5 mm	Makro	jednoosý dvouosý	± 10 MPa
Dělicí	kovy, plasty, keramika, kompozity	-	možnost přilepení tenzometrů	125 μm	celá tloušťka	Makro	jednoosý	± 10 MPa
Odebírání vrstev	bez omezení	-	nemá výrazný vliv	20 μm	celá tloušťka	Makro	jednoosý dvouosý	± 30 MPa
Kontur	kovy	-	nemá výrazný vliv	liší se (2)	celá tloušťka	Makro	jednoosý	± 30 MPa
XRD	kovy, keramika	krystalické	komplexní požadavky, značný vliv	10-50 μm (3)	15-50 μm	Makro Mikro	jednoosý dvouosý	± 20 MPa
Neutronová dif.	kovy, keramika	krystalické	komplexní požadavky, značný vliv	500 μm	200 mm	Makro Mikro	jednoosý dvouosý trojosý	± 50 MPa
Barkhausenův šum	kovy	feromagnetické	očistěný povrch, tvarově přizpůsobené snímače	100 μm	3 mm	Makro Mikro	jednoosý dvouosý	± 25 MPa
Ultrazvuková	kovy (keramika)	-	nemá výrazný vliv	15-300 μm	3 mm, 100 mm (4)	Makro Mikro	jednoosý dvouosý	± 20 MPa
Fotoelastická	plasty (1)	průsvitné	rovinný povrch	-	-	Makro	jednoosý dvouosý trojosý	-(5)

Tabulka 2 Porovnání metod – materiálová omezená a kvalitativní hledisko.

10. Závěr

Zvyšující se zájem o progresivní návrh technických aplikací vytváří důraz na znalost stavu zbytkové napjatosti v součástech. Ze stejného důvodu je také nutné porozumět souvislostem, jak zbytková napětí ovlivňují vlastnosti materiálu.

Experimentální měření jsou nezbytná pro kvantitativní stanovení velikosti, orientace a distribuce zbytkových napětí. Existuje mnoho metod pro zjišťování zbytkových napětí ve strojírenských součástkách. Každá má však své přednosti a omezení. Obecně lze říci, že ke korektní interpretaci výsledků nám dopomohou znalosti okolností vzniku ZN v součásti a předpoklady, které můžeme dle nich usuzovat.

Měření zbytkového napětí může být velmi nákladné a časově náročné. Před výběrem konkrétní metody je důležité zvážit výhody a omezení těchto metod a výběr směřovat k optimalizaci celého procesu měření. Tyto výhody jsou shrnuty ve formě tabulek na konci kapitoly č. 9 a lze si dle nich udělat ucelený obrázek o nejpoužívanějších metodách měření.

Na téma ZN bylo vydáno mnoho publikací a v poslední době bylo dosaženo významného pokroku v aplikaci současně dostupných metod měření. Během posledních desetiletí byla vyvinuta řada komerčně dostupných zařízení k měření ZN, některé z nich jsou uvedeny v kapitole č. 8.

Seznam obrázků

Obr. 1 Rozložení zbytkových napětí v řezu součásti [3]	4
Obr. 2 Schematické znázornění Makroskopických (σ_I), Mikroskopických (σ_{II}) a Submikroskopických (σ_{III}) napětí jednofázového polykrystalického materiálu [3]	5
Obr. 3 Příklady vzniku zbytkových napětí při některých typických technologiích, přeloženo z [4] ..	6
Obr. 4 Deformace součásti po odříznutí části polotovaru. [7]	7
Obr. 5 Závislost uvolněné radiální a tangenciální deformace na vzdálenosti od středu vyvrtané díry. [11]	11
Obr. 6 Schémata uspořádání odporových tenzometrických růžic pro určení zbytkových napětí. [10]	12
Obr. 7 Metoda sloupku [4]	14
Obr. 8 Typické uspořádání měření dělicí metodou [12]	15
Obr. 9 Princip metody kontur [6]	15
Obr. 10 Difrakce rentgenových paprsků na krystalové mřížce. [13]	17
Obr. 11 Schéma difrakčních rovin daných úhly φ, ψ v systému souřadnic spojeném se vzorkem. [13]	18
Obr. 12 Závislost $\epsilon_{\varphi\psi} - \sin^2 \varphi$. Princip měření napětí metodou $\sin^2 \varphi$. [13]	20
Obr. 13 Hysterezní smyčka, přeloženo z [4]	22
Obr. 14 Uspořádání ultrazvukových metod, pulse-echo (a), pitch-catch (c) (b). [15]	24
Obr. 15 Zařízení pro odvrtávání otvorů SINT MTS3000 – Restan (vlevo) a Micro-measurements RS-200 (vpravo). [17] [18]	25
Obr. 16 Zařízení pro metodu sloupku SINT MTS3000 – Ringcore, řídicí jednotka (vlevo) a vrtací zařízení (vpravo) [19]	26
Obr. 17 Schematické zobrazení hlavních prvků laboratorního rtg difraktometru, přeloženo z [13]	27
Obr. 18 Mobilní difraktometr Stresstech Xstress DR45. [13]	28

Seznam tabulek

Tabulka 1 Porovnání metod – praktické hledisko	31
Tabulka 2 Porovnání metod – materiálová omezená a kvalitativní hledisko	32

Seznam použité literatury

- [1] NECKÁŘ, F., KVASNIČKA, I. *Vybrané statě z úběru materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1991. ISBN 80-01-00696-4.
- [2] DOUBRAVA, K. Principy odvrťovací metody [online]. Bulletin of Applied Mechanics 3(11), 2006, s. 74-81 [cit. 2021-6-30]. Dostupné z: <http://www.bulletin-am.cz/>
- [3] VLK, M. *Experimentální mechanika* [online]. Brno: VUT v Brně, 2003 [cit. 2021-6-30]. Dostupné z: http://ean2011.fme.vutbr.cz/img/file/opory/Experimentalni_mechanika.pdf
- [4] SCHAJER, Gary S. *Practical Residual Stress Measurement Methods*. UK, 2013. ISBN 9781118342374.
- [5] BAKALOVA, T. *Vliv materiálových a technologických parametrů obrábění na napětí v povrchové vrstvě a vlastnosti dynamicky namáhaných strojních součástí*. Liberec, 2010. Disertační práce. TUL Liberec.
- [6] PEČENKA, L. *Hybridní metody pro měření zbytkových napětí*. Disertační práce. VŠB Ostrava, 2018. ISBN 978-80-248-4248-6.
- [7] WATANABE, H. *Valve Gear – warped material by release of residual stress* [online]. [cit. 2021-6-30]. Dostupné z: http://livesteam.sakura.ne.jp/C53_201802e.htm
- [8] PARDOWSKA, A., J. PRICE a T. FINLAYSON. *Efficient use of available techniques to measure residual stresses in welded components. International Workshop on Thermal Forming and Welding Distortion*. Bremen, 2006.
- [9] ŘEZNIČEK, J. *Pružnost a pevnost II přednášky. Doplněk: technická plasticita*. Verze 2015. Praha, 2015.
- [10] ASTM E837-20. *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method.*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- [11] TREBUŇA F., ŠIMČÁK F. *Kvantifikácia zvyškových napätí tenzometrickými metodami*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2005. ISBN 80-807-3227-2.
- [12] SHOKRIEH, M. a Sa. AKBARI R. *Simulation of slitting method for calculation of compliance functions of laminated composites. Journal of Composite Materials*. 2012, 46(9), 1101-1109. ISSN 0021-9983.
- [13] FITZPATRICK, M. E. *Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction*. Measurement Good Practice Guide No. 52: National Physical Laboratory UK, 2015. ISSN 1744-3911.
- [14] DEVICI, M. *Barkhausen Noise Analysis*. STRESSTECH BULLETIN 1 [online]. Finland: Stresstech. Dostupné z: <https://www.stresstech.com/stresstech-bulletin-1-barkhausen-noise-analysis/>
- [15] KLEIMAN, J. a Y. KUDRYAVTSEV. *Measurement of residual stresses in materials and welded elements using ultrasonic method*. IEEE, 2015, 143-148. ISBN 978-1-4673-7000-4., DOI: 10.1109/FENDT.2015.7398328.
- [16] HAUKE, V. *Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods*. Elsevier Science B.V., 1997. ISBN 9780444824769.
- [17] *MTS3000 – Restan, Brochure* [online]. Italy: SINT Technology, 2018. Dostupné z: https://disensors.com/wp-content/uploads/2018/10/RESTAN-MTS3000_2097.pdf
- [18] *MICRO-MEASUREMENTS. RS-200, Milling Guide for Residual Stress Measurements* [online]. Micro-Measurements, Vishay Precision Group, 2014. Dostupné z: <http://www.vishaypg.com/docs/11304/rs200.pdf>
- [19] *MTS3000 – RINGCORE, Brochure* [online]. Italy: SINT Technology, 2020. Dostupné z: https://www.sintechnology.com/wp-content/uploads/2020/12/2020_02_ENG_RingCore.pdf