

# České vysoké učení technické v Praze

## Fakulta strojní

### Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



**Rozbor a zhodnocení metod pro měření zbytkových napětí po obrábění**

**Analysis and evaluation of residual stresses after machining**

Bakalářská práce

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Vedoucí práce: prof. Ing. Mádl Jan CSc.

**Bugayevskiy Ruslan**

**Praha 2018**



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	<b>Bugayevskiy</b>	Jméno:	<b>Ruslan</b>	Osobní číslo:	<b>437028</b>
Fakulta/ústav:	<b>Fakulta strojní</b>				
Zadávací katedra/ústav:	<b>Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie</b>				
Studijní program:	<b>Výroba a ekonomika ve strojírenství</b>				
Studijní obor:	<b>Technologie, materiály a ekonomika strojírenství</b>				

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:  
**Rozbor a zhodnocení metod pro měření zbytkových napětí po obrábění**

Název bakalářské práce anglicky:  
**Analysis and evaluation of residual stresses after machining**

Pokyny pro vypracování:

1. Sestavení přehledu metod pro měření zbytkových napětí po obrábění.
2. Zhodnocení přesnosti a vhodnosti těchto metod v závislosti na vzdálenosti od povrchové plochy.
3. Příklady měřených průběhů zbytkových napětí pro různé metody.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:  
**prof. Ing. Jan Mádl, CSc., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **29.10.2018**      Termín odevzdání bakalářské práce: **04.01.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

 _____ prof. Ing. Jan Mádl, 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.

<u>30.10.2018</u> Datum převzetí zadání	<u></u> Podpis studenta
--	----------------------------

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma “Rozbor a zhodnocení metod pro měření zbytkových napětí po obrábění” vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady, které jsou uvedené v seznamu citací.

V Praze dne:

.....

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce prof. Ing. Mádlu Janu CSc. za vedení, zájem, připomínky a čas, který mi věnoval a byl při dané práci vždy oporou.

Dále bych chtěl také poděkovat rodičům za jejich podporu během studia.

# Anotační list

Jméno autora: Bugayevskiy Ruslan

Název BP: Rozbor a zhodnocení metod pro měření zbytkových napětí po obrábění

Anglický název: Analysis and evaluation of residual stresses after machining

Rok: 2018

Obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Ústav: Technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Vedoucí práce: prof. Ing. Mádl Jan CSc.

Bibliografické údaje: Počet stran 41

Počet obrázků 19

Počet tabulek 2

Klíčová slova: Zbytkové napětí, obrábění, integrita povrchu, metody měření zbytkových napětí.

Keywords: Residual stress measurement, machining, surface integrity, methods for measuring residual stresses.

Anotace:

Bakalářská práce je zaměřena na rozbor a zhodnocení metod pro měření zbytkových napětí po obrábění. Tato práce obsahuje rozbor vzniku zbytkových napětí a příklady měřených průběhů zbytkových napětí. Dále práce obsahuje detailní popis metod pro měření zbytkových napětí a jejich porovnání.

Abstract:

This thesis is focused on the analysis and evaluation of residual stresses after machining. This work contains reasons of occurrence and examples of measuring residual stresses after machining. Further this work contains detailed explanation of methods for measuring residual stresses and comparing of them.

# Obsah

<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b> .....	7
<b>Úvod</b> .....	9
<b>1. Cíl práce</b> .....	10
<b>2. Obrábění</b> .....	10
2.1 Základní pojmy obrábění .....	10
2.2 Obrobitelnost povrchu materiálu.....	12
<b>3. Integrita povrchu</b> .....	13
<b>4. Zbytkové napětí</b> .....	14
4.1 Zbytkové napětí v povrchové vrstvě .....	15
4.1.1 Mechanicky zatížená povrchová vrstva .....	17
4.1.2 Mechanicky a tepelně zatížená povrchová vrstva .....	19
4.1.3 Mechanicky a tepelně zatížená povrchová vrstva se změnami struktury .....	20
4.1.4 Příklady vlivu jednotlivých technologických operací .....	20
4.1.5 Metody měření zbytkových napětí.....	22
<b>4.2 Mechanické metody</b> .....	23
4.2.1 Odvrtávací metoda .....	23
4.2.2 Metoda postupného elektrolytického rozpouštění (vetknutý nosník) .....	26
4.2.3 Metoda sloupku .....	28
4.2.4 Metody odstraňování vrstvy materiálu.....	29
4.2.5 Dělicí metody .....	29
<b>4.3 Rentgenová difrakce</b> .....	29
<b>4.4 Magnetické metody</b> .....	32
4.4.1 Barkhausenův šum .....	32
4.4.1.1 Přístroj STRESSCAN .....	33
4.4.2 Magnetostrikční metoda .....	34
<b>4.5 Ultrazvukové metody</b> .....	35
<b>4.6 Akustické metody</b> .....	36
<b>4.7 Porovnání metod</b> .....	36
<b>Závěr</b> .....	38
Seznam obrázků .....	39
Seznam tabulek .....	39
<b>Seznam použité literatury</b> .....	40

## Seznam použitých zkratek a symbolů

$f$	–	posuv na otáčku (obrobku nebo nástroje)
$f_z$	–	posuv na zub (obráběcího nástroje)
$f_m$	–	posuv za minute
$f_{zd}$	–	posuv na zdvih
$a_p$	–	hloubka třísky
$v_c$	–	řezná rychlost
$r_0$	–	poloměr průchozího otvoru
$\varepsilon$	–	mřížková deformace
$\varepsilon_{\varphi\psi}$	–	mřížková deformace v libovolném směru $\varphi, \psi$
$\varepsilon_\rho$	–	radiální deformace
$\varepsilon_n$	–	tangenciální deformace
$\varepsilon(t)$	–	časový průběh deformace
$\varepsilon(z)$	–	závislost deformace vůči vzdálenosti od povrchu
$\rho$	–	tlak způsobující plastickou deformaci
$\varphi$	–	úhel charakterizující směr napětí $\sigma_\varphi$
$\psi$	–	úhel mezi normálou k povrchu a směrem deformace $\varepsilon_{\varphi\psi}$
$\mu$	–	koeficient tření
$\nu$	–	Poissonova číslo
A, B, C	–	konstanty úměrnosti
$\sigma$	–	napětí
$\sigma_I$	–	zbytková napětí I. druhu (makroskopická)
$\sigma_{II}$	–	zbytková napětí II. druhu (mikroskopická)
$\sigma_{III}$	–	zbytková napětí III. druhu (submikroskopická)
d	–	mezirovinná vzdálenost (vzdálenost sousedních rovin typu {hkl})
$d_0$	–	hodnota d odpovídající nenapjatému krystalu
$1/2 s_2^{hkl}, s_1^{hkl}$	–	rentgenografické elastické konstanty pro reflektující systém rovin (hkl)
n	–	celé číslo (řád difrakce)
$\lambda$	–	vlnová délka dopadajícího rentgenového záření

$d_{hkl}$	–	vzdálenost strukturálních rovin polykrystalického materiálu
hkl	–	roviny dopadajících loučí
$\theta$	–	Bragg úhel, je úhel dopadu rovný úhlu odrazu
E	–	modul pružnosti
I	–	moment setrvačnosti průřezu
$Rp_{0.2}$	–	smluvní mez kluzu
Rm	–	měz pevnosti



# Úvod

Zbytkovým napětím je věnována stále větší pozornost, protože zbytkové napětí zůstává v materiálu po jakémkoliv procesu obrábění daného materiálu, např. soustružení, i bez působení vnějších sil. Při obrábění kovových dílů pod obrobeným povrchem vznikají zbytkové napětí. Tyto napětí jsou ve vnitřní rovnováze, není jejich navenek vidět, ale mají vliv na materiál a snižují jeho životnost.

Zbytkové napětí vznikají postupem ve výrobním procesu, kterým je ovlivňován základní materiál výrobku. Pod postupem ve výrobě rozumíme např. obrábění, zpracování za tepla, válcování součásti, svařování materiálů atd. To jsou všechno výrobní postupy, které zanechávají v materiálu součásti nežádoucí zbytkové napětí. Existence zbytkového napětí v materiálu může být velmi nebezpečná. Tento poškozený materiál při své poruše může vážně ohrozit zdraví člověka a finančně nákladné strojní zařízení.

Tyto zbytkové napětí nejsou běžně viditelné. Většinou existenci těchto napětí zaregistrujeme až při samotné poruše. Tato porucha často bývá havarijního charakteru.

Až do nedávné doby se nedaly měřit tyto napětí bez porušení dané součásti. V dnešním technicky vyspělém světě jsme schopni tyto zbytkové napětí analyzovat i bez destruktivního zasahování do materiálu. Bez porušení součásti se dají měřit zbytkové napětí rentgenem, ultrazvukem a magneticky. Toto jsou metody, které jsou výjimečné už jen z toho hlediska, že nenarušují strukturu součásti. Přístrojové vybavení, které slouží k analýze bývá často finančně nákladné.

Destruktivní a polodestruktivní metody jsou mechanické odvrtávací metody, které narušují povrch součásti vyvrtáním otvoru uvolňujícího zbytkové napětí nebo dělicí metody, které již přímo rozdělí materiál na části a také odstraňování vrstvy materiálu atd. Metody zjišťování zbytkových napětí využívají nejnovější technologie dostupné v materiálové praxi a nadále se rozvíjejí.

# 1. Cíl práce

Cílem mé práce je rozbor a zhodnocení metod pro měření zbytkových napětí po obrábění. V této práci se budu zabývat o základní pojmy vzniku zbytkových napětí po obrábění. Dále budu popisovat metody, které se v současné době používají pro zjišťování zbytkových napětí. Práce poukazuje na vhodnost a rozsah využívaných metod pro zjišťování zbytkových napětí v materiálu po obrábění v praxi.

## 2. Obrábění

Obrábění je technologický proces, při kterém řezná síla vtlačuje nástroj ve tvaru řezného klínu do povrchu polotovaru a odebírá z něj třísku.[1]

Při obrábění dochází k oddělování částic materiálu obrobku břitem nástroje. Vlastní proces fyzikálně-mechanického oddělování materiálu obrobku se specifikuje jako *řezání*, respektive *řezný proces*. V závislosti na způsobu oddělování materiálu se rozliší řezný proces *kontinuální* (soustružení, vrtání, vyvrtávání), *diskontinuální* (hoblování, obrážení) a *cyklický* (frézování, broušení). Reálný řezný proces probíhá za určitých řezných podmínek, které jsou součástí obráběcích podmínek. [1]

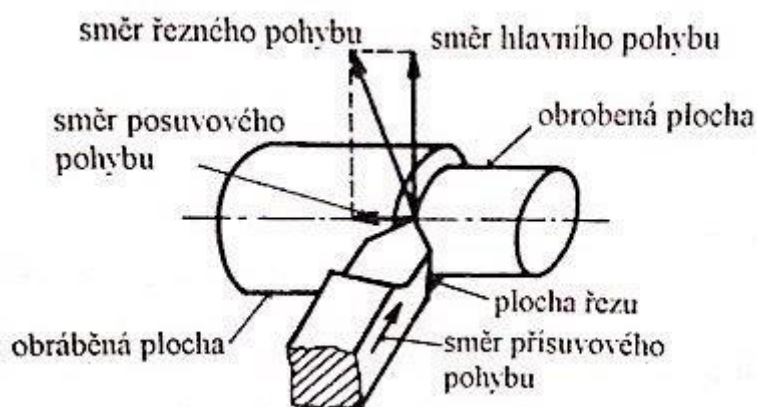
### 2.1 Základní pojmy obrábění

**Obrobek** - obráběná, nebo částečně již obrobená, příp. úplně obrobená součást, jako objekt obráběcího procesu je z geometrického hlediska charakterizován obráběnou, obrobenou a přechodovou plochou. [1]

**Obráběná plocha** je plocha, která má být obrobena řezáním.[1]

**Obrobená plocha** je plocha získaná jako výsledek řezného procesu.[1]

**Přechodová plocha** je část povrchu obrobku, která je vytvořena působením ostří nástroje během zdvihu nebo otáčky nástroje nebo obrobku. [1]



Obr.1 Ukázka základních pojmů [1]

**Nástroj** v interakci s obrobkem umožňuje realizaci řezného procesu. Z geometrického hlediska je nástroj identifikován svými prvky, plochami, ostřími a rozměry ostří.[2]

**Plocha řezu** - plocha, která vzniká při obrábění. (Její další část může být obrobena při další fázi obrábění). [1]

**Základna** je plochý prvek stopky nástroje, který je zpravidla rovnoběžný nebo kolmý k základní rovině nástroje; slouží pro umístění a orientaci nástroje při jeho výrobě, kontrole a ostření; ne všechny nástroje mají jednoznačně určenou základnu.[2]

**Břit** je prvek řezné části nástroje ohraničený čelem a hřbetem nástroje. Může s hlavním, tak i vedlejším ostřím.[1]

**Hloubka řezu** je vzdálenost mezi obráběnou a obrobenu plochou ve směru přísuvu. Udává se v milimetrech. [2]

**Řezná rychlost  $v_c$**  je vyjádřena jako okamžitá rychlost hlavního pohybu uvažovaného bodu na ostří vzhledem k obrobku. [1]

**Řezný pohyb** - tento pohyb je vytvářen dvěma pohyby - řezným a posuvovým. Může být definován jako relativní pohyb obrobku a nástroje, který umožňuje obrábění.[1]

**Hlavní řezný pohyb (HŘP)** - hlavní pohyb, který spolu s pohybem posuvovým umožňuje obrábění. Tento pohyb vykonává buď nástroj nebo obrobek, vzhledem k tomu, o jaké obrábění se jedná. Při soustružení je HŘP rotace obrobku. Při frézování je HŘP rotace obráběcího nástroje. Při obrábění je HŘP přímočarý pohyb obráběcího nástroje[1][2]

**Posuvový pohyb** – vedlejší řezný pohyb. Tento pohyb může být definován také jako relativní pohyb obrobku a nástroje umožňující obrábění.[1]

**Posuv** - pohyb, který udává, o jakou hodnotu se nástroj nebo obrobek posune ve směru posuvového pohybu. Při obrábění rozlišujeme několik typů posuvů[1]:

1. posuv na otáčku (obrobku nebo nástroje) -  $f$  [mm]
2. posuv na zub (obráběcího nástroje) -  $f_z$  [mm]
3. posuv za minutu -  $f_m$  [mm \* min<sup>-1</sup>]
4. posuv na zdvih -  $f_{zd}$  [mm]

**Přísuvový pohyb** - také vedlejší řezný pohyb. Pohyb ve směru do obrobku. Jeho velikostí je udáváno, jak velká bude hloubka třísky. [1]

**Hloubka třísky** (šířka záběru ostří) - Je to hodnota udávající jak velký záběr bude mít ostří. Dá se také definovat jako vzdálenost mezi dvěma plochami - obrobenu a obráběnou. Značí se  $a_p$ . [1]

Obrábění je založeno na využití energie dodávané obráběcímu stroji, jehož činností prostřednictvím nástroje dochází k zmíněnému odebrání určitého objemu materiálu z polotovaru.[2]

Hlavní způsoby obrábění rozdělujeme podle druhu použité energie na [2]:

1. **Mechanické obrábění** - na oddělování částí materiálu se používá mechanická energie. Mechanické obrábění můžeme rozdělit na **ruční a strojní**.

2. **Strojní obrábění** - lze rozdělit na tyto základní metody obrábění a to jsou soustružení, frézování, vrtání, vyvrtávání, hoblování, obrážení, protahování a broušení.[1]

Jednotlivé způsoby obrábění z hlediska uvedeného charakteru můžeme rozdělit na [1][2]:

- mechanické způsoby obrábění, jako způsoby odebrání materiálu jedním nebo více klíny nástroje
- termické způsoby obrábění, jako způsoby odebrání materiálu jedním nebo několika řeznými klíny nástroje při využití tepla z plastické deformace materiálu při obrábění nebo teplota dodaná z vnějšího zdroje (předehřevu obráběného materiálu),
- optické způsoby obrábění, jako způsoby odebrání materiálu laserovým nástrojem,
- akustické způsoby obrábění, jako způsoby odebrání materiálu ultrazvukovým nástrojem,
- elektrické způsoby obrábění, jako způsoby odebrání materiálu elektrodou v prostředí dielektrika nebo elektrolytu,
- atomizované způsoby obrábění, jako způsoby odebrání materiálu elektronovým paprskem nebo paprskem plazmy,
- chemické způsoby obrábění, jako způsoby odebrání materiálu, kde nástrojem je chemický aktivní látka (kyselina, hydroxid apod.).

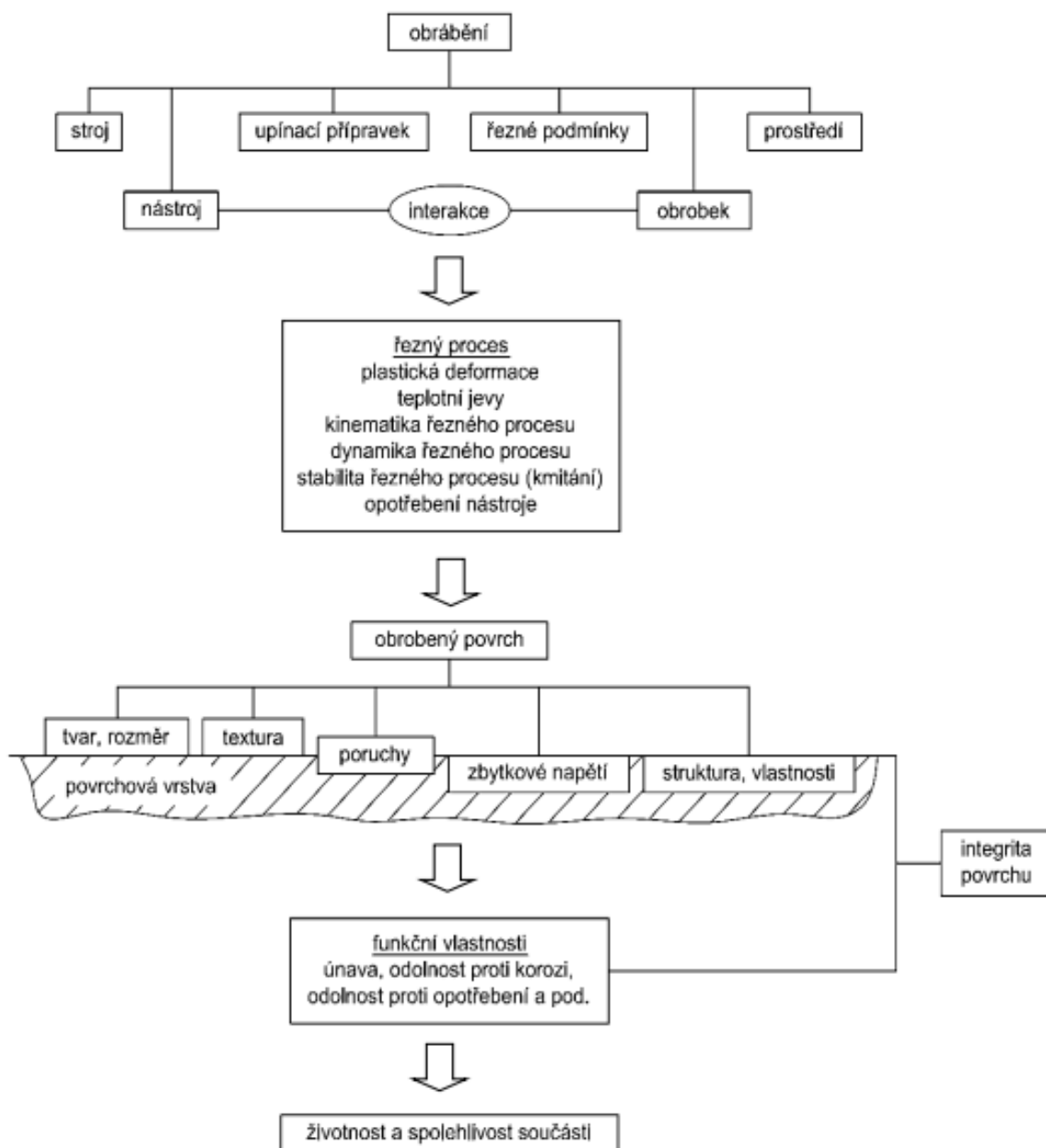
## 2.2 Obrobitelnost povrchu materiálu

Obrobitelnost materiálu se určuje porovnáním materiálů obráběných stejným způsobem, při zachování stejných provozních podmínek a při použití stejných obráběcích nástrojů. Neustále se vyvíjejí kvalitnější materiály, jejichž využití stále narůstá rozvojem NC strojů a automatizace. Požadavky obrobitelnosti materiálů se tím neustále zvětšují.[3]

Obrobitelnost závisí na mnoha faktorech, z nichž nejdůležitější jsou [3][1]:

- způsob výroby a tepelné zpracování obráběného materiálu,
- mikrostruktura obráběného materiálu,
- chemické složení obráběného materiálu,
- fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- metoda obrábění,
- pracovní prostředí,
- geometrie nástroje,
- druh a vlastnosti nástrojového materiálu

Obrobitelnost hodnotíme podle: drsnosti plochy, řezné rychlosti, potřebné energie, opotřebení nástroje a teploty při obrábění. [1]



Obr.2 Postup vytváření obrobeného povrchu [3]

### 3. Integrita povrchu

Z hlediska výroby má zásadní význam znalost mechanismu vytváření nového povrchu součásti, protože umožňuje pochopit povahu a vlastnosti takto vytvořeného povrchu, dává možnost pro zlepšení použitých procesů a případně umožňuje vytvoření obrobených ploch bez poruch [5, 6].

Všechny změny, které nastávají v povrchové vrstvě součásti, lze shodně posuzovat jako změny jakosti. Tyto změny se potom mohou dávat do vztahu s budoucí funkcí dokončené plochy a využívají se pro hodnocení její integrity [5, 6].

Integrita povrchu je proto odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká, bere v úvahu důsledky působení technologických metod na jakost obrobenej plochy a dáva je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek [5, 6].

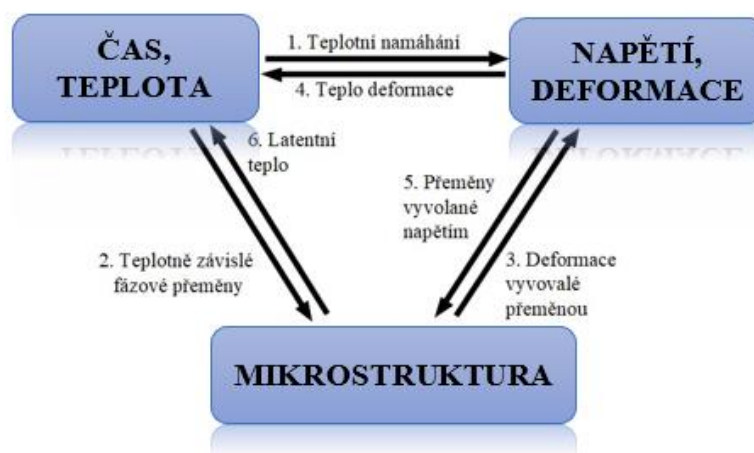
Funkční vlastnosti povrchu popisuje určitý soubor charakteristik, který označujeme integritu povrchu. K těmto charakteristikám patří především [7]:

1. Topografie povrchu.
2. Strukturní a fyzikálně-chemické změny v povrchové vrstvě.
3. Stupeň, hloubka a charakter zpevnění.
4. Smysl, velikost a průběh zbytkových pnutí.

Integrita povrchu nabývá stále většího významu, zejména pro vysoce namáhané součásti. Ze všech faktorů charakterizujících integritu povrchu je až dosud normalizováno pouze hodnocení drsnosti povrchu, avšak ani parametry drsnosti, které udává norma ČSN, nevystihují ani tuto drsnost vždy vyhovujícím způsobem. Jsou proto navrhovány soubory údajů, které by umožnily mnohem spolehlivěji než dosud odhadnout předpokládanou životnost součásti. [7]

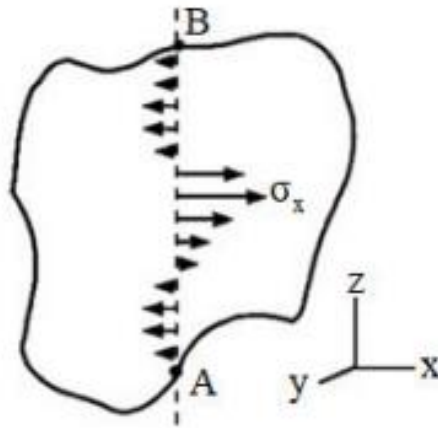
## 4. Zbytkové napětí

Pojem zbytková napětí lze definovat jako určitou část napětí, která v materiálu zůstává i po odstranění všech vnějších působení, které byly na danou součást aplikovány. Zbytkové napětí vzniká jako následek vlivu deformace, teploty, času a mikrostruktury, viz Obr.3 Mezi vlastnosti materiálu ovlivňující vznik zbytkových napětí patří například modul pružnosti, Poissonovo číslo, tepelná vodivost nebo tepelná kapacita. [8]



Obr.3 Vztahy mezi napětím, teplotou a mikrostrukturou [8]

Rozložení a hodnota zbytkových napětí ve struktuře materiálu závisí na jejich poloze. Obecně platí, že tahová zbytková napjatost v jedné oblasti musí být kompenzována tlakovou napjatostí v oblasti jiné. Neboli, součet vnitřních sil působících v libovolném řezu AB, vedoucím tělesem, musí být roven nule, jak je schematicky ukázáno na Obr.4 [9]



Obr.4 Silová rovnováha v libovolném uezu materiálem [9]

Prakticky v každém technickém materiálu se vyskytuje jistá hodnota zbytkové napjatosti jako důsledek jejich výroby a technologického zpracování. Největší podíl na vzniku zbytkové napjatosti mají technologické procesy jako například odlévání, svařování, obrábění a další. Takto vzniklá napětí, zůstávající ve struktuře materiálu, pak mohou výrazně ovlivnit jeho lomové chování, protože celkové zatížení součásti je dáno společným působením vnějšího zatížení a zbytkových napětí. Lomové chování negativně ovlivňují zejména tahová zbytková napětí, která mohou způsobovat iniciaci trhlin, snížení odolnosti proti křehkému lomu nebo vznik napěťové koroze [10]. Nemusí se ale nutně jednat pouze o ovlivnění negativní. V technické praxi se využívá například účinků tlakových zbytkových napětí ke zvýšení životnosti součástí a jejich odolnosti proti lomu, kdy se do povrchu vnáší jistá hodnota tlakových zbytkových napětí, například kuličkováním, která pak zvyšují odolnost materiálu proti šíření trhlin [11]

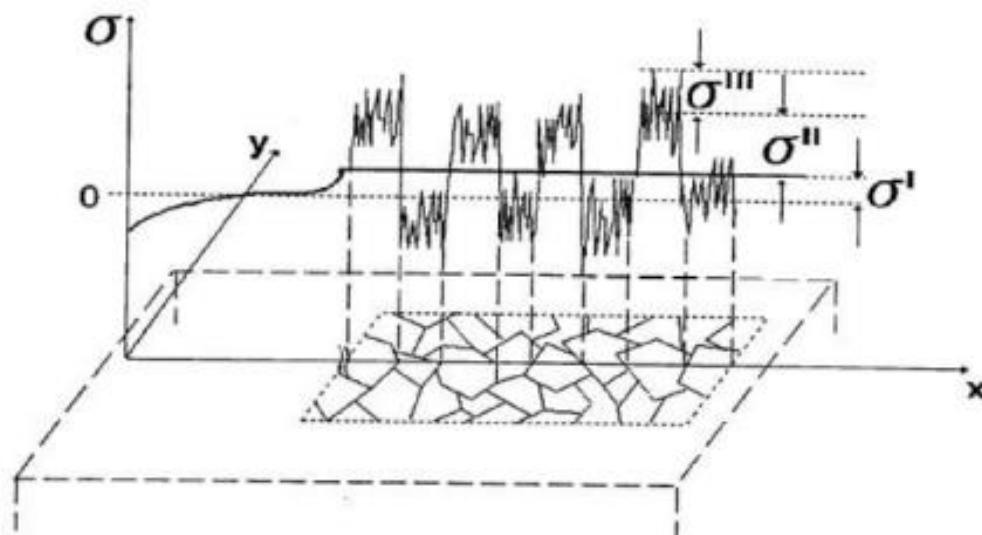
#### 4.1 Zbytkové napětí v povrchové vrstvě

Pro klasifikaci zbytkových napětí významným kritériem je velikost objemů. Podle objemu, ve kterém vnitřní pnutí dosahují rovnováhy, označujeme tato jeho napětí I.,II.,III, druhu.[12]

Napětí I. druhu - makroskopická - jsou navzájem v rovnováze ve velkých objemech, ve kterých jsou co do velikosti prakticky stejná. Vznikají při namáhání vnějším zatížením, a tedy i po obrábění, tváření, tepelném zpracování apod. Vyvolávají makroskopické změny tvaru a mohou vést k poruchám součástí.

Napětí II. druhu - mikroskopické - jsou v rovnováze v mikroobjemech (krystalech a jejich částech).

Napětí III. druhu - ultramikroskopické - jsou způsobena poruchami krystalické mřížky. Spolu s II. druhem mají výrazný vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti materiálů. [12]



Obr.5 Znázornění zbytkových makroskopických ( $\sigma_I$ ), mikroskopických ( $\sigma_{II}$ ) a ultramikroskopických ( $\sigma_{III}$ ) napětí [13]

Stav zbytkové napjatosti je v každém bodě tělesa superpozicí zbytkových napětí I., II. a III. druhu. Z hlediska účinků na chování konstrukčních dílů při namáhání jsou zbytková napětí ekvivalentní napětím vloženým. Nejrůznější mechanismy vzniku zbytkových napětí zahrnujeme do některé z těchto kategorií: procesy mechanické, tepelné, chemické a kombinované. [12],[14]

*Mechanické procesy.* Povrchové opracování jako kuličkování, válečkování, leštění a další deformují povrch materiálu více než vnitřek. V plasticky deformovaném povrchu je po odstranění vnější síly vyvolán stav zbytkové komprese. Vnitřek, ovlivněný opracováním mnohem méně (deformace je pouze elastická), bude naopak vystaven zbytkovým tahům. [14]

*Tepelné procesy.* Účinek teplotních gradientů může vyvolat napětí při kalení, odlévání, sváření, výrobě kompozitních materiálů aj. Tepelná napětí jsou doprovázena často také napětím transformačním vznikajícím jako důsledek fázových transformací. [14]

*Chemické procesy.* Příkladem chemických procesů, kterými se generují zbytková napětí, jsou oxidace, koroze nebo galvanické pokovování. [14]

*Kombinované procesy.* Tuto kategorii lze ilustrovat např. neideálními podmínkami broušení (tupý brusný kotouč, velký úběr, nevhodné chladicí médium). Broušením jsou pak vyvolány nejen efekty mechanické, ale i tepelné. Výsledná povaha stavu zbytkové povrchové napjatosti závisí na tom, který z obou efektů dominuje. Mechanické vedou obvykle k tlakům, tepelné k tahům. [14]

Zbytková napětí mohou být jak užitečná tak škodlivá. Z prospěšných to jsou např. napětí v předpjatém betonu a napětí vyvolaná některými typy povrchového opracování (kuličkování, balotínování), kdy se zvyšuje mez únavy. Nepříznivá zbytková napětí (zpravidla tahová) způsobují zborcení, trhliny, napět'ovou korozi, snížení meze únavy apod. [14]



### 4.1.1 Mechanicky zatížená povrchová vrstva

Při mechanickém zatížení povrchové vrstvy a nízkých teplotách dochází v povrchové vrstvě I. k plastické deformaci a ve vrstvě II. k elastické deformaci. Vrstva III. je již deformací nezasázena. [12]

Vznik napětí v mechanicky zatížené vrstvě lze přisoudit následujícím příčinám. Při obrábění např. kovu a jeho plastické deformaci dochází k poklesu hustoty materiálu a k růstu měrného objemu (Obr.6). Na tomto obrázku jsou znázorněny části deformovaného vzorku, které jsou podrobeny různému stupni deformace. Se vzrůstajícím číslem části vzorku roste stupeň deformace.

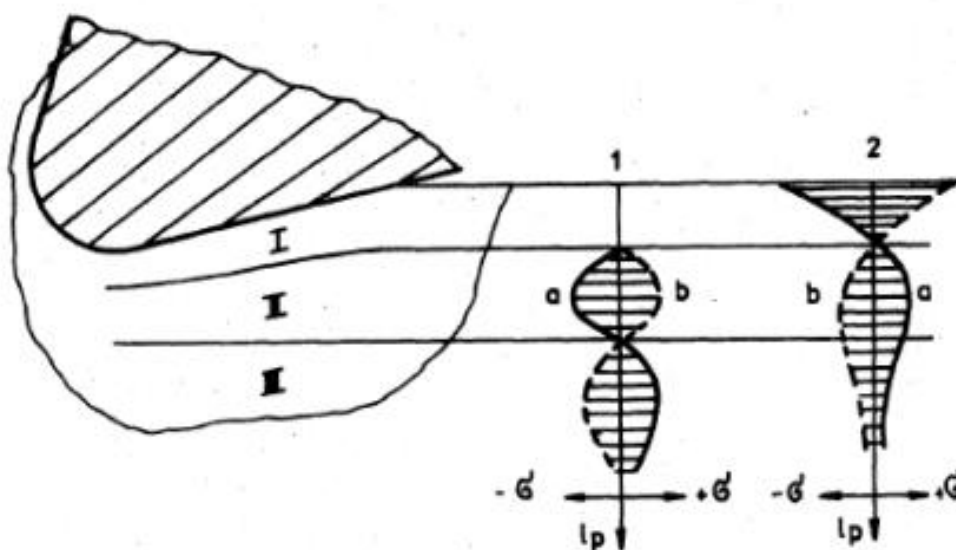
Na tento základní vliv se superponuje další vliv, a sice prodloužení jednotlivých materiálů. A zde mohou nastat dva případy. [12]

#### První případ:

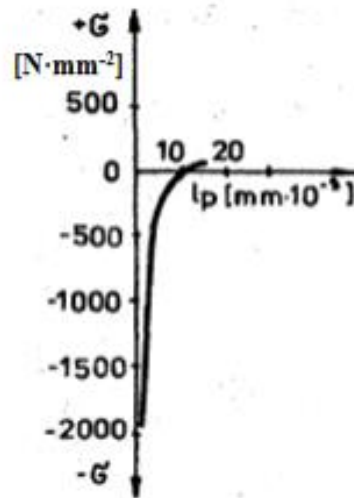
Obrábí se materiál, kde poměr meze pevnosti a smluvní meze kluzu je menší než 1,25 ( $R_m / R_{p0.2} < 1,25$ ). V důsledku tření mezi materiálem a hřbetem řezného nástroje a důsledkem prodloužení vrstvy I. deformované pod břitem řezného nástroje dochází k prodloužení zrn ve směru řezu. Prodloužení zrn společně s objemovou změnou plastickou deformací vede k prodloužení vrstvy I., která je bez napětí právě vlivem plastické deformace. [12]

V důsledku působení břitu na elasticky deformovanou vrstvu II. dochází též k jejímu prodloužení. Pokud by tato vrstva II. nebyla spojena se spodní nedeformovanou vrstvou III., vznikl by v ní tah. Tomu však brání ve skutečnosti vrstva III. Proto se vytvoří ve vrstvě II. tlak, který se vyrovnává tlakem ve vrstvě III. - viz pozice 1, graf a.(Obr.6) Po odjetí působícího nástroje se snaží plasticky prodloužená vrstva I. zachovat svoji délku a vrstva II. se snaží dostat do původního stavu, zkrátit se. Výsledkem vzájemného působení sil obou vrstev je tlak na povrchu a tah ve spodní vrstvě - viz pozice 2, graf a.(Obr.6) [12]

Příklad takovýchto zbytkových napětí z praxe je znázorněn na Obr.7.



Obr.6 Zbytková napětí mechanicky zatížené vrstvy[12]

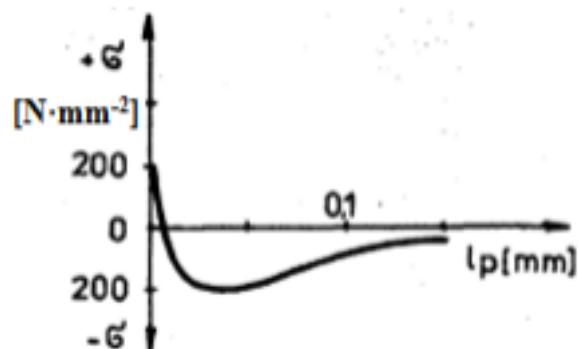


Obr.7 Superfinašování ložiskové oceli[12]

### Druhý případ:

Jiný případ může nastat při obrábění houževnatých a plastických kovů a slitin s poměrem přibližně ( $R_m / R_{p0,2} > 1,25$ ). Při obrábění těchto kovů může dojít k protažení zrn povrchových vrstev přibližně do kolmého směru na obráběný povrch, a v důsledku toho ke zkrácení této vrstvy. Tento vliv většinou převáží změnu hustoty plastickou deformací a v důsledku toho je průběh zbytkových napětí v povrchových vrstvách zcela opačný, viz průběhy  $\underline{b}$  (Obr.6) [12]

Příklad průběhu takových zbytkových pnutí z praxe je na Obr.8

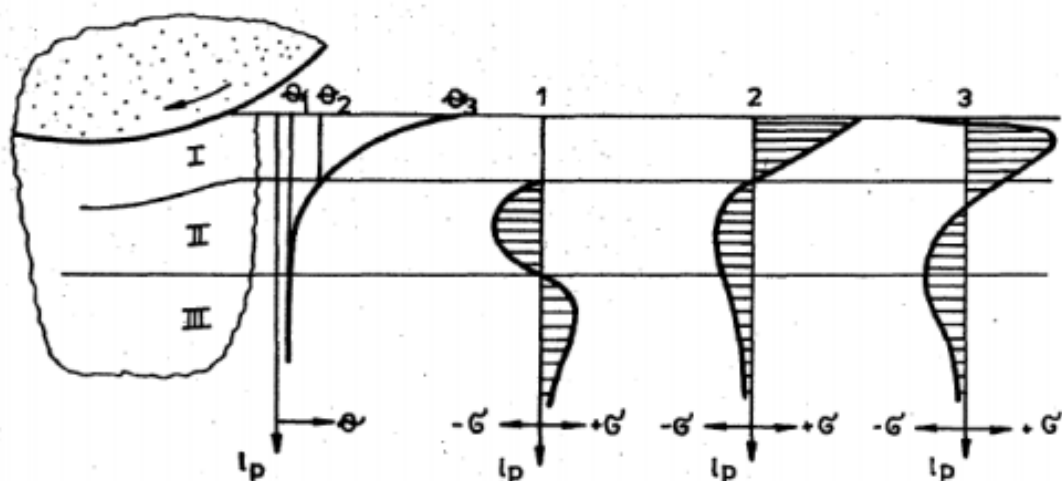


Obr.8 Sousedně frézovaný povrch titanové slitiny[12]

#### 4.1.2 Mechanicky a tepelně zatížená povrchová vrstva

Při mechanickém zatížení povrchové vrstvy a vyšších teplotách, typicky při broušení, dochází k vzniku tahových napětí. Příkladem, v důsledku vysokých řezných rychlostí při obrábění se silně ohřeje povrchová vrstva pod nástrojem a průběh teplot  $\Theta$  v závislosti na vzdálenosti od povrchu  $l_p$  je podle Obr.9. Při teplotě větší než  $\Theta_2$  povrchová vrstva I. v plastickém stavu tzn. bez napětí a nepůsobí na vrstvu II. Vrstva II. se deformuje pružně a vrstva III. není deformací ani teplotou zasažena. [12]

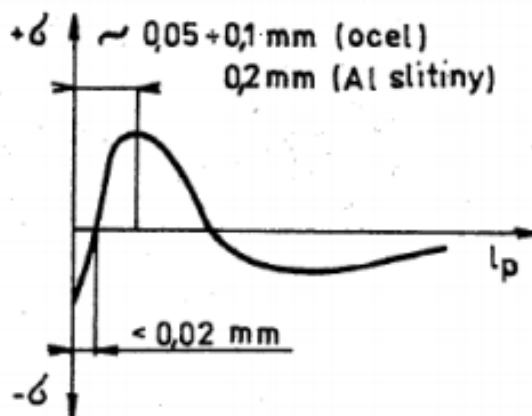
Po přejetí nástroje nastává chladnutí. V určité fázi chladnutí bude teplota ve vrstvě I. nižší než  $\Theta_2$ , proto tato vrstva má snahu se zkrátit. Tomuto zkrácení brání vrstva II. a III., kladený odpor způsobí vznik tahových napětí ve vrstvě I., která jsou vyrovnávána tlakovým napětím ve vrstvách II. a III., viz Obr.9 (pozice 2.) [12]



Obr.9 Zbytková napětí mechanicky a tepelně zatížené vrstvy[12]

Od popsaného průběhu z Obr.9 (pozice 2) se však skutečný průběh zbytkových napětí při obrábění za vysokých teplot liší, viz Obr.9 (pozice 3). Rozdíl mezi průběhy je způsoben změnou struktury tenké povrchové vrstvy a vlivem difuze látek z řezného nástroje a prostředí. [12]

Na Obr.10 je znázorněn přechod zbytkových napětí z Obr.9 (pozice 3). Z obrázku je patrné, že pokles tahových napětí a přechod v napětí tlaková probíhá v tenké povrchové vrstvě dle uvedených obvyklých hodnot pro ocel a hliníkové slitiny. [12]



Obr.10 Přechod zbytkových napětí[12]

#### 4.1.3 Mechanicky a tepelně zatížená povrchová vrstva se změnami struktury

Vlivem teploty se může k výše zmíněným mechanismům připojit mechanismus vzniku zbytkových napětí strukturními změnami. [12]

Různé strukturální složky mohou mít i různý měrný objem. Příkladem, při přeměně kubické plošně středěné mřížky tuhého roztoku v železe  $\gamma$  na kubickou prostorově středěnou mřížku železa  $\alpha$  během ochlazování oceli, dochází k výrazné objemové změně a vznikem strukturních zbytkových pnutí. [12]

Při vysokém ohřevu povrchové vrstvy zakalené oceli v důsledku vysoké teploty řezání může dojít k rozpadu zbytkového austenitu, přechodu tetragonálního martenzitu na kubický a vytvoření troostitu, resp. sorbitu. Pokud při obrábění dojde vlivem vysoké teploty k popouštění a následnému rychlému ochlazení (např. řeznou kapalinou) může dojít k sekundárnímu zakalení povrchové vrstvy. [12]

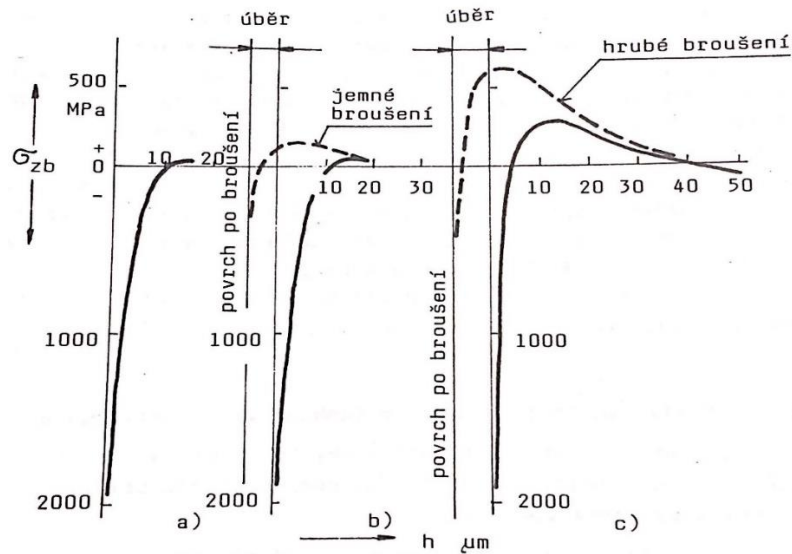
V důsledku vysoké teploty povrchu může kromě toho docházet k absorpci nových látek do povrchové vrstvy z řezného prostředí a nástroje, kdy tento děj může být opět doprovázen vznikem zbytkových napětí.

Zmíněné mechanismy vzniku zbytkových napětí se kombinují a tím vytváří různorodé závislosti zbytkových napětí na vzdálenosti od povrchu (hloubce povrchové vrstvy). [12]

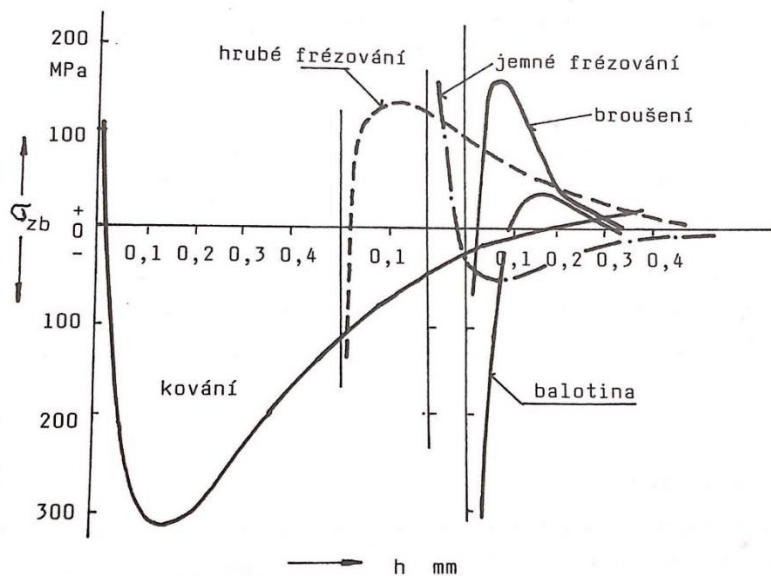
#### 4.1.4 Příklady vlivu jednotlivých technologických operací

Na kvalitu povrchové vrstvy má největší vliv poslední technologická operace. Při nevhodně zvoleném sledu operací však může zůstat částečné ovlivnění povrchové vrstvy z předchozí operace. Na Obr.11 je znázornění průběhu zbytkových napětí u kroužků valivých ložisek po dokončovacích operacích broušení a superfinišování. Z obrázku vyplývá, že největší vliv na zbytková napětí v povrchové vrstvě má poslední operace avšak je také zřejmé, že na výsledný průběh může mít vliv i operace předchozí. V průběhu a pouze superfinišování, výsledná zbytková napětí jsou tlaková až do hloubky asi  $10\mu\text{m}$ , kde dochází k pozvolnému přechodu v tah. V průběhu b předchází superfinišování úběr malého přídatku jemným

broušením a výsledný graf je velmi podobný průběhu a s rozdílem přechodu v tahová napětí o nepatrně vyšší hodnotě tzn. vliv jemného broušení je v podstatě zcela odstraněn následnou operací. U průběhu  $\underline{c}$  hrubé broušení vyvolá výrazná tahová napětí s maximem v hloubce povrchové vrstvy přibližně  $5\mu\text{m}$  a pozvolným klesáním směrem k základnímu materiálu, následným superfinišováním se již nepodaří odstranit vliv předchozí operace a výsledný graf má podobu tlakových napětí blíže povrchu s přechodem v napětí tahová o vyšší hodnotě než v předchozím případě. Přitom povrchové vrstvy s různou velikostí i smyslem zbytkových napětí se mohou při měření např. tvrdosti a drsnosti zdát jako shodné. [12],[21]



Obr.11 Stav napjatosti v povrchové vrstvě kroužků valivých ložisek[21]



Obr.12 Průběh zbytkových napětí v povrchové vrstvě lopatky turbokompresoru[21]

#### 4.1.5 Metody měření zbytkových napětí

V dnešní době existuje celá řada metod pro měření zbytkových napětí, zda už kvantitativních nebo kvalitativních. [15] V tabulce č.1 jsou popsány metody zjišťování zbytkových napětí. Měření zbytkových napětí může být provedeno metodami [5]:

- destruktivní - dojde k poškození zkoumané součásti nebo vzorku.
- polodestruktivní - dojde k částečnému poškození zkoumané součástky, přičemž toto poškození nemá zásadní vliv na funkčnost a spolehlivost.
- nedestruktivní - bez porušení povrchové vrstvy zkoumané součásti

Metody se dají také dělit dle použitého fyzikálního principu nebo způsobu měření. [5]

Metoda zjišťování zbytkových napětí	Tvar součásti	Způsob měření	
Mechanické	plochý tvar	deformace pásků	změna délky
			změna zakřivení
		vrtání děr	válcová díra
			mezikruží
	rotační tvar	změna rozměru válce	odstranění povrchové vrstvy
		trubka	rozříznutí trubky
			odstranění povrchové vrstvy
			odstranění vnitřní vrstvy
		kroužek	rozříznutí
			změna křivosti
podélné pásy z kroužků			
obecný tvar	metoda sítí	deformace sítě	
	křehké laky	vznik trhlin	
	křehké modely	vznik trhlin	
Fyzikální RTG	obecný tvar	difrakce	vzdálenost meziatomových rovin
Fyzikální ultrazvuk	obecný tvar	šíření vln	změna rychlosti
			odraz vln
			vnitřní tlumení
Elektrické	obecný tvar	změna proudu	změna potenciálu procházejícího proudu
			změna velikosti vířivých proudů
			změna indukčního toku
Magnetické	obecný tvar	změny magnetismu	magnetická indukce
			zbytkový magnetismus
Akustické	obecný tvar	prozvočitelnost	četnost akustických emisí
Chemické	obecný tvar	difuze vodíku	trhliny na povrchu
		změna chemické aktivity	změna struktury

Tabulka č.1 Metody zjišťování zbytkových napětí [5]

Jak vzpomíná Nikolaj Ganev, je třeba poznamenat, že ani jeden ze známých způsobů měření zbytkových napětí není univerzální, protože jednotlivé metody je možné zpravidla úspěšně aplikovat vždy jen na určité druhy materiálů (krystalické, průhledné, feromagnetické apod.). Důležitým faktem zůstává, že zbytkové napětí lze měřit pouze pomocí průvodních jevů, které zbytkové napětí ovlivnily (deformace, vodivost atd.). Dá se však konstatovat, že výsledky jednotlivých relativních měření jsou dostatečně spolehlivé nezávisle na použité metodě, ačkoli hodnoty napětí určených různými metodami mohou mít až řádové rozdíly. [5]

## 4.2 Mechanické metody

### 4.2.1 Odvrtávací metoda

Metoda se někdy označuje jako Matharova metoda v souladu se jménem autora, který ji v roce 1934 poprvé publikoval. Tato metoda je založena na vyvrtání otvoru malého průměru (obvykle 1 až 4 mm) do hloubky odpovídající přibližně průměru otvoru. [15]

Využití metody je založeno na předpokladech, že v oblasti tenzometrické růžice je homogenní rovinná zbytková napjatost. Dále hlavní zbytkové napětí kolmé k povrchu je ve všech hloubkách nulové a z hlediska teorie pružnosti se tedy jedná o těleso typu stěny. Dále je důležitý předpoklad, že jak před, tak i po vyvrtání otvoru, je v tělese lineárně elastická napjatost. [15]

Vyvrtáním průchozího otvoru o poloměru  $r_0$  dojde v místě P určeném polárními souřadnicemi  $(\rho, \varphi)$  k uvolnění napětí, jehož velikost lze získat porovnáním napjatosti v pevně definovaném místě před a po vyvrtání otvoru. Zavede-li se předpoklad homogenity a izotropie tenké desky, lze dosadit do Hookova zákona a psát vztahy pro uvolněné radiální a tangenciální deformace  $\varepsilon_\rho$  a  $\varepsilon_n$  [17]:

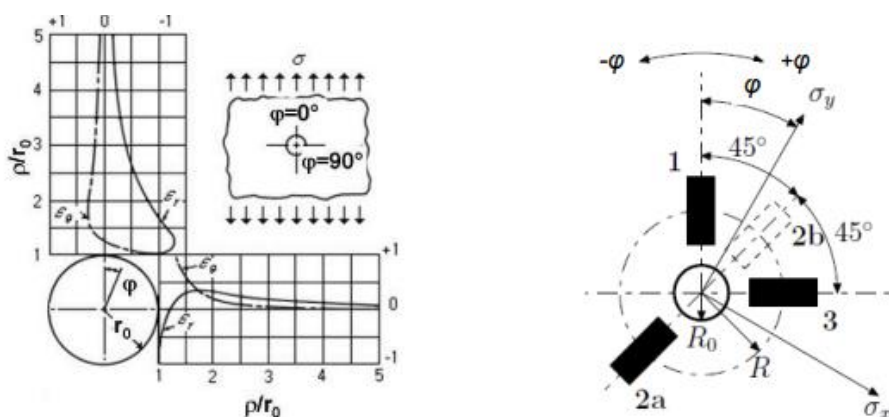
$$(1) \quad \varepsilon_\rho = \sigma(A + B \cdot \cos 2\varphi),$$

$$(2) \quad \varepsilon_n = \sigma(-A + C \cdot \cos 2\varphi),$$

kde pro konstanty úměrnosti A, B, C platí:

$$(3) \quad A = -\frac{1+\mu}{2E} \cdot \left(\frac{r_0^2}{p^2}\right), B = -\frac{(1+\mu)}{2E} \cdot \left[\left(\frac{4}{1+\mu}\right) \cdot \frac{r_0^2}{p^2} - \frac{3r_0^4}{p^4}\right], C = -\frac{1+\mu}{2E} \cdot \left[\left(-\frac{4\mu}{1+\mu}\right) \cdot \frac{r_0^2}{p^2} - \frac{3r_0^4}{p^4}\right]$$

Z průběhů radiálních a tangenciálních deformací, znázorněných na Obr.13 plyne, že nejvhodnější polohou pro měření deformací je oblast, kde  $\rho/r_0 \in (2,2; 3,4)$ , přičemž se měří radiální deformace, neboť jsou v této oblasti téměř trojnásobně větší než tangenciální. [17],[18]



Obr.13 (vlevo) Radiální a tangenciální deformace v závislosti na vzdálenosti od odvrtného otvoru pro tenkou desku ve stavu jednoosé napjatosti, (vpravo) schéma odporové tenzometrické růžice pro určení zbytkových napětí [18].

Předpoklad elastického materiálu umožňuje využití principu superpozice a od jednoduchého případu jednoosé napjatosti lze přejít ke dvouosému. Pro deformaci v radiálním směru platí [17],[18]:

(4)

$$\varepsilon_\rho = \sigma_x(A + B \cdot \cos 2\varphi) + \sigma_y(A - B \cdot \cos 2\varphi) = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\varphi = \varepsilon_\rho(\sigma_x, \sigma_y, \varphi)$$

V rovnici (4) vystupují tři neznámé: hlavní napětí  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  a úhel  $\varphi$ , které lze vypočítat, získá-li se hodnota radiální deformace ve třech nezávislých směrech. Z těchto důvodů jsou v odporových tenzometrech růžice, které mají nejčastěji tři tenzometry.

Deformace, které měří tenzometry označené a, b, c, jsou rovny [17]:

$$\varepsilon_a = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos 2\varphi,$$

$$(5) \quad \varepsilon_b = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos 2(\varphi + 45^\circ),$$

$$\varepsilon_c = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos 2(\varphi + 90^\circ).$$

jejichž řešením jsou následující vztahy:

$$\sigma_{max} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b}{4A} + \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2},$$

$$(6) \quad \sigma_{min} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b}{4A} - \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2},$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{\varepsilon_a - 2\varepsilon_b + \varepsilon_c}{\varepsilon_c - \varepsilon_a}.$$

Úhel  $\varphi$  je měřen od tenzometru a k nejbližší hlavní ose podle následujících vztahů ( $\varphi$  je kladný ve směru od tenzometru a k tenzometru c):



$\varepsilon_c > \varepsilon_a$ .....  $\varphi$  je vztažen k  $\sigma_{max}$ ,

$\varepsilon_c < \varepsilon_a$ .....  $\varphi$  je vztažen k  $\sigma_{min}$ ,

$\varepsilon_c = \varepsilon_a$  ..... $\varepsilon_b < \varepsilon_a$ ..... $\sigma_{max}$  je v  $\varphi = 45^\circ$ ,

..... $\varepsilon_b > \varepsilon_a$ ..... $\sigma_{max}$  je v  $\varphi = -45^\circ$ .

Tímto byly určeny velikosti i směry hlavních napětí. Je nutné a důležité zdůraznit, že vztahy (6) byly odvozeny za předpokladů dvojsového stavu napjatosti lineárně elastické, izotropní a homogenní desky, bez gradientu napětí do hloubky a je předpokládáno vyvrtání průchozího otvoru o malém průměru [18].

Odvrtávací metoda může být použita i pro stanovení gradientu zbytkového napětí pro materiál s dvouosým stavem napjatosti. Mezi nejpoužívanější postupy patří: přírůstková metoda, metoda průměrných napětí, integrální metoda a metoda mocninné řady. Metoda mocninné řady s použitím velkého počtu malých vrtacích kroků je vhodnější v případě hladkého průběhu napětí, zatímco integrální metoda lépe vystihuje skutečný průběh, pokud průběh obsahuje náhlé změny. Velkou nevýhodou integrální metody je ovšem použití dat z malého počtu vrtacích kroků [17]. Přibližná metoda mocninné řady je založena na výpočtu koeficientů, které odpovídají uvolněným deformacím při vrtání otvoru do pole zbytkového napětí. Toto pole je proloženo mocninnou řadou, kde proměnná je vzdálenost od povrchu  $z$ . Obvykle se volí kombinace napětí [17]

$$(7) \quad P = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}, Q = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}, T = \frac{\tau_{xy}}{2},$$

na které je aplikována metoda nejmenších čtverců.

Transformované napětí  $P(z)$  se vypočítá z transformované deformace  $p(z)$

$$(8) \quad \begin{bmatrix} \sum {}^0\bar{a}(z) & \sum {}^0\bar{a}(z) \\ \sum {}^1\bar{a}(z) & \sum {}^1\bar{a}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^0\bar{P} \\ {}^1\bar{P} \end{bmatrix} = \frac{E}{1+\mu} \begin{bmatrix} \sum {}^0\bar{a}(z) & {}^0p(z) \\ \sum {}^1\bar{a}(z) & {}^0P(z) \end{bmatrix},$$

$$(9) \quad P(z) = {}^0P + {}^1P.z$$

Další výpočty se provedou pro transformovaná napětí  $Q(z)$  a  $T(z)$  z transformovaných deformací  $q(z)$  a  $t(z)$  a koeficientů  $b(z)$ .

Podstata a název integrální metody jsou založeny na úvaze, že deformace naměřená na povrchu v důsledku odvrtání s celkovou hloubkou  $z$  je integrální hodnotou infinitesimálních deformací od zbytkových napětí působících v hloubkách  $Z$ , kde  $0 \leq Z \leq z$ . Pro uvolněnou deformaci po vyvrtání otvoru do hloubky  $z$  od povrchu lze psát integrální vztah [18]:

$$(10) \quad \varepsilon_p(z) = \frac{1}{2E} \int_0^z \{ (1 + \mu)\hat{A}(Z, z)[\sigma_x(Z) + \sigma_y(Z)] + \hat{B}(Z, z)[\sigma_x(Z) - \sigma_y(Z)] \} dZ,$$

který se z důvodu počítačového zpracování dat diskretizuje pro  $j$ -tou vrstvu na

$$(11) \quad \varepsilon_{pj}(z) = \frac{1}{2E} \sum_{i=1}^j \bar{a}_{ji} (1 + \mu) (\sigma_{xi} + \sigma_{yi}) + \bar{b}_{ji} (\sigma_{xi} - \sigma_{yi})$$

kde se koeficienty  $a_{ji}$  a  $b_{ji}$  získají kalibrací. Pro různé se třemi tenzometry se za účelem zjednodušení výpočtu požadovaných hodnot  $\sigma_{max}$  a  $\sigma_{min}$  vypočítají kombinace deformací a napětí:

$$(12) \quad p_j = \frac{\varepsilon_{3j} + \varepsilon_{1j}}{2}, q_j = \frac{\varepsilon_{3j} - \varepsilon_{1j}}{2}, t_j = \frac{\varepsilon_{3j} + \varepsilon_{1j} - 2\varepsilon_{2j}}{2}$$

$$(13) \quad P_j = \frac{\sigma_{3j} + \sigma_{1j}}{2}, Q_j = \frac{\sigma_{3j} - \sigma_{1j}}{2}, T_j = \frac{\sigma_{3j} + \sigma_{1j} - \sigma_{2j}}{2}$$

Po dosazení vztahů (9),(10) do rovnice (8) se získá vyjádření pro kombinace napětí odpovídajících  $j$ -té vrstvě:

$$(14) \quad P_j = \frac{1}{\bar{a}_{jj}} \left[ \frac{E p_j}{(1 + \mu)} - \sum_{i=1}^{j-1} \bar{a}_{ji} P_i \right], Q_j = \frac{1}{\bar{b}_{jj}} \left[ E q_j - \sum_{i=1}^{j-1} \bar{b}_{ji} Q_i \right], T_j = \frac{1}{\bar{b}_{jj}} \left[ E t_j - \sum_{i=1}^{j-1} \bar{b}_{ji} T_i \right],$$

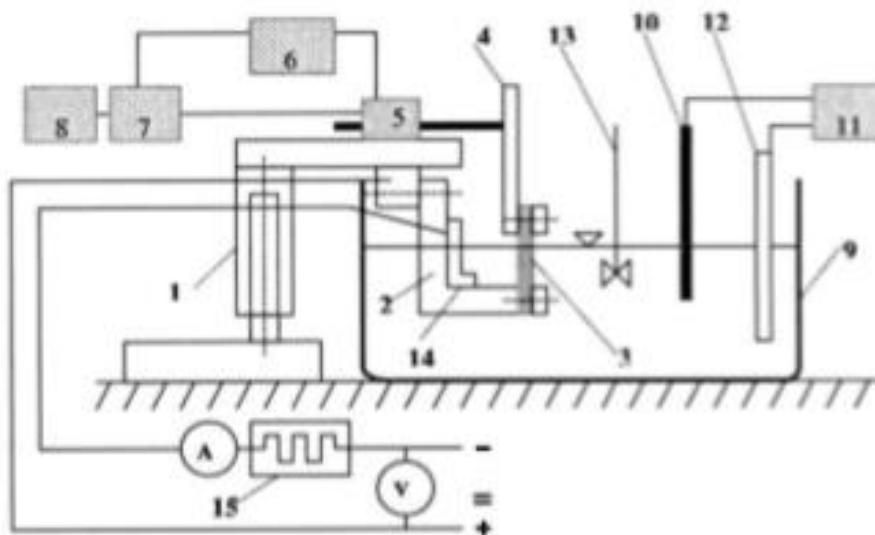
ze kterých se přímo vypočítá napětí  $\sigma_{max}$  a  $\sigma_{min}$  v  $j$ -té vrstvě:

$$(15) \quad \sigma_{maxj} = P_j \pm \sqrt{Q_j^2 + T_j^2}$$

$$\sigma_{minj}$$

#### 4.2.2 Metoda postupného elektrolytického rozpouštění (vetknutý nosník)

Metoda postupného elektrolytického rozpouštění je založena na mechanice průhybu nosníku při odebrání části jeho povrchu. Měření umožňuje poměrně snadným způsobem zjišťovat průběhy zbytkových napětí v závislosti na hloubce pod povrchem. Výhoda je nahrazení mechanického nebo chemického odstraňování povrchových vrstev materiálu elektrolytickým (anodovým) rozpouštěním (Obr.14) [16].



Obr.14: Schéma zařízení pro měření zbytkových napětí; 1 – stojan, 2 – upínací třmen, 3 – zkušební vzorek, 4 – měřicí třmen, 5 – indukční snímač, 6 – napájecí obvody, 7 – obvod pro el. nastavení polohy snímače, 8 – registrační počítač, 9 – nádoba s elektrolytem, 10 – kontaktní teploměr, 11 - automatické spínací relé, 12 – topné tělísko, 13 – míchadlo, 14 – katoda, 15 – variátor [4]

Příkladem, vzorek je nejprve proměřen a zvážen a poté upnut do třmenů měřícího zařízení. Plochy vzorku, které nebudou elektrochemicky rozpouštěny, jsou pokryty ochranným voskem. Část povrchu, na kterém se bude zjišťovat průběh zbytkových napětí se očistí a odmastí. Takto připravený vzorek se ponoří do lázně a po vyrovnání teplot vzorku a lázně je elektrochemicky rozpouštěn. K zajištění časově rovnoměrného úběru je lázeň temperována a promíchávána, napájecí proud je stabilizován a spolu s napětím průběžně kontrolován. [4],[16]

Deformace vzorku  $\varepsilon$  vznikající odstraňováním vrstev je ze snímače přenášena na zapisovač. Získaný časový průběh deformace  $\varepsilon(t)$  lze převést na závislost deformace vůči vzdálenosti od povrchu  $\varepsilon(z)$ . Za předpokladu rovnoměrného časového úběru je možno rozpuštěnou hloubku určit z váhového úbytku a její závislost na čase považovat za lineární.

Výpočet zbytkových napětí v jednotlivých vrstvách vzorku předpokládá konstantní zbytkové napětí ve vrstvě  $\Delta z$ . Odebráním vrstvy  $\Delta z$  z vetknutého nosníku šířky  $b$  způsobí zbytkové napětí  $\sigma$  stejnou deformaci, jako kdyby na něj působila vnější síla  $F$  velikosti [16]:

$$(16) \quad F = \Delta z \cdot b \cdot \sigma,$$

Průhyb vetknutého nosníku délky  $l$  způsobený odebráním vrstvy  $\Delta z$  je [16]:

$$(17)$$

$$y = \frac{1}{EI} \int_0^1 M \cdot x \cdot dx,$$

kde

$$(18) \quad I = \frac{bh^3}{12},$$

je moment setrvačnosti průřezu.

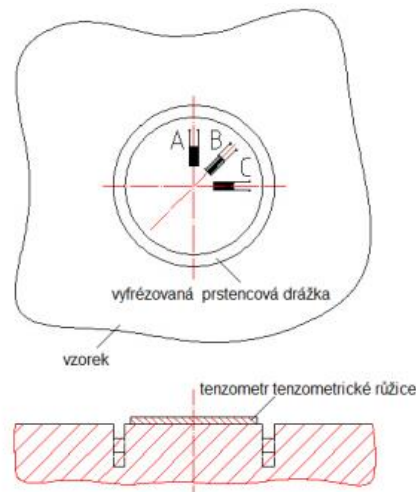
Výsledný vztah pro výpočet zbytkového napětí v n-té vrstvě pod povrchem je dán vztahem [16]:

$$(19) \quad \sigma_n = \sigma_{vn} - \sum_{i=1}^{n-1} \sigma_1 \cdot \frac{4 \cdot \Delta z_1}{h_1},$$

$$(20) \quad z_i = z_0 - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta z_i.$$

### 4.2.3 Metoda sloupku

Při použití této metody se uvolňuje sloupek materiálu o průměru 15 – 150 mm a to drážkou o hloubce (0,25 ÷ 1,5) průměru sloupku. Uvolněné deformace sloupku jsou dnes výhradně měřeny odporovými tenzometry (Obr.15). [19]



Obr.15 Metoda sloupku[19]

Tuto metodu je možno řadit do skupiny polodestruktivních metod -i když v některých případech může být narušení povrchu tělesa již značné. S ohledem na tuto skutečnost je vhodná k použití především na rozměrných tělesech. Je poměrně rychlá a vhodná pro použití v technické praxi. Těmito přednostmi vyniká nad destruktivní metody, kdy dochází k odstraňování vrstev materiálu tělesa nebo k jeho úplnému zničení. [19]

Metodu sloupku lze použít pro vyšetřování zbytkové napjatosti proměnné s hloubkou pod povrchem. Pak je ovšem třeba k tomuto účelu vyšetřit potřebné kalibrační koeficienty (experimentálně nebo metodou konečných prvků). Speciální frézovací přípravek pak umožňuje stálé elektrické připojení tenzometrů a to i v průběhu frézování drážky. [20]

Metodu sloupku publikoval poprvé v r.1951 Milbradt (ten však vrtal nejdříve otvor uprostřed tenzometrické růžice, který pak sloužil jako vedení při frézování drážky) V r.1953 ji dále rozvinul Gunnert. Oba měřili deformace ještě mechanickými průtahoměry (odporové tenzometry se zde začaly používat až později). [19]

#### 4.2.4 Metody odstraňování vrstvy materiálu

Odstraňováním povrchových vrstev materiálu dochází k porušení rovnováhy vnitřních sil a tím dochází k deformaci materiálu. [19]

Předpoklady k určení zbytkových napětí [19]:

1. homogenní a izotropní materiál tělesa,
2. se směrem hlavního napětí jsou totožné osy tělesa,
3. napětí ve směru kolmém na odstraňovanou vrstvu je nulové, nebo nepodstatné,
4. napětí v příčném směru k podélné ose považujeme za nepodstatné (u prutových těles), v úvahu se berou hlavní napětí ve směru podélné osy tělesa.

V praxi se určuje střední hodnota zbytkového napětí v rozmezí tloušťky každé odebírané vrstvy. K možnému vysokému spádu napětí je tloušťka odebírané vrstvy malá (třeba 0,01 mm). Na odebrání takové vrstvy není vhodné použít obrábění, po kterém jsou vnesené napětí do hloubky více než 0,1 mm. Povrch se opracovává chemicky, případně elektrochemicky. [22]

#### 4.2.5 Dělicí metody

Dělicí metody patří k nejznámějším. Znamé jsou Sachsovy práce, které se zabývají zjišťováním zbytkových napětí ve válcových tělesech měřením deformace po postupném soustružení povrchu materiálu, případně vrtáním otvoru, jehož průměr se postupně zvětšuje. Metoda se využívá na rozdělení tělesa na několik částí, vyřezávání různých tvarů a různé uspořádané drážky. [19]

Vyhodnocení jsou realizovány na základě měření uvolněných deformací, ze kterých se určují zbytkové napětí. Využitím analytických metod řešení napjatosti a deformace speciálních typů těles (proud, deska, válec), také metoda konečných prvků, která poskytuje výstižnější výsledky. [22]

Metoda konečných prvků a numerických metod je to bod, pod kterým rozumíme transformující systém parciálních nebo obyčejných diferenciálních rovnic, které popisují úlohy na algebraickém systému rovnic řešících se v počítači. [19]

### **4.3 Rentgenová difrakce**

Principem rentgenové difrakce je rozptyl rentgenových paprsků na krystalové mřížce materiálu. Rentgenové záření je elektromagnetické vlnění s vlnovou délkou  $\lambda \cong 10$  až 0,01 nm, které vzniká po dopadu termálně emitovaných a urychlených elektronů na kovový materiál, jako jsou měď, molybden nebo kobalt. Rentgenové záření, které je po filtraci monochromatické, částečně se absorbuje do materiálu a částečně se pod určitým úhlem od materiálu odrazí, čímž dojde k rozptylu záření tzv. difrakci. [14]

Rozptylem záření na sousedních mřížkových rovinách vyniká tzv. interferenční maximum ve směru difrakčního úhlu  $\theta$ . Tento difrakční úhel  $\theta$  je dán tzv. Braggovým vztahem [14],

$$(21) \quad n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta$$

kde:  $n$  - celé číslo (řád difrakce)

$\lambda$  - vlnová délka dopadajícího rentgenového záření

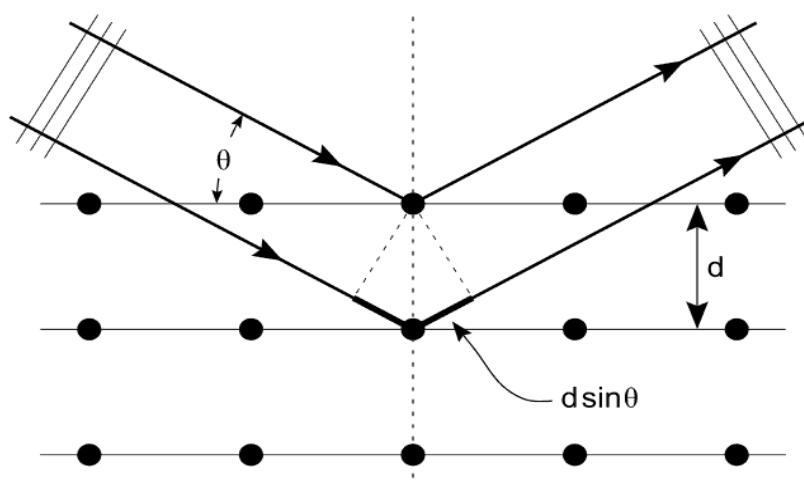
$d_{hkl}$  - vzdálenost strukturálních rovin polykrystalického materiálu

$hkl$  - roviny dopadajících lúčů

$\theta$  - Bragg úhel, je úhel dopadu rovný úhlu odrazu

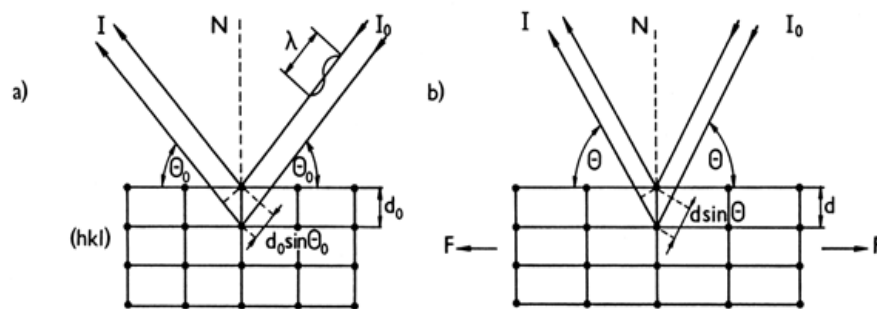
Podmínkou pro vznik difrakce, tedy pro vznik Braggova vztahu je, že „každá rovina v krystalu rozptýlí určité množství záření, ale výsledný rozptyl od velkého počtu rovin bude mít dostatečnou intenzitu pro pozorování, pokud se vlny vycházející od všech rovin navzájem zesílí“.

[23]



Obr.16 Odvození Braggova vztahu [23]

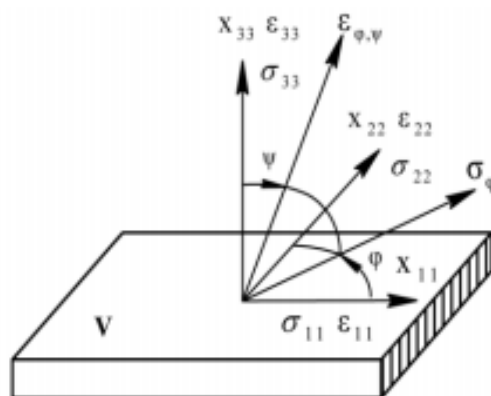
Podstatou rentgenové tenzometrie, pro měření zbytkových napětí, je tedy rozptyl, difrakce, rentgenových paprsků na krystalech k měření změn vzdáleností atomových mřížkových rovin vyvolaných napětím (Obr.16) tzn., že změna mezirovinové vzdálenosti se projeví změnou Braggova úhlu. [14]



Obr.17 Deformace vzdáleností mřížkových rovin (hkl) a změny úhlové polohy interferenčního maxima;  $I_0$  a  $I$  jsou intenzity dopadajícího a difraktovaného svazku rentgenového záření; a) nenapjatý stav, b) změny vyvolané silou  $F$  [14]

Z Obr.17 je patrné, že porovnáváme změnu vzdáleností  $\underline{d}$  mezi sousedními rovinami v krystalické mřížce, když je tato mřížka v nezdeformovaném stavu a když je tato mřížka v zdeformovaném stavu.

Tyto hodnoty dosadíme do vztahu, popisující mřížkovou deformaci  $\varepsilon = d - d_0 / d_0$ , kdy  $\underline{d}$  je vzdálenost sousedních silou zdeformovaných mřížkových rovin a  $\underline{d}_0$  je vzdálenost sousedních nezdeformovaných mřížkových rovin. [14]



Obr.18: Systém souřadnic spojených se vzorkem  $V$  [14]

Podle Obr.18, při splnění podmínky lineární teorie elasticity, lze mřížkovou deformaci  $\varepsilon_{\phi\psi}$  v libovolném směru  $\phi\psi$  vyjádřit vztahem [14]:

$$(22) \quad \varepsilon_{\phi\psi} = \frac{\nu+1}{E} (\sigma_{11} \cdot \cos^2\phi + \sigma_{12} \cdot \sin 2\phi + \sigma_{22} \cdot \sin^2\phi - \sigma_{33}) \sin^2\psi + \frac{\nu+1}{E} (\sigma_{13} \cdot \cos\phi + \sigma_{23} \cdot \sin\phi) \sin 2\psi + \frac{1}{E} \sigma_{33} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22})$$

Úhel  $\phi$  je směr napětí  $\sigma_{\phi}$  vzhledem k ose  $x_{11}$ , úhel  $\psi$  je mezi osou  $x_{33}$  a směrem deformace  $\varepsilon_{\phi\psi}$ , je normálou k povrchu. Pro dvouosou napjatost, při ztotožnění mřížkové deformace  $\varepsilon$  s mřížkovou deformací  $\varepsilon_{\phi\psi}$  v libovolném směru  $\phi\psi$  dostaneme základní rovnici rentgenografického měření napětí podle tzv. metody „ $\sin^2\psi$ “ ve tvaru:

$$(23) \quad \varepsilon_{\phi\psi}^{hkl} = \frac{1}{2} s_2^{hkl} \cdot \sigma_{\phi} \cdot \sin^2\psi + s_1^{hkl} (\sigma_1 + \sigma_2)$$

kdy

$$(24) \quad \sigma_{\varphi} = \sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \cdot \sin^2 \varphi$$

Pro jednoosou (izotropní) napjatost dostaneme rovnici ve tvaru:

$$(25) \quad \varepsilon_{\varphi\psi}^{hkl} = \frac{1}{2} s_2^{hkl} \sigma \cdot \sin^2 \psi + 2s_1^{hkl} \sigma$$

$$(26) \quad \frac{1}{2} s_2^{hkl} = \left( \frac{\nu+1}{E} \right)_{rtg}, \quad s_1^{hkl} = \left( -\frac{\nu}{E} \right)_{rtg}$$

$s_1, s_2$ - rentgenografické elastické konstanty pro reflektující systém rovin (hkl).

## 4.4 Magnetické metody

Do této kategorie se řadí metody, které jsou založeny na zjišťování souvislostí mezi napjatostí a magnetickými vlastnostmi nebo projevy zaznamenávanými při magnetizaci.

Jde o nedestruktivní metodu, využitelnou pro měření zbytkových napětí ve feromagnetických materiálech. Můžeme se setkat s využíváním Barkhausenova jevu a magnetostrikce (magnetostrikčního jevu). [19]

### 4.4.1 Barkhausenův šum

Jde o nedestruktivní metodu, využitelnou pro měření zbytkových napětí ve feromagnetických materiálech. [19]

Barkhausenův šum je působení výměnných sil mezi sousedními atomy, je příčinou magnetizace látky. Působením těchto sil nastává souhlasné uspořádání magnetických polí atomů v látce (malé oblasti), i bez vnějšího působení. Tímto vznikají v látce zmagnetizované mikroskopické oblasti v objemu  $10^{-3}$  až  $10^1 \text{ mm}^3$  tzv. Weissovy domény (magnetické domény). Tyto jednotlivé domény jsou však orientovány nahodile. Působením silnějšího magnetického pole na těleso v objemu  $10^{-6}$  až  $10^{-5} \text{ mm}^3$  dochází ke náhlé změně směru magnetického momentu do směru pole. Popsaný proces je projevem Barkhausenového efektu. [24]

Barkhausenův efekt způsobuje v silném magnetickém poli přibývání magnetizace malými skoky, nikoliv tedy spojitě. Tímto se indukují proudové nárazy v cívce. Zesílením můžeme pozorovat jako akustický Barkhausenův šum. [24]

Barkhausenův šum pro většinu materiálů má začínající spektrum na magnetizačním kmitočtu a končící na 250 kHz. Exponenciálně je signál tlumen v závislosti na vzdálenosti, která projde uvnitř materiálu. Útlum určuje hloubku, tím je možné určit informace o měřené hloubce. Hloubka měření se běžně pohybuje od 0,01 do 3 mm. Měření probíhá 2 až 10 s, měřená plocha je velikostí řádově  $\text{mm}^2$ . [24]

Faktory ovlivňující hloubku jsou [19]:

1. frekvenční rozsah generovaného signálu,



2. vodivost a permeabilita zkoušeného materiálu.

Intenzita signálu je ovlivňována [19]:

1. rozložením napětí a jeho přítomností (ovlivňují cestu domény). Lze tedy určit zbytkových napětí a směry hlavních napětí.

2. metalurgickou strukturou se dají také zjistit změny v mikrostruktuře v důsledku únavy nebo creepu.

Takže systém, který využívá Barkhausenov šum je podrobně popsán v kapitole 4.4.1.1

#### 4.4.1.1 Přístroj STRESSCAN

STRESSCAN je přístroj na zjišťování zbytkových napětí pracující na principu Barkhausenova šumu. Tento přístroj patří k magnetické metodě (při měření dochází k zmagnetizování látky).

Přístroj se skládá ze tří částí [19]:

- kalibrační jednotka
- řídicí a měřicí jednotka
- řídicí PC

K uskutečnění měření se musí do přístroje nahrát kalibrační křivka, která je provedena na kalibračním zařízení, složeného ze dvou polohovacích zařízení. Tato zařízení slouží k ohýbání kalibračního vzorku, jejichž směry jsou od sebe nezávislé. Ten kalibrační vzorek je ve tvaru kříže, v kalibračním vzorku jsou umístěny tenzometry a nad vzorkem je umístěn kalibrační snímač. [24]

Mobilními zařízeními jsou řídicí a měřicí jednotka, jejichž režimy jsou [24]:

1. kalibrace - prohlíží se kalibrační vzorek. Naměřená plocha se ukládá do paměti řídicí jednotky a vyhodnocuje se při režimu měření experimentu,
2. měření - jednorázově se odečítají hodnoty,
3. experiment - sbírají se souvislé data,
4. nastavení - k lepšímu řízení slouží PC, které také ovládá kalibrační polohovací zařízení.

Na vlastní nastavení slouží univerzální snímače obsahující 2 páry feromagnetických břitů. Jeden z párů slouží k magnetizaci a druhý slouží pro snímání odezvy. Snímače se liší provedením špiček, které jsou přizpůsobené pro měření různých povrchů součástek. [19],[24]



Obr.19 Měřicí zařízení Stresscan 500C [24]

#### 4.4.2 Magnetostrikční metoda

Jev magnetostrikce, tj. změna rozměrů těles z feromagnetických látek vlivem magnetického pole, je znám již dlouhou dobu. Magnetostrikce je kladná nebo záporná podle toho, zda se těleso ve směru působení magnetického pole prodlužuje nebo zkracuje. [25]

Existuje také reciprokový jev – magnetoelasticita, kdy magnetické vlastnosti (magnetizace a permeabilita) feromagnetických látek se mění s mechanickým namáháním. U látek s kladnou magnetostrikcí se zvětšují, se zápornou zmenšují. [19]

Při deformaci (a tedy i namáhání) feromagnetické části potom můžeme pozorovat změny

- permeability,
- směru magnetického toku,
- remanentní indukce projevující se změnou tvaru magnetizační křivky

##### **a) Magnetický snímač tvaru U**

V magneticky anizotropním prostředí (vyvolaném namáháním tělesa) není permeabilita materiálovou konstantou, ale symetrickým tenzorem 2. řádu. Pro vyšetřování směrové permeability je používán příložný snímač tvaru U se dvěma cívkami – budicí (magnetizační) a měřicí. Magnetický obvod snímače se uzavírá přes měřené těleso. Budicí vinutí je napájeno střídavým napětím. Snímač detekuje permeabilitu především ve směru osy snímače, částečně též ve směru kolmém ke své ose (to lze výrazně omezit úpravou jádra cívk). Je však třeba přihlídnout k tomu, že závislost změn permeability na mechanickém napětí není lineární. Vedle makroskopických napětí mají vliv na permeabilitu též mikroskopická napětí a textury. [19]

## b) Snímač magnetické anizotropie

Magnetický obvod snímače se rovněž skládá ze dvou částí - z části budicí (opatřené budicím vinutím) a části měřicí (s cívkou a měřicím vinutím). Oba magnetické obvody snímače mají tvar U a jsou na sebe kolmé, přičemž konce pólových nástavců jsou v jedné rovině. Tato rovina je vzdálena od povrchu měřeného tělesa o definovanou hodnotu a je stavitelná. Budicí vinutí je napájeno střídavým proudem. V sekundárním vinutí (měřicím) se v případě, že na měřenou část nepůsobí žádné mechanické napětí a je homogenní (magnetický můstek je vyvážen), nebude indukovat žádné napětí. [19]

Při působení mechanického napětí se změní permeabilita materiálu měřené části a magnetické siločáry budicího obvodu se zdeformují. Velikost magnetických odporů sousedních ramen magnetického můstku se změní (magnetický můstek se rozváží) a v měřicím magnetickém odporu bude působit střídavý magnetický tok. V jeho cívkce se bude indukovat elektromotorické napětí, jehož velikost závisí na působícím mechanickém napětí. Budicí magnetický tok, který se uzavírá měřenou částí, vniká do určité hloubky do feromagnetika. Při použití průmyslového kmitočtu (50 Hz) je ekvivalentní hloubka vniku kolem 1 až 2 mm, při 5 kHz je to 0,1 až 0,2 mm. Obecně lze říci, že snímač měří střední hodnotu mechanického napětí do určité hloubky feromagnetika. [19]

Při vlastním měření rovinné napjatosti se nejprve otáčením snímače magnetické anizotropie určí směry hlavních zbytkových napětí (indukované napětí dosahuje svého maxima a minima). Potom se magnetickým snímačem tvaru U stanoví v těchto hlavních směrech příslušná permeabilita a následně pomocí kalibračních křivek i velikosti hlavních napětí (to však pouze v případě, kdy jsou obě hlavní napětí tlaková – jinak lze stanovit pouze jejich rozdíl). [19]

Pokud se týče přesnosti metody, pak se uvádí, že v případě jednoosé napjatosti v nízkouhlikové oceli je chyba do  $\pm 5$  MPa – ovšem při nízkých hodnotách zbytkových napětí. Při vysokých zbytkových napětích však chyba výrazně vzrůstá (v blízkosti saturevaného stavu). Výrazného zvýšení přesnosti lze dosáhnout při získání kalibračních křivek na vzorku ze stejného materiálu jako je materiál vyšetřovaného tělesa – to je ovšem v praxi málokdy možné. [19],[25]

## 4.5 Ultrazvukové metody

Metody pomocí ultrazvuku (také akustoelastický jev) jsou založeny na lineární změně rychlosti šíření zvuku v kovech, v závislosti na namáhání. [26]

Druhy vln [19]:

1. Podélné vlny - body kontinua se pohybují ve směru šíření vlnění. Využívají se pro určení celkových napětí, tj. průměrných napětí po tloušťce vyšetřované části v daném místě. Rychlost podélných vln je úměrná součtu hlavních napětí.
2. Příčné vlny - body kontinua se pohybují kolmo ve směru šíření vlnění. Využití je stejné jako u podélných vln (celkového napětí). Rozdíl rychlostí dvou příčných vln polarizovaných kolmo na směr šíření je úměrný rozdílu hlavních napětí.
3. Rayleighova vlny, nazýváme také povrchové akustické vlny. Jejich šíření je pod povrchem součástky. Zásah vln je do hloubky rovné přibližně vlnové délce. U frekvence 3 MHz

zasahují vlny přibližně do hloubky 1 mm (oceli, hliníku a jejich slitin). Hloubky pronikání Rayleighova vln jsou omezené, proto se používá kombinace s příčnými a podélnými vlnami.

Hloubka může být řízena frekvencí vlnění. Mohou být vhodné při vyšetřování změn zbytkových napětí s hloubkou pod povrchem.

Ultrazvuk využívá akustické šíření vln za hranicí pásma slyšitelnosti. Je to mechanické vysokofrekvenční vlnění zařazeno mezi nedestruktivní metody. Vytvoření těchto vln je možné v jakémkoli prostředí. Metoda slouží ke zjišťování struktury i složení fyzikální konstanty, tloušťky a poškození materiálů. [27]

V inženýrské praxi se používá ultrazvukové vlnění s frekvencí od 8 kHz do několika MHz. Ultrazvuk vykazuje typické vlastnosti mechanického vlnění - rozptyl, přenos, odraz, ohyb, interferenci a útlum. Může jít o podélné nebo příčné vlnění, resp. o jejich kombinaci, a mohou se vyskytnout i jako ultrazvukové, povrchové nebo Rayleighova vlny. [27]

Rychlost šíření podélných ultrazvukových vln je závislá na druhu a tvaru zkoušeného výrobku a šířícího se vlnění. Např. rychlost šíření podélných vln ve vzduchu je  $330 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , ve vodě  $1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , v oceli  $5800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Příčné vlny mají v tuhých látkách přibližně poloviční rychlost vln podélných. [28]

## 4.6 Akustické metody

Princip metody je sledování jevu, který vzniká v materiálu v důsledku nevratných změn ve struktuře zkoumaného tělesa a šíří se materiálem v podobě tzv. napět'ových vln. K jejich vybudění se musí dodat tělesu určitá energie (napjatost tělesa). Energie se uvolňuje skokově např. při tvorbě mikrotrhliny. Tyto změny jsou detekovány v podobě akustických vln. Iniciátory akustické emise jsou tedy mikrodefekty, fázové přeměny materiálu, plastická deformace spolu s vznikem skluzových pásů a u kompozitů přetrhávání vyztužujících vláken, odtrhávání od matrice apod. [26].

## 4.7 Porovnání metod

Pro snadnější orientaci při volbě vhodné metody pro řešení specifických problémů zde nyní přehledně uvedeme jejich charakteristické vlastnosti a možnosti. Neexistuje totiž nějaká jediná univerzální metoda, která by byla schopna úspěšně řešit jakýkoliv problém. Žádoucího výsledku dosáhneme většinou kombinací různých prostředků, které máme k dispozici. [19]

Při vzájemném porovnání metod budou sledována následující hlediska [19]:

1. charakter materiálu - krystalická struktura, textura, chemické složení, fáze;
2. druh zbytkového napětí – makroskopické, mikroskopické;
3. gradient zbytkového napětí – s hloubkou pod povrchem nebo po povrchu;
4. geometrie součásti a příslušné vyšetřované oblasti (velikost, hloubka, tvar povrchu);

5. podmínky měření – laboratorní, provozní;
6. charakter metody – destruktivní, polodestruktivní, nedestruktivní;
7. přesnost a reprodukovatelnost metody;

Obecně je možno říci, že mechanické metody (např. odvrtávací metoda, metody odstraňování vrstev materiálu, dělicí metody), charakterizované jistým narušením celistvosti součásti, mohou být použity pro vyšetřování makroskopických zbytkových napětí.

Realizace provozních měření zůstává na rentgenografické, ultrazvukové a magnetické metodě. Tyto metody jsou však velmi citlivé na stav mikrostruktury – na velikost zrna, zpevnění a přítomnost textury. [19]

V tabulce č.2 můžeme se podívat na parametry metod, které byli popsány v předchozích kapitolách:

Metoda	odvrtávací	průhybová	dělicí	rentgenografická	ultrazvuková	magnetická
Základní předpoklad	rovinná homogenní napjatost na povrchu	rovinná homog. Napjatost na hranolu	prostorový stav napjatosti	izotropní homog. materiál, polykrystalický, jemnozrný	izotropní homog. materiál, homog. napjatost	ferromagnetický materiál
Druh analyzované zbytkové napjatosti	I. druhu	I. druhu	I. druhu	I. a II. nebo III. druhu	I.+II.+III.druhu	I.+II.+III.druhu
Měřený parametr	povrchové přetvoření nebo deformace	přetvoření nebo průhyb	povrchové přetvoření nebo deformace	změna meziatomových vzdáleností polykryst. mater.	změna rychlosti ultrazvukových vln	amplituda Barkhausenova šumu nebo magnetická permeabilita
Minimální velikost vyšetřované oblasti	0,5 mm <sup>2</sup>	1000 mm <sup>2</sup> při měření průhybu, 100mm <sup>2</sup> při užití odporových tenz.	100 mm <sup>2</sup>	0,5 mm <sup>2</sup>	0,1 mm <sup>2</sup> při velmi vysokých frekv., 30 mm <sup>2</sup> obvykle	0,1mm <sup>2</sup> (Barkhaus. šum), 100 mm <sup>2</sup> (magnet. permeabilita)
Minimální analyzovaná hloubka	20 μm	20 μm	1 – 2 mm	několik μm – několik desítek μm	15 – 300 μm	100 μm
Obvyklá nejistota měření [MPa]	± 20	± 30	± 10	± 20	± (10 – 20)	± (10 – 20)
Možná hloubka vyšetřování	(0,02 – 15) mm	(0,1 – 3) mm	libovolné hloubky nad 1 mm	(1 – 50) μm pro nedestrukt. měření, (2 – 50) mm pro destrukt. Měření	(0,015 – 3) mm pro povrchové vlny	(0,1 – 1) mm
Problémy s hrubozrností a texturou	ne	ne	ne	ano	ano	ano

Tabulka č.2 Parametry metod zjišťování zbytkových napětí[19]

## Závěr

Tato práce je zaměřena na rozbor a zhodnocení metod pro měření zbytkových napětí po obrábění. V práci jsem popsal základní pojmy obrábění a integrity povrchu. Dále jsem teoreticky popsal jednotlivé druhy zbytkového napětí, příklady měřených průběhů zbytkových napětí a kompletně jsem rozebral metody jejich měření.

Zbytkové napětí vyžadují větší pozornost. Jejich zjišťování je těžké a odstranění není levnou záležitostí. Existují spolehlivé metody pro zjišťování zbytkových napětí namáhaných materiálů. Zbytkové napětí, které jsou obsaženy v součástce ve větší míře, jsou škodlivé.

Do popředí se nejvíce dostávají metody nedestruktivního charakteru jako např. rentgenová, ultrazvuková, magnetická. Tyto metody jsou citlivé na velikost zrna, zpevnění a přítomnost textury. Magnetická a ultrazvuková metoda vyžaduje kalibrování před měřením, ale i přesto se jejich vhodnost pohybuje na úrovni porovnávání měření.

Dalšími významnými metodami jsou destruktivní a polodestruktivní metody, jako např. odvrtávací metoda, dělicí metoda a metoda odstraňování vrstvy materiálu. Tyto metody porušují povrch součásti a její celistvost. Odvrtávací metoda umožňuje určovat rozložené zbytkové napětí na celou tloušťku součásti. Tloušťka se pohybuje 0,1 až 30 mm. Metodou odstraňování vrstvy materiálu lze vyhodnotit stav prostorové zbytkové napjatosti. Odstraňováním materiálu se z povrchu materiálu odebírá vrstva 0,01 mm. Už tato hloubka může způsobit vysoký spád napětí. Tyto metody nemají problém s texturou a hrubozrností materiálu, jak je to bývá u metod nedestruktivního charakteru.

V praxi se dostávají do popředí nedestruktivní metody před destruktivními, které nepoškozují součást. Velký význam při zjišťování zbytkových napětí je mít pohled na celé pole součásti. Ať už destruktivní nebo nedestruktivní metody procházejí neustálým vývojem a zdokonalováním.

## Seznam obrázků

Obr.1 Ukázka základních pojmů .....	10
Obr.2 Postup vytváření obrobeného povrchu .....	13
Obr.3 Vztahy mezi napětím, teplotou a mikrostrukturou .....	14
Obr.4 Silová rovnováha v libovolném uezu materiálem .....	15
Obr.5 Znázornění zbytkových napětí .....	16
Obr.6 Zbytková napětí mechanicky zatížené vrstvy.....	17
Obr.7 Superfinišování ložiskové oceli.....	18
Obr.8 Sousedně frézovaný povrch titanové slitiny.....	18
Obr.9 Zbytková napětí mechanicky a tepelně zatížené vrstvy.....	19
Obr.10 Přejít zbytkových napětí .....	20
Obr.11 Stav napjatosti v povrchové vrstvě kroužků valivých ložisek .....	21
Obr.12 Průběh zbytkových napětí v povrchové vrstvě lopatky turbokompresoru .....	21
Obr.13 (vlevo) radiální a tangenciální deformace, (vpravo) schéma odporové tenzometrické růžice .....	24
Obr.14 Schéma zařízení pro měření zbytkových napětí .....	27
Obr.15 Metoda sloupku .....	28
Obr.16 Odvození Braggova vztahu .....	30
Obr.17 Deformace vzdáleností mřížkových rovin (hkl) a změny úhlové polohy interferenčního maxima .....	31
Obr.18 Systém souřadnic spojených se vzorkem V .....	31
Obr.19 Měřicí zařízení Stresscan 500C .....	34

## Seznam tabulek

Tabulka č.1 Metody zjišťování zbytkových napětí .....	22
Tabulka č.2 Parametry metod zjišťování zbytkových napětí .....	37

## Seznam použité literatury

- [1] KOCMAN, Karel. *Speciální technologie: obrábění*. 3. přeprac. v dopl. vyd., V Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN isbn80-214-2562-8.
- [2] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [3] BÁTORA, Bohumil. *Obrobené povrchy: technologická dedičnost, funkčnost*. Trenčín: Trenčianska univerzita, 2000. ISBN isbn80-88914-19-1.
- [4] MADL, J., RAZEK, V., KOUTNY, V., KAFKA, J. Surface Integrity in Notches Machining. *Manufacturing Technology*, 2013, Vol. 14, No. 1, pp.17-23. ISSN 1213-2489. Czech Republic.
- [5] BUMBÁLEK, Leoš, Bohumil BUMBÁLEK, Pavel MAZAL a Petr LIŠKUTÍN. *Vlastnosti povrchové vrstvy a jejich vliv na únavu: závěrečná zpráva o řešení grantového úkolu GAČR 101/02/0802*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN isbn80-7204-373-0.
- [6] Novák, M., Holešovský, F. *Studium integrity broušeného povrchu*. Prešov, Slovenská Republika : 9. Mezinárodní vědecká konference, Nové smery vo výrobných technológiách, 2008. ISBN 978-80-553-0044-3.
- [7] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 1989.
- [8] TOTTEN, George E., Maurice A. H. HOWES a Tatsuo INOUE. Handbook of residual stress and deformation of steel [online]. Materials Park, OH: ASM International, c2002 [cit. 2018- 02- 24]. ISBN 978-1-62198-372-9.
- [9] HOSFORD, William F. *Mechanical behavior of materials*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2010. ISBN isbn978-0-521-19569-0.
- [10] STEINZIG, M. a E. PONSLET. *Residual stress measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry: Part I. Experimental Techniques* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2003, 27(3), 43-46 [cit. 2018-02-26]. DOI: 10.1111/j.1747-1567.2003.tb00114.x. ISSN 0732-8818. Dostupné z: Wiley Online Library
- [11] HOLEŠOVSKÝ, F. *Zbytková napětí broušených povrchů*. Technologické inženýrstvo, 2004. ISSN 1336-5967.
- [12] MÁDL, Jan. *Experimentální metody v teorii obrábění*. Čtvrté přepracované. Ediční středisko ČVUT, Praha I, Husova 5: 350, 1988.
- [13] SMALLMAN, Raymond Edward. *Moderní nauka o kovech: určeno [též] pro stud. z oboru nauky o kovech*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964. Teoretická knižnice inženýra.
- [14] KRAUS, Ivo a Nikolaj GANEV. *Technické aplikace difrakční analýzy*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03099-7.
- [15] KOLAŘÍK, K. *Difrakční studium fyzikálních technologií obrábění ocelí* [Disertační práce]. Praha: ČVUT Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, 2010.



- [16] VASILKO, Karol a Jan MÁDL. *Teorie obrábění*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2012. ISBN isbn978-80-7414-460-8.
- [17] SCHAJER, G. S. Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Metod. Part I. Stress Calculation Procedures. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1988.
- [18] DOUBRAVA, K. Excentricita otvoru a její zohlednění při vyšetřování zbytkových napětí pomocí odvrťovací metody. [Disertační práce]. Praha: ČVUT Fakulta Strojní, 2006.
- [19] Klement, J.; Plánička, F.; Vlk, M. Modelová podobnost, elektrická odporová tenzometrie, experimentální určování zbytkových napětí, vyhodnocení experimentálně získaných dat. Plzeň: Západočeská Univerzita v Plzni, 2004.
- [20] KEIL, S.: Experimental Determination of Residual Stresses With the Ring-Core Method and an On-line Measuring System, *Experimental Techniques*, 1992
- [21] NECKÁŘ, Ferdinand, KVASNIČKA, Ivo. *Vybrané statě z úběru materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1991.
- [22] Lu, J. (ed.). *Handbook of Measurement of Residual Stresses*. Lilburn: The Fairmont Press, 1996. 238. ISBN: 0-132-55738-X.
- [23] *Rentgenová difrakce* [online]. 2014 [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: <http://v-kosmose.com/fizika/rentgenovskie-spektryi-proishozhdenie-difraktsiya-kristallami-i-znachenie/>
- [24] OCHODEK, V. Residual stress evaluation in spirally welded pipes for gas pipeline. In. 6th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, ICBM 6, 9-10 July 2007, Valenciennes, University of Valenciennes, France, ISBN 951-98400-7-9
- [25] Withers, P.J., Bhadeshia, H.K.; Residual Stress Part 1 – Measurement techniques. *Materials Science and Technology*, 2001, vol.17, no 4, 355-365. ISSN 0267-0836.
- [26] KRÍŽ, A.: Integrita povrchu v oblasti tepelného zpracování, Hofmeister s.r.o. cit. [2018-12-14]. Dostupné z: [http://opi.zcu.cz/download/Integrita\\_prednaskaTZ.pdf](http://opi.zcu.cz/download/Integrita_prednaskaTZ.pdf)
- [27] TREBUŇA, František a František ŠIMČÁK. *Kvantifikácia zvyškových napätí tenzometrickými metodami*. V Košiciach: Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2005. ISBN isbn80-8073-227-2.
- [28] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN isbn80-7204-283-1.