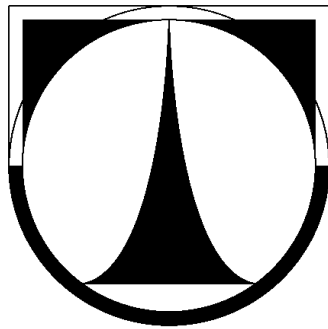


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže



DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Totka BAKALOVA

LIBEREC 2010

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

zaměření
Obrábění a montáž

VLIV MATERIÁLOVÝCH A TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ OBRÁBĚNÍ NA NAPĚTÍ V POVRCHOVÉ VRSTVĚ A VLASTNOSTI DYNAMICKY NAMÁHANÝCH STROJNÍCH SOUČÁSTÍ

IMPACT OF MATERIAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF MACHING ON THE STATE OF STRESS IN SURFACE LAYERS AND PROPERTIES OF MACHINE PARTS UNDER DYNAMIC LOAD

Ing. Totka BAKALOVA

Školitel: Doc. Ing. Jan Jersák, CSc.

Konzultant: Prof. Ing. Nikolaj GANEV, CSc.

Vedoucí katedry: Doc. Ing. Jan Jersák, CSc.

Rozsah práce

Počet stran: 120

Počet obrázků: 83

Počet tabulek: 43

ANOTACE

Disertační práce se zabývá analýzou nově vzniklých povrchů ocelových materiálů po obrábění z hlediska integrity povrchu. Analýza spočívá zejména v posouzení vlivu technologických a materiálových parametrů obrábění na výsledný stav povrchové zbytkové napjatosti a hloubkového průběhu zbytkových napětí. Vzhledem k existujícímu množství metod určujících zbytkové napětí, je také provedeno srovnání a diskuse výsledků, které tyto metody poskytují. Obrobené povrchy s již experimentálně zjištěným stavem zbytkové napjatosti byly následně podrobeny zkoumání svých užitečných vlastností posuzovaných z hlediska tribologie.

Těžiště této disertační práce spočívá v experimentální tenzometrické analýze nově vzniklých funkčních povrchů laboratorních vzorků i speciálně připravených segmentů reálných strojních komponent. Výsledky těchto analýz jsou diskutovány z hlediska technologického i metodického v závislosti na proměnných parametrech opracování.

Klíčová slova: zbytková napětí, parametry obrábění, integrita povrchu, tribologie

SUMMARY

The PhD thesis deals with analysis of newly created surfaces of steel materials after machining from the perspective of the surface integrity. The analysis consists particularly in the assessment of machining technological and material parameters on the resulting state of residual stress and its depth distributions. In respect to the variety of tensometric methods, the comparison and discussion also includes results delivered by the most commonly used ones. The machined surfaces with experimentally established state of residual stress were subsequently subjected to investigation of their functional properties from the tribological point of view.

The main part of this PhD thesis rests in experimental tensometric analysis performed on both laboratory specimens and parts of specially manufactured segments from real machining components. The results and conclusions offered by such analyses are discussed from technological and methodical standpoint in connection with the variable machining parameters.

Keywords: residual stress, machining parameters, surface integrity, tribology

Poděkování

Tato práce by nevznikla bez velké podpory mého konzultanta prof. Ing. Nikolaje Ganeva, CSc. a týmu jeho spolupracovníků Ing. Kamila Kolaříka a Ing. Zdenka Paly. Nemenší dík náleží mému školiteli doc. Ing. Janu Jersákovi, CSc., který mi byl nápomocen cennými radami.

Všem jmenovaným patří můj velký dík!

S poděkováním Totka Bakalova

Význam použitých zkratk a symbolů:

AE	–	akustické emise
A, B, C	–	konstanty úměrnosti
A_{mech}	–	skutečná kontaktní plocha pevného spojení
CBN	–	kubický nitrid boru
D	–	vzdálenost filmu od povrchu vzorku
E	–	modul pružnosti
F_t	–	třecí síla působící proti směru pohybu
F_p	–	přítlačná síla působící kolmo k směru pohybu (zatěžovací síla)
I_o	–	intenzita dopadajícího svazku rentgenového záření
I	–	intenzita difraktovaného svazku rentgenového záření
MQL	–	<i>minimum quantity lubrication</i> – olejová mlha
$N_{\psi 1}, N_{\psi 2}$	–	normály k systému $\{hkl\}$ mřížkových rovin vhodně orientovaných krystalků
N	–	normála k povrchu vzorku
R_1, R_2	–	body interferenčního kužele studované látky v azimutální rovině σ_φ
Rm	–	mez pevnosti
$Rp_{0.2}$	–	smluvní mez kluzu
Ra	–	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
SK	–	slinutý karbid
TEM	–	transmisní elektronový mikroskop
UZ	–	ultrazvuk
VBD	–	vyměnitelný břitový destičky
W	–	šířka difrakční linie $\{211\}$ $\alpha\text{-Fe}$
Θ	–	teplota
θ	–	Braggův úhel reflexe na systému $\{hkl\}$ – úhel vyjadřující směr pohybu
θ_0	–	hodnota θ odpovídající nenapjatému krystalu
a_p	–	hloubka záběru
b	–	šířka vetknutého nosníku
d	–	mezirovinná vzdálenost (vzdálenost sousedních rovin typu $\{hkl\}$)
d_0	–	hodnota d odpovídající nenapjatému krystalu
f_z	–	posuv na zub

g_L	–	gradient napětí v podélném (L) směru na površích analyzovaných vzorků
g_T	–	gradient napětí v příčném (T) směru na površích analyzovaných vzorků
h, k, l	–	skupina Millerových indexů příslušejících mezirovinné vzdálenosti d
k	–	koeficient tepelné vodivosti
l	–	délka průhybu vetknutého nosníku
p	–	tlak způsobující plastickou deformaci
n	–	otáčky
r_n	–	poloměr zaoblení ostří
r_0	–	poloměr průchozího otvoru
$1/2s_2^{hkl}, s_1^{hkl}$	–	rentgenografické elastické konstanty pro reflektující systém rovin (hkl)
v_f	–	posuvová rychlost
v_c	–	řezná rychlost.
z	–	počet zubů
ε	–	mřížková deformace
ε_{micro}	–	mikrodeformace
$\varepsilon_{\varphi, \psi}$	–	mřížková deformace v libovolném směru φ, ψ
ε_ρ	–	radiální deformace
ε_n	–	tangenciální deformace
λ	–	vlnová délka použitého rtg záření $K\alpha$
μ	–	koeficient tření
ν	–	Poissonova číslo
σ_I	–	zbytková napětí I. druhu (<i>makroskopická</i>)
σ_{II}	–	zbytková napětí II. druhu (<i>mikroskopická</i>)
σ_{III}	–	zbytková napětí III. druhu (<i>submikroskopická</i>)
σ_{ij}	–	složky tenzoru napětí působícího na objemový element vzorku, který splňuje podmínky lineární teorie elasticity
τ_s	–	pevnost materiálu ve smyku
φ	–	úhel charakterizující směr napětí σ_φ
ψ	–	úhel mezi normálou k povrchu a směrem deformace $\varepsilon_{\varphi, \psi}$
Δz	–	odebrána vrstva z vetknutého nosníku
Δ^{hkl}	–	nespojivosti průběhu difrakční linie na obou stranách snímku (excentricitě)

OBSAH

1.	ÚVOD.....	9
2.	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	10
3.	POJEM INTEGRITY POVRCHU	11
3.1	Vliv technologických procesů na integritu povrchu.....	12
3.2	Mikrogeometrie povrchu po obrábění	13
3.2.1	Vliv mikrogeometrie povrchu na funkční vlastnosti strojních součástí	14
3.3	Nedestruktivní povrchové zkoušky materiálů (vady v povrchu).....	15
3.4	Změny mechanických charakteristik po obrábění	16
3.4.1	Hodnocení mechanických charakteristik [11]	17
3.5	Strukturní změny v povrchové vrstvě.....	17
3.5.1	Hodnocení struktury povrchových vrstev	18
3.6	Charakter, velikost a hloubkový profil zbytkových napětí.....	19
3.6.1	Klasifikace napětí v kovových a polykrystalických materiálech	19
3.6.2	Mechanismy vzniku napětí ve strojírenské praxi	20
4.	VLIV VÝROBNÍ TECHNOLOGIE NA STAV POVRCHOVÉ VRSTVY	22
4.1	Technologické příčiny vzniku zbytkových napětí.....	22
4.2	Význam zbytkových napětí v povrchových vrstvách.....	24
4.3	Vliv řezných podmínek při obrábění oceli na zbytkové napětí	25
4.4	Vliv vlastností obráběného materiálu	26
5.	METODY MĚŘENÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ.....	27
5.1	Metody mechanické.....	27
5.2	Metody optické a mechanicko – optické	28
5.3	Ostatní metody.....	29
5.4	Teoretické základy použitých experimentálních metod	31
5.4.1	Rentgenová difrakční tenzometrie.....	31
5.4.2	Odvrtávací metoda.....	35
5.4.3	Metoda postupného elektrolytického rozpouštění.....	38
6.	UŽITNÉ VLASTNOSTI A TRIBOLOGICKÉ CHOVÁNÍ DYNAMICKY	40
	NAMÁHANÝCH STROJNÍCH SOUČÁSTÍ.....	40
6.1	Tribologie	40
6.1.1	Mechanismus tření.....	40
6.1.2	Opotřebenění	44
7.	PROVEDENÉ EXPERIMENTY	46
7.1	Rentgenografická tenzometrická analýza povrchu a porovnání experimentálních metod studia gradientů zbytkových napětí při diagnostice tvarových vodících lišt.....	46
7.1.1	Zkoumané vzorky a použitá technologie.....	46
7.1.2	Použité analytické metody	47
7.1.3	Metodika měření rozložení zbytkových napětí na obrobených plochách za užití rentgenografické tenzometrické metody jedné expozice.....	48
7.1.4	Výsledky experimentálního výzkumu studia homogenity povrchu	49
7.1.5	Diskuse výsledků experimentálního výzkumu studia homogenity povrchu	52
7.1.6	Metodika měření hloubkové distribuce zbytkových napětí.....	53
7.1.7	Výsledky experimentálního výzkumu gradientů zbytkových napětí	54
7.1.8	Diskuse výsledků experimentálního výzkumu gradientů zbytkových napětí	62
7.2	Výzkum vlivu rozdílných řezných prostředí na distribuci zbytkových napětí v povrchových vrstvách při obrábění oceli po frézování	63
7.2.1	Zkoumané vzorky a použitá technologie.....	63
7.2.2	Použitá analytická metoda	65

7.2.3 Metodika měření hloubkové distribuce zbytkových napětí za užití rentgenografické tenzometrické metody jedné expozice.....	65
7.2.4 Výsledky experimentálního výzkumu	66
7.2.5 Diskuse experimentálního výzkumu	71
7.3 Výzkum vlivu konstrukčního uspořádání nástroje, strategie obrábění a pracovních podmínek při frézování tvarových ploch z oceli	73
7.3.1 Zkoumané vzorky a použitá technologie.....	73
7.3.2 Použitá analytická metoda.....	75
7.3.3 Metodika měření rozložení zbytkových napětí na obrobených plochách za užití rentgenografické tenzometrické metody jedné expozice.....	75
7.3.4 Výsledky experimentálního výzkumu	76
7.3.5 Diskuse výsledků experimentálního výzkumu	83
7.4 Vliv parametrů integrity povrchu na životnost dynamicky a kontaktně namáhaných strojních součástí	89
7.4.1 Zkoumané vzorky a použitá technologie.....	89
7.4.2 Použité analytické metody.....	93
7.4.3 Metodika měření zbytkových napětí na obrobeném povrchu	96
7.4.4 Výsledky měření zbytkových napětí na obrobeném povrchu	97
7.4.5 Souhrn výsledků zbytkových napětí.....	104
7.4.6 Diskuse výsledků rentgenografické tenzometrické analýzy.....	105
7.4.7 Drsnost povrchu, mikrotvrdost a tribologie vybraného souboru vzorků.....	105
8. ZÁVĚRY	111
8.1 Nové poznatky a přínosy pro teorii a praxi	114
8.2 Doporučení směrů dalšího výzkumu studované problematiky.....	115
9. POUŽITÁ LITERATURA	117

1. ÚVOD

Výrobní postupy při moderní výrobě složitých tvarových ploch jako jsou dutiny forem, zápustek, otvory střížných a tvářecích nástrojů a tvarové plochy vedení obráběcích strojů, apod. vyžadují optimalizaci při výběru z možných progresivních způsobů opracování. Třískové obrábění realizované na speciálních obráběcích centrech umožňuje na základě geometrie CAD modelů ekonomicky frézovat přímo do kalených materiálů. Podstatnou úlohu přitom přebírají drahé a výrobně složité rezné nástroje. Dnes je ekonomicky zvládnutelné obrábění vysokopevnostních (kalených) materiálů v rozsahu tvrdostí 48 – 54 (61) HRC při mezi pevnosti obvykle pod 2 000 MPa. Často uváděným přínosem je kvalita obrobeného povrchu a příznivý stav podpovrchové vrstvy. V řadě případů tak lze ušetřit následné dokončovací operace. Zlepšením podpovrchových vrstev je obvykle myšleno příznivé ovlivnění charakteru zbytkových napětí v obrobeném povrchu, přičemž obvykle výrobci informace o hodnotách či gradientech těchto napětí přesněji nespecifikují.

I když jsou dnes třískové metody tvorby konečného povrchu značně rozšířené, nejsou dosud obecně prozkoumány závislosti mezi podmínkami obrábění a finálními užitnými vlastnostmi strojních součástí za provozních podmínek.

Znalost charakteru a stavu povrchových vrstev a pochopení změn, které v nich nastávají při změnách technologických parametrů, jsou tedy nezbytným předpokladem jejich využívání v průmyslové výrobě. Z hlediska průmyslové praxe a povrchového inženýrství (*surface engineering*) jde vždy o stanovení komplexu charakteristik povrchových vrstev, což se v literatuře označuje jako **integrita povrchu** (*surface integrity*).

Z obsáhlých komplexů charakteristik se obvykle při optimalizaci výběru metody tvorby konečného povrchu přihlíží k:

- mechanismu vzniku nového povrchu a jeho vlivu na mikrogeometrii (plastická deformace a teplotní pole),
- vlivu pracovních podmínek (řezná rychlost, posuvová rychlost, hloubka záběru) na mikrogeometrii a vlastnosti povrchové vrstvy,
- vlivu obráběného materiálu na proces vzniku nového povrchu a jeho mikrogeometrii,
- strukturním změnám v povrchové vrstvě jako důsledku plastické deformace či teploty,
- velikosti a charakteru zbytkových napětí v povrchové vrstvě a tím i charakteru a rozsahu případných vad (mikrotrhlin),
- vlivu mikrogeometrie a charakteru povrchu na další funkční vlastnosti povrchu jako je odolnost proti opotřebení, třecí vlastnosti, odolnost proti korozi apod.

V těchto souvislostech vystupuje do popředí významný faktor, určující provozní spolehlivost a životnost takto vytvořených povrchů, kterým jsou zbytková napětí. Analýza těchto napětí má při diagnostice užitných vlastností finálního výrobku stále rostoucí význam a jednoznačně doplňuje klasické metody výzkumu materiálových charakteristik jako jsou pevnost, houževnatost, otěruvzdornost, apod. Pro analýzu stavu napjatosti existuje dnes velký počet experimentálních postupů založených na využití zákonitostí mezi napětím a určitou charakteristikou (fyzikální veličinou) zkoumaného objektu. Vždy se tedy jedná nepřímá měření, která nestanovují přímo napětí, ale veličiny napětím ovlivnitelné. Z hlediska průmyslové praxe a to zejména ve vztahu k různým technologickým postupům výroby je významným kritériem jejich aplikovatelnosti kritérium zásahu do celistvosti studovaného povrchu.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cíle řešení disertační práce byly upřesňovány během doktorského studia, a to na základě poznatků získávaných průběžně při spolupráci s jinými výzkumnými pracovišti a průmyslovými podniky.

Cíle práce zahrnují:

- Získání souboru experimentálních údajů o rozložení zbytkových napětí v povrchových vrstvách mechanicky obroběných strojních součástí.
- Analýzu vlivu materiálových a technologických parametrů na výsledné pole zbytkových napětí a posouzení míry významnosti zjištěných veličin na některé užité vlastnosti strojních součástí souvisejících např. s jejich únavovým chováním a povrchovým opotřebením.
- Řešení konkrétních problémů průmyslové praxe.
- Posouzení vhodnosti a vypovídací schopnosti různých experimentálních technik analýzy napěťových stavů vzniklých v nově vytvořeném funkčním povrchu strojních komponent.
- Výzkum užitečných vlastností z tribologického hlediska u nově vzniklého funkčního povrchu vybraných vzorků.

3. POJEM INTEGRITY POVRCHU

S růstem nároků na konstrukci, tvarovou složitost, ale také zejména se snižováním hmotnosti strojních součástí a se zdokonalováním měřicích přístrojů i metod měření, začala být otázka integrity povrchu velice aktuální. Výsledky teoretického výzkumu v oblasti pružnosti a pevnosti materiálů, dále množství praktických experimentů a v neposlední řadě i zkušenosti s konkrétními součástmi strojních zařízení ukázaly, že povrchová vrstva má často rozhodující vliv na jejich životnost a spolehlivost [1–7]. S růstem intenzity pracovního režimu dochází ke zvyšování řezných rychlostí pracovních nástrojů, což často vede k vnášení větších zbytkových napětí do povrchové vrstvy a k většímu tepelnému ovlivnění [8–10]. Důsledkem těchto vlivů je, že strojní součásti mají po obrábění jiné mechanické a fyzikální vlastnosti v jádře a jiné vlastnosti na povrchové ploše a v tenké povrchové vrstvě. Je proto třeba stále více důrazně prosazovat vzájemnou spolupráci konstruktéra s technologem, aby nedocházelo ke zbytečným ztrátám.

Posuzuje-li se účinek technologických procesů na povrchovou vrstvu obrobku při přeměňování jeho tvaru, pak se podle druhu a intenzity aplikované energie mohou projevat různé způsoby jejího ovlivnění.

Soubor parametrů charakterizujících vliv povrchové vrstvy na funkční vlastnosti součásti může být různě široký nejen s ohledem na použité výrobní technologie a na způsob zatěžování součásti v provozu, ale i se zřetelem na technické možnosti a ekonomické aspekty kontroly jakosti.

V poslední době se pro takový soubor vlastností povrchové vrstvy používá termín „*integrita povrchu*“. Lze ho chápat jako soubor všech vlastností a charakteristik povrchu strojní součásti vzniklého výrobním procesem, hodnotící vlastnosti povrchové plochy a povrchové vrstvy ve vztahu k vlastnostem základního materiálu součásti. Pojem integrity povrchu tedy bezprostředně souvisí s kvalitou povrchu.

Tato souvislost mezi funkčními vlastnostmi strojů, jako je odolnost proti opotřebení, odolnost proti korozi, únava materiálu, kontaktní pevnost, magnetické vlastnosti aj. a mezi kvalitou povrchové vrstvy je logická uvážíme-li, že při nejčastějším případě namáhání (v ohybu a krutu) je největší napětí na povrchu, a také při kontaktním namáhání, při tření event. při korozi je povrch a povrchová vrstva nejexponovanějším místem součásti.

Hlubší studium a podrobný rozbor příčin havárií, předčasného opotřebení, neočekávaně nízké životnosti strojních součástí a také rozbor velkého rozptylu těchto hodnot význam vlivu kvality povrchové vrstvy součásti na uvedené užité hodnoty potvrdily [11].

Jako nejvýznamnější a nejčastěji analyzované faktory, které charakterizují integritu povrchu po obrábění se obvykle uvádí:

- mikrogeometrie obrobeného povrchu,
- stupeň a hloubka zpevnění,
- strukturní a fázové změny,
- charakter, velikost a hloubkový profil zbytkových napětí.

Teprve široký soubor experimentálních poznatků o vlivu technologických procesů na integritu povrchu a současně sledování závislosti provozních vlastností součásti na integritě povrchu umožní optimalizovat způsob a podmínky výroby součásti z hlediska požadované spolehlivosti a životnosti.

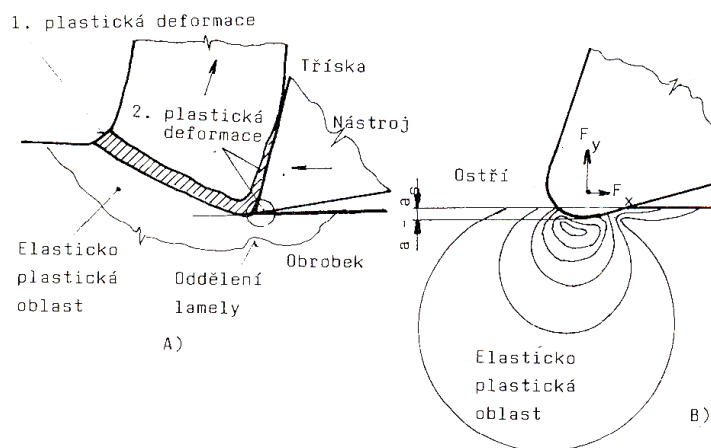
3.1 Vliv technologických procesů na integritu povrchu

Při popisu vytváření nového povrchu třískovým obráběním se často využívá model ortogonálního řezání [12, 13], pomocí kterého lze vhodně modelovat probíhající plastickou deformaci, která je již ze své povahy nehomogenní.

Při řezném procesu dochází v oblasti tvoření třísky k pružným a následně plastickým deformacím v odřezávané vrstvě. Deformační oblast před břitem nástroje nazýváme oblastí primární plastické deformace, deformace v povrchových vrstvách styčné plochy třísky s čelem nástroje označujeme jako oblast sekundární plastické deformace a deformace elementů obráběného materiálu v povrchové vrstvě obrobenej plochy se označuje jako oblast terciální plastické deformace.

Při relativním pohybu nástroje vůči obrobku působí na odebíranou vrstvu materiálu vnější zatížení, které v této vrstvě vyvolává napětí. Podpovrchové vrstvy jsou tedy deformovány dvakrát:

- Při „přechodu“ elasticko-plastickou oblastí primární deformace (obr.3.1–A) jsou namáhány tlakem a
- normální a tangenciální složkou síly od břitu nástroje (obr.3.1–B), jehož ostří má určitý poloměr (v praxi obvykle 5 až 20 μm); břit svojí spodní částí stlačuje nově vznikající povrch a dochází k terciální plastické deformaci.



Obr. 3.1 Primární a sekundární elasticko-plastická oblast vyvolaná mech. řezáním [11]

Intenzitu sekundární deformace v oblasti obrobenej plochy zvyšuje postupné zvětšování tohoto poloměru a opotřebení hřbetu nástroje při exploataci.

Výsledné zpevnění povrchové vrstvy obrobenej plochy ovlivní kromě deformačního účinku sil na hřbetu též tvar a velikost oblasti primární plastické deformace, která za určitých podmínek zasahuje pod plochu řezu. Zpevněná povrchová vrstva má zpravidla vyšší mechanické vlastnosti (větší pevnost a tvrdost) než původní obráběný materiál.

Ještě komplikovanějším způsobem vzniká nový povrch při obrábění nástroji s geometricky nedefinovanými břity, tedy při operacích typu broušení, honování, lapování apod. Nevýhodný mechanismus úběru třísek malých průřezů náhodně rozloženými zrny s nepříznivou geometrií spolu s velkým podílem „hrnutí“ materiálu (zejména od boků zrna) a tření jsou příčinou značné spotřeby specifické energie [11].

Efekt plastické deformace je ještě doprovázen vznikem nehomogenních a v čase proměnných teplotních polí. Vysoké teploty způsobují dilataci materiálu, která může výrazně přispět ke zhoršení kvality a provozních vlastností výsledného povrchu.

Kromě dvou výše uvedených vlivů na integritu výsledného povrchu, přistupuje v některých případech také efekt fázových transformací.

3.2 Mikrogeometrie povrchu po obrábění

Představy o fyzikální podstatě mikrogeometrie povrchu se vyvíjely současně s metodikou jejího měření, která závisela na pokroku v oblasti měřicí techniky a na její dostupnosti.

Vedle subjektivního hodnocení optickým porovnáním posuzovaného povrchu k etalonu (okem, lupou, mikroskopem) patří mezi první experimentální metody studia mikrogeometrie povrchu přesnější metoda dvojitého mikroskopu umožňující tzv. šikmý řez povrchem, neboli tzv. Schmalzova metoda „light slit“ uplatňující se u drsnějších povrchů [14] a využití Linnikova mikro-inferferometru při hodnocení velmi jemných povrchů [15].

Rozhodující přínos pro výzkum i praxi zajistily analyzátory drsnosti povrchu s elektromagnetickými, elektroindukčními nebo piezoelektrickými dotykovými snímači, které se posouvají po hodnoceném povrchu; jejich elektrický signál je dále zpracováván a vyhodnocen mikroprocesorovou technikou s příslušným záznamovým zařízením.

Existují stacionární i přenosné přístroje. Moderní přístroje jsou vybaveny počítačem umožňujícím naprogramování a optimalizaci měřicího procesu, statistiku měření a modelování trojrozměrného obrazu tvořeného těsně vedle sebe položenými profily (tzv. mapování povrchu). Nejnověji se k detekci pohybu snímače využívá laser, který umožňuje hodnotit drsnost i tvarově složitých ploch.

Aktivní část snímače tvoří diamantový hrot s poloměrem špičky $r_e = 3$ až $5 \mu\text{m}$. Porovnávací měření diamantového hrotu a elektronového paprsku s $r_e = 0,05 \mu\text{m}$ (řádovací elektronový mikroskop) na velmi jemně obrobených površích ukazují dosti významné chyby mechanického způsobu hodnocení.

Z tohoto a z jiných důvodů se v posledních letech začaly prosazovat bezdotykové optické metody, pracující na základě vyhodnocení odraženého světla – svazku infračervených paprsků nebo laseru. K výhodám patří i jednodušší způsob mapování a zvláště možnost použití pro adaptivní řízení kvality povrchu na obráběcích strojích.

Ani nejdokonalejší hodnocení geometrických profilů nepodává úplnou informaci o celkové morfologii, zejména o nahodilých vadách, které mohou významně ovlivnit provozní chování součástí či nástrojů. Potřebné doplňující informace lze získat světelnou nebo elektronovou mikroskopií, k lokalizaci vad se používají fotoakustické a akustické mikroskopy. Pro přímé zkoumání nebo mapování povrchu je vhodná řádkovací elektronová mikroskopie využívající k zobrazení odražené a sekundární elektrony.

Potřebu přesněji charakterizovat drsnost povrchu a pokrok dosažený v měřicí technice vzala v úvahu norma ČSN EN ISO 4287 z roku 1998. Jsou zde uvedeny základní pojmy a definice drsnosti povrchu a jsou popsány výškové, podélné a tvarové charakteristiky povrchu.

Ne všechny v této normě uváděné charakteristiky jsou z hlediska vytváření povrchu a jeho funkčních vlastností stejně důležité. Některé z nich nelze ani dílenskými drsnoměry změřit.

V technické praxi se v současné době volí pro předpis drsnosti povrchu jedna nebo více následujících charakteristik:

- *Geometrické parametry* – výstupek profilu, prohlubeň profilu, prvek profilu, hodnota pořadnice $Z(x)$, výška výstupku profilu Z_p , hloubka prohlubně profilu Z_v , výška prvku profilu Z_t , šířka prvku profilu X_s , Materiálová délka profilu $MI(c)$.
- *Výškové parametry* – největší výška výstupku profilu P_p , R_p , W_p , největší hloubka prohlubně profilu P_v , R_v , W_v , největší výška profilu P_z , R_z , W_z , průměrná výška

prvků profilu Pc , Rc , Wc , celková výška profilu Pt , Rt , Wt , průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Pa , Ra , Wa , průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu Pq , Rq , Wq , šikmost posuzovaného profilu (*skewness*) Psk , Rsk , Wsk , špičatost posuzovaného profilu (*kurtosis*) Pku , Rku , Wku .

- *Délkové parametry* – průměrná šířka prvků profilu PSm , RSm , WSm .
- *Tvarové parametry* – průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu Pdq , Rdq , Wdq .
- *Křivky a odpovídající parametry* – materiálový poměr profilu (*nosný podíl*) $Pmr(c)$, $Rmr(c)$, $Wmr(c)$, rozdíl výšky úseku profilu Pdc , Rdc , Wdc , vzájemný materiálový poměr Pmr , Rmr , Wmr , empirické rozdělení výšek profilu.
- *Parametry křivky lineárního poměru materiálu* – hloubka jádra drsnosti Rk , materiálový podíl $Mr1$, Materiálový podíl $Mr2$, redukovaná výška výstupků Rpk , redukovaná hloubka prohlubní Rvk [16].

Tento popis mikrogeometrie povrchu je proti předchozí normě (dříve pouze Ra , Rz , Rm) širší; v praxi však přežívá nesprávný názor, že pro předpis drsnosti povrchu zcela dostačuje charakteristika Ra .

Výsledky současného výzkumu naproti tomu ukazují, že ani toto rozšíření charakteristik drsnosti povrchu nevystihuje plně vliv výrobních metod na vytváření povrchu a také neumožňuje spolehlivou predikci funkčních vlastností povrchu při různém způsobu zatěžování. Proto se v současné době hledá možnost získání úplnější informace o mikrogeometrii povrchu.

Slibné výsledky poskytuje metoda kvantitativního hodnocení mikrogeometrie použitím statické a spektrální analýzy profilu drsnosti povrchu [12]. Je založena na předpokladu, že určitý, konkrétní záznam drsnosti povrchu představuje snímek stochastického, stacionárního procesu, tj., že je modelem náhodného jevu, který je závislý ne počátku měření a k jeho popisu stačí pouze jedno měření realizované dostatečně dlouhou dobu. Ukazuje se, že analýzy těchto statických a spektrálních charakteristik profilu drsnosti povrchu umožňuje vytvoření a rozlišení typologie povrchů, vyrobených různými metodami a podmínkami obrábění. Vyšetřením exploatačních vlastností takto komplexně definovaných povrchů se naskýtá možnost optimalizace výrobních postupů a jejich podmínek z hlediska dosahované drsnosti povrchu [11].

3.2.1 Vliv mikrogeometrie povrchu na funkční vlastnosti strojních součástí

Při provozu strojních částí dochází ke styku jejich povrchů s povrchy jiných tuhých těles nebo k jejich styku s kapalinami či plyny. Vzájemné působení stýkajících se povrchů je ovlivněno mimo jiné jejich mikrogeometrií. Skutečná styková plocha u tuhých těles je jen malou částí tzv. jmenovité plochy, neboť se vzájemně dotýkají jen vrcholy nerovností. Při koncentraci zatížení se nerovnosti nejen pružně, ale i trvale deformují. Při relativním pohybu dochází k plastickému kluzu výstupku nerovností a k jejich odřezávání. Velikost tření a intenzita opotřebení především na počátku přímo závisí na výšce a tvaru nerovností. Přeměnou práce tření a plastických deformací na teplo dochází ke vzniku vysokých okamžitých teplot, což usnadňuje adhezi povrchů. Okysličená povrchová vrstva kovu se odírá, což opět podporuje molekulární spojení kovově čistých povrchů. V době záběhu se tak při lehkém a středním zatížení výška nerovnosti sníží až na čtvrtinu i méně původní hodnoty.

Vliv směru nerovností a stop po obrábění působí na otěr v závislosti na celém komplexu podmínek zatížení, mazání a charakteristik mikrogeometrie. Při malém zatížení a výšce nerovnosti na směru nerovnosti prakticky nezáleží. Při větším zatížení a horší drsnosti povrchu je výhodné, jestliže stopy po obrábění jsou rovnoběžné se směrem pohybu.

3.3 Nedestruktivní povrchové zkoušky materiálů (vady v povrchu)

Podle Neckáře a Kvasničky [11] podporuje nesprávně zvolený druh obráběcí operace, pracovních podmínek, nástroje a stroje výskyt opakujících se nebo nahodilých vad (defektů) na povrchu a v podpovrchových vrstvách. Tyto vady vznikají nejenom při poslední technologické operaci, ale v průběhu celé historie výroby součástí, tzn. od prvovýroby po tepelné zpracování. Pro zajištění požadované kvality povrchu je proto nezbytné zjistit jejich typ (trhliny, póry, inkluze), tvar a velikost, četnost a rozložení, popř. orientaci k hlavnímu namáhání součásti a nepříznivé případy vyloučit.

Praktické zjišťování vad se děje většinou povrchovou nedestruktivní defektoskopií; destruktivní metody – např. metalografické hodnocení řezu povrchem – slouží většinou pro kalibraci.

V posledních letech lze pozorovat pozoruhodný rozvoj moderních i stávajících měřicích metod včetně jejich aplikace na nové materiály a výrobní technologie. Nejčastěji používané nedestruktivní povrchové zkoušky materiálů, polotovarů a součástí jsou [11]:

- *Vizuální* – povrch se kontroluje buď pouhým okem nebo různými optickými nebo optoelektrickými pomůckami. V některých případech lze vady zvýraznit vhodnou povrchovou úpravou, např. oxidací hliníkových slitin.
- *Kapilární* – využijí kapilárních vlastností vhodných kapalin, které penetrují do povrchových nečistot. Existují metody barevné indikace a metody fluorescenční.
- *Práškové* – založené na silovém působení rozptylového magnetického pole (stěny trhliny tvoří magnetický pól) na jemné feromagnetické částice, které se aplikují naprášením nebo ponorem. Těmito metodami lze u magnetických materiálů detekovat povrchové i podpovrchové vady.
- *Magnetoinduktivní a elektroinduktivní* – používají budičů, které rozptylové pole indukují elektrickou cestou. Snímací čidla jsou zpravidla tvořena vhodně uspořádaným vinutím nebo speciální sondou. Metody jsou vhodné pro zjišťování povrchových a podpovrchových vad, zvláště plošného charakteru. Lze je poměrně snadno automatizovat, neboť snímané proudové impulsy lze zpracovat různým způsobem.
- *Ultrazvukové* – využívají povrchově citlivých vln (Rayleighovy a příčné s horizontální polarizací). Pro buzení a detekci akustické energie slouží piezoelektrické nebo magnetostrikční ultrazvukové sondy. Ultrazvuk (*UZ*) podává informace o přítomnosti, poloze, popř. i velikosti defektu a je univerzální z hlediska zkoumaného materiálu, neboť není nutné, aby materiál byl elektricky nebo magneticky vodivý. Rozšiřuje se také využití metody akustické emise (*AE*), kdy se signály *AE* v povrchových vrstvách indukují např. tepelnou energií nebo pulzující povrchovou *UZ* vlnou.

Pro laboratorní hodnocení jakosti povrchových vrstev se v současnosti hojně používají především dva typy mikroskopů – fotoakustický a akustický, zpravidla v řádkovacím provedení.

Fotoakustický mikroskop využívá většinou modulovaný svazek fotonů (laser). Který lokálně ohřívá zkoumaný povrch. Teplem roztažená vrstva generuje zvuk, jehož amplituda je funkcí tepelných a optických vlastností této vrstvy a v ní přítomných defektů. Řádkováním svazku po povrchu vzorku lze vytvořit obraz o stavu povrchových vrstev.

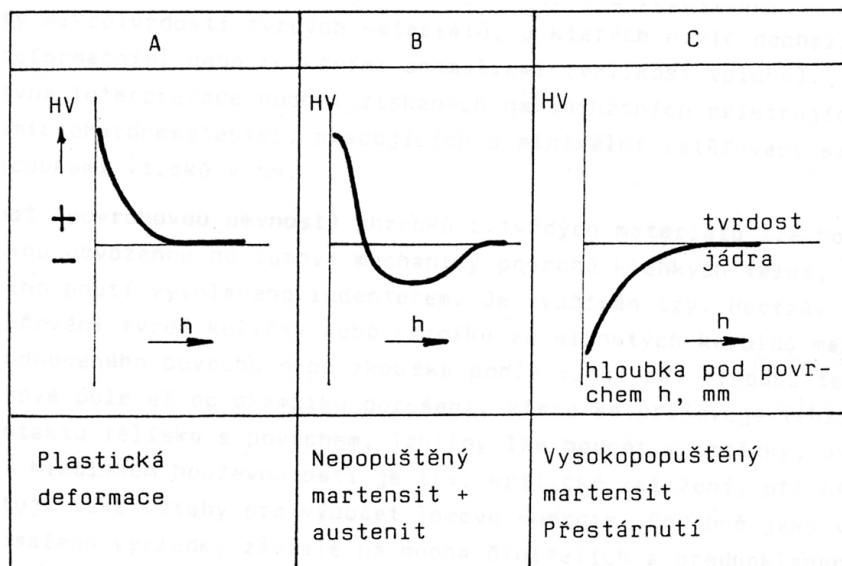
Druhou techniku představuje *akustická mikroskopie* využívající fokusovaný zvukový signál. Stav povrchové vrstvy je vyhodnocován z odlišného útlumu odražených signálů. Řádkováním lze zobrazit vadu, např. vyhřátí povrchu při broušení, a odhadnout hloubku ovlivnění z různého odstínu obrazu. Stranová rozlišovací schopnost je obdobná jako u optické mikroskopie [11].

3.4 Změny mechanických charakteristik po obrábění

Intenzita tepelných, mechanických nebo chemických vlivů doprovázejících obráběcí proces určuje velikost případných změn mechanických vlastností nově vytvořené povrchové vrstvy. Protože se většinou jedná o změny ve velmi tenkých vrstvách, lze je vhodně hodnotit podle průběhu mikrotvrdoti v závislosti na hloubce pod povrchem.

V praxi se vyskytují tři charakteristické průběhy, zachycené na obr.3.2. Jejich existence je podmíněna mimo jiné výchozím materiálem obrobku a jeho původní strukturou povrchových vrstev. Jedná se o zpevnění (A), odpevnění (C) a zpevnění s následným poklesem pod tvrdost jádra (B); případ B je výsledkem tzv. sekundárního zakalení způsobeného např. broušením či laserem.

U měkkých a tvárných kovů dochází vlivem procesu řezání ke zpevnění. Teorie plasticity využívá k popisu zpevnění nejčastěji dvě teorie. U tzv. *izotropního zpevňování* dochází k tomu, že se plocha plasticity izotropně rozpíná v závislosti na parametru zpevnění κ , který řídí změnu meze kluzu v závislosti na deformaci [17]. Na základě energetického přístupu je κ určeno energií plastické deformace a dle přístupu efektivní plastické deformace je κ určeno celkovou efektivní plastickou deformací. V případě *kinematického zpevňování* se plocha plasticity posouvá, nedochází ke změně jejího tvaru či velikosti. Kinematické zpevňování vhodně modeluje tzv. Bauschingerův efekt [18].



Obr. 3.2 Průběhy mikrotvrdoti v ovlivněných povrchových zónách [11]

Zpevnění se projevuje vzrůstem pevnosti a tvrdosti, ale snižuje se tažnost a vrubová houževnatost. Plastická deformace při obrábění může být v závislosti na řezných podmínkách provázena vyššími teplotami. V závislost na délce doby jejich působení mohou v povrchové vrstvě v různých hloubkách nastávat procesy zotavování a odpevňování.

3.4.1 Hodnocení mechanických charakteristik [11]

Existuje řada metod pro měření tvrdosti i mikrotvrdosti, které jsou v některých případech jedinou možností hodnocení mechanických charakteristik vrstev. Měření mikrotvrdosti se provádí Vickersovou nebo Knoopovou metodou. Při Vickersově metodě se jako indentor využívá diamantový jehlan a tvrdost se vyhodnocuje stejně jako při standardní Vickersově metodě měření tvrdosti. Při Knoopově metodě zanechá indentor vtisk s rozdílně dlouhými úhlopříčkami. Běžný rozsah zatížení je 0,1 až 10 N, nejčastěji 0,25 – 0,5 N. Při měření Vickersovou metodou je hloubka vtisku 1/7 délky úhlopříčky vtisku. Vtisky se umísťují do hodnoceného povrchu (nedestruktivní způsob) nebo častěji do jeho kolmého či šikmého řezu a hodnotí se mikroskopicky.

Nedestruktivní způsob využívá pro stanovení změny tvrdosti vhodnou kombinaci zatížení, např. v rozsahu 0,1 až 10 N (různě zatížený hrot proniká do odlišné hloubky). Takové měření dovoluje i hrubý odhad tloušťky ovlivněné vrstvy. Hodnocení průběhu mikrotvrdosti na řezu je přesnější a na moderních tvrdoměrech využívajících pro hodnocení velikosti vpichů a jejich zpracování personální počítač, i dostatečně rychlé.

Přes jednoduchý princip měření je tvrdost komplexní a komplikovanou materiálovou charakteristikou. Během zatěžování, výdrže a odlehčování vnikajícího tělíska probíhá obvykle několik pochodů: elastická a plastická deformace, vznik nového povrchu popř. křehké porušení. Každá měřicí metoda je definována dohodnutými podmínkami zkoušky a výsledky jsou závislé na souboru rozličných faktorů. Mezi nejdůležitější patří příprava povrchu, geometrie indentoru, charakteristika přístroje a podmínky vytvoření a proměření vtisku. Získaná hodnota tvrdosti (mikrotvrdosti) má tedy charakter konvenční, je obtížně přepočitatelná a je zatížena rozptylem. To platí zejména pro hodnoty mikrotvrdosti tvrdých materiálů, u kterých navíc dochází ke zkreslení výsledků deformačními nebo funkčními anomáliemi (velikost vpichu). Ještě složitější je správná interpretace hodnot získaných na unikátních přístrojích (nanoindentor, ultramicrohardnesstester) pracujících s minimální zatěžovací silou (řádově 0,01 N) a hloubkami vtisků v nanometrech.

Houževnatost (povrchovou pevnost) obrobků z tvrdých materiálů lze hodnotit vtiskovou zkouškou odvozenou od lomové mechaniky povrchů křehkých těles, která je měřítkem vnitřního napětí vyvolaného indentorem. Je využíván tzv. Hertzův test spočívající ve vtlačování tvrdé kuličky nebo razníku ze slinutých karbidů malého průměru (1 mm) do hodnoceného povrchu. Výhodou testů je definované napětíové pole až do okamžiku porušení, které se projevuje trhlinami v okolí pásma kontaktu tělíska s povrchem. Trhliny lze hodnotit opticky, akusticky nebo elektricky. Hlediskem houževnatosti je tzv. kritické zatížení, při němž trhlina vzniká; existují také vztahy pro výpočet lomové energie. Podobně jako v případě tvrdosti jsou dosažené výsledky závislé na mnoha činitelích a předpokladech.

3.5 Strukturní změny v povrchové vrstvě

U většiny způsobů obrábění při obvyklých režimech řezných podmínek se nedosáhne teplot fázových přechodů ani potřebného času na jejich působení, takže ke strukturním změnám v povrchových vrstvách v tomto případě nedojde.

Po soustružení a frézování lze pozorovat na metalografickém výbrusu pouze usměrněnou strukturu povrchové vrstvy (texturu) vyvolanou plastickou deformací v oblasti vzniku třísky. Tato usměrněná struktura se objevuje zejména u feriticko – perlitických ocelí a Al slitin. Teprve při vysokých řezných rychlostech vzniká přerušovaná až souvislá tzv. *bílá vrstva* o tloušťce do 10 μm , o které lze předpokládat, že vznikla „termomechanickým zpracováním“. Přechod na neovlivněnou strukturu je velmi prudký a rozptyl mikrotvrdosti ukazuje na její

nestejnorodost. Tato vrstva vykazuje obvykle velmi vysokou tvrdost [19]. U sorbitických a martensitických ocelí lze pozorovat v této bílé vrstvě i vznik trhlinek.

Naproti tomu teploty vznikající při broušení dosahují nebo převyšují teploty fázových přeměn ocelí. Ohřev je však velmi rychlý, rychlost ohřevu se pohybuje v rozsahu 10^5 až 10^6 °C.s⁻¹, ale krátkodobý (řádově 10^{-1} až 10^{-3} s).

Nejcitlivější na strukturní změny v povrchových vrstvách vzniklé účinkem broušení jsou zušlechťené oceli s martensitickou strukturou, např. nástrojové a ložiskové. Nesprávným broušením lze vyvolat dva základní typy podpovrchových struktur.

U *vysokopopuštěného martensitu* je tloušťka vrstvy a stupeň popuštění (pokles tvrdosti) funkcí velikosti a doby působení stykové teploty broušení, citlivosti ocelí k fázovým změnám struktury a výchozí tvrdosti. Vnější znakem „vyhřátí“ povrchu jsou tzv. opaly – vrstva kysličníků slámově žluté až hnědomodré barvy.

Martensiticko – austenická vrstva vzniká v případě, že styková teplota broušení překročí hodnotu A_{C1} oceli po určitou kritickou dobu. Austenit vzniklý při tomto sekundárním zakalení se nesnadno rozpadá a jeho obsah je až kolem 50 %. Struktura je velmi jemná a na metalografickém výbrusu se leptá bíle. Přiléhající vrstvy obsahují martensit s nižším stupněm tetragonality než obsahuje jádro. Barva opálu je sytě modrá.

U těžkoobrobitelných, žárovevých a žáruvzdorných slitin, u materiálů odolných vůči korozi, u titanových slitin, které se vyznačují špatnou tepelnou vodivostí, je riziko poškození povrchové vrstvy teplem řezání větší. U titanových slitin se např. nevhodným režimem obrábění může měnit poměr mezi strukturními složkami fáze α a β s následným dopadem na funkční vlastnosti povrchu součásti [11].

3.5.1 Hodnocení struktury povrchových vrstev

Volba vhodné metodiky hodnocení struktury povrchových vrstev je závislá na požadované informaci, velikosti zkoumaného objemu nebo povrchu látky a rozlišovací schopnosti užitého přístroje. Zobrazení vzhledu struktury lze sledovat přímo na objektu nebo na povrchu vhodně situovaného rovinného řezu a také na lomové ploše. Popis způsobů hodnocení struktury uvedený v následujících odstavcích není vyčerpávající, ale seznamuje s hlavními metodami. Tyto metody lze aplikovat také pro stanovení nebo odhad tloušťky ovlivnění, jejich použití je však ovlivněno tím, že jsou až na výjimky destruktivní.

Mikroskopické zkoumání povrchového projevu struktury slouží pro přímé sledování mikrostruktury dostatečně tlustých útvarů, např. pro analyzování zpevněných vrstev se využívá klasická optická mikroskopie. Její rozlišovací schopnost a maximální zvětšení (1500x) jsou omezeny vlnovou délkou. Spolehlivost výsledků získávaných většinou na kolmých nebo šikmých řezech povrchem vyžaduje výběr vzorků bez vnesených ovlivnění během přípravy vzorku pro metalografický rozbor. Vyžaduje se dokonalá rovnost; zaoblení vnějšího rozhraní při přípravě výbrusu lze vyloučit různými způsoby, např. elektrolytickým leštěním.

Podrobnější informace při mnohem větší rozlišovací schopnosti poskytuje elektronová mikroskopie, umožňující až několika tisícinásobné zvětšení. Vývojově starší a experimentálně náročnější je pozorování otisku povrchu na propařovacím (tranzitním) mikroskopu. Otisky neboli repliky, často zde využívané, mohou být jednostupňové (přímé, někdy extrakční) nebo dvoustupňové, pro zvýšení kontrastu též stínované. Typická metoda pro přímé pozorování morfologie struktury je řádkovací elektronová mikroskopie.

Prozařovací objemová elektronová mikroskopie

Prozařovací elektronové mikroskopy (*TEM*) mají při přímém zobrazení vynikající stranové rozlišení a dávají široké spektrum informací o krystalové struktuře. *TEM* (transmisní

elektronový mikroskop) je schopen identifikovat velikost a morfologii částic, hustotu a typ defektů, pórovitost, přítomnost metastabilních fází, segregaci apod. K pozorování se připravují řezy rovnoběžné s povrchem nebo kolmé k němu, které umožňují získat hloubkovou informaci ve světlém nebo tmavém poli. Používají se fólie samonosné nebo na vhodné transparentní podložce.

Rentgenová a elektronová difrakce

Pro strukturní analýzu povrchových vrstev je nejrozšířenější metodou rentgenová difrakce. Mezi její přednosti patří zejména propracovanost, nedestruktivnost a bohatost získávaných informací. Kromě parametrů základní buňky lze strukturní analýzu využít k určování kvalitativního a kvantitativního fázového složení, velikosti zrn, hustoty dislokací, měření textury, zbytkových napětí a celé škály dalších veličin.

3.6 Charakter, velikost a hloubkový profil zbytkových napětí

Působením vnějších sil či momentů na soustavu vznikají napětí, která se někdy označují jako napětí vložena. Naproti tomu vnitřní napětí jsou v systému přítomná, aniž by působilo vnější zatížení. Vnitřní silové účinky (síly, momenty), od nichž vzniká vnitřní napětí, jsou v uzavřené soustavě v rovnováze a mimo ni se neprojevují. Pokud však dojde k porušení celistvosti soustavy, vnitřní napětí se uvolní a způsobí deformaci soustavy.

3.6.1 Klasifikace napětí v kovových a polykrystalických materiálech

Podle doby trvání lze rozlišovat vnitřní napětí:

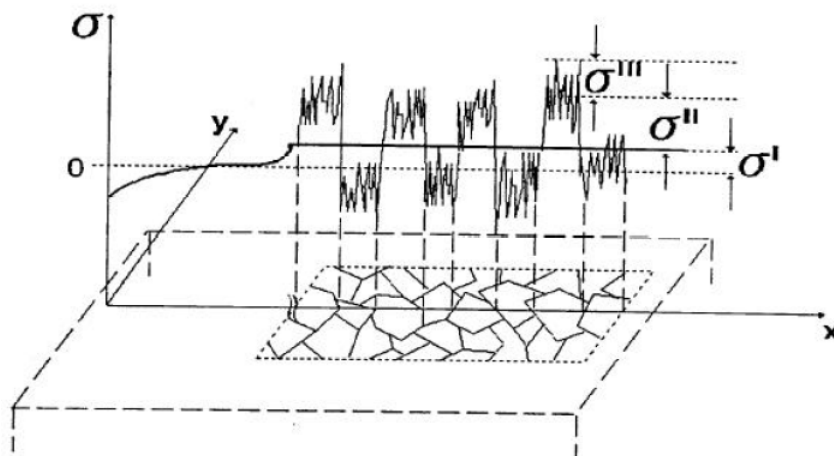
- *vložená* – zanikají po odstranění příčin, které je vyvolaly. Podmínkou je nepřekročení meze kluzu. Jako příklad těchto napětí lze uvést napětí vzniklá nerovnoměrným zahřátým součástí nebo napětí vznikající při upnutí součástí,
- *zbytková* – zůstávají i po odstranění příčin, které je vyvolaly.

Rozdělení zbytkových napětí do kategorií se řídí několika kritérii. Nejčastější dělení je podle velikosti objemu, v kterém dosahují rovnováhy [20] viz obr. 3.3, na:

- *zbytková napětí I. druhu (makroskopická)* – jsou přibližně homogenní ve velkých oblastech, tj. konstantní co do směru a velikosti; v celém objemu objektu dosahují zbytková napětí I. druhu, nazývaná také makroskopická, rovnováhy,
- *zbytková napětí II. druhu (mikroskopická)* – jsou homogenní v objemu několika krystalků. Ve vícefázových soustavách mohou být krystalky různých fází napjaty opačně,
- *zbytková napětí III. druhu (submikroskopická)* – projevují se v rozsahu několika meziatomových vzdáleností a doprovázejí mřížkové poruchy v reálních krystalech.

Zbytková napětí těchto tří druhů se zpravidla vyskytují současně, i když pod pojmem zbytková napětí se v technické praxi rozumí především makroskopická zbytková napětí (napětí I. druhu). Jejich existence se projevuje řadou prakticky významných efektů, nejznámější jsou:

- geometrické důsledky zásahu do napěťové rovnováhy se projeví rozměrovými a tvarovými změnami, které ovlivní využitelnost součásti nebo technologie jejího dalšího zpracování,
- vliv zbytkových napětí na životnost, bezporuchovost a korozní odolnost strojních komponent.



Obr. 3.3 Znáornění zbytkových makroskopických (σ_I), mikroskopických (σ_{II}) a submikroskopických (σ_{III}) napětí [21]

Tlaková zbytková napětí vyvolaná některými způsoby úpravy povrchu u cyklicky namáhaných součásti vedou k výraznému prodloužení jejich životnosti. Jako příklad slouží napětí v předpjatém betonu a napětí vyvolaná některými typy povrchového opracování (kuličkování, balotínování), kdy se zvyšuje mez únavy. Naopak tahová zbytková napětí podporují vznik trhlin, napěťovou korozi, snížení meze únavy (viz. Smithův nebo Haihahův diagram), snížení křehkolomové oblasti atd. [22, 23, 24]. Nejčastějším případem negativního vlivu vysokých tahových napětí je vznik trhlin v okolí svarových spojů při chladnutí a fázových transformacích i bez působení dodatečných vnějších sil.

Nebezpečná napětí je třeba alespoň omezit, a to pokud možno nedestruktivním způsobem. Cílem je dosáhnout ve výrobku takový stav napjatosti, aby se ani v superpozici s vnějším namáháním nepřekročilo v žádném místě kritické maximum, případně aby se předvídaná maxima vnějších sil (provozních napětí) účinkem zbytkových napětí snížila. (V místě, kde lze očekávat vysoké tahy, vytvoříme uměle tlakové předpětí.) Při aplikaci metod na odstranění napětí mají přednost způsoby, při nichž se mechanické vlastnosti výrobků, hlavně pevnost a tvrdost, prakticky nemění.

3.6.2 Mechanizmy vzniku napětí ve strojírenské praxi

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. Nejruznější mechanismy vzniku zbytkových napětí zahrnujeme do některé z těchto kategorií: procesy mechanické, tepelné, chemické a kombinované.

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

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.

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

Kombinované procesy. Tuto kategorii lze ilustrovat např. broušením, frézováním, soustružením aj., které vyvolávají nejen efekty mechanické, ale i tepelné či dokonce mohou způsobit fázové transformace. Výsledná povaha stavu zbytkové povrchové napjatosti záleží na superpozici všech tří efektů. Mechanické vedou obvykle k tlakům, tepelné k tahům.

4. VLIV VÝROBNÍ TECHNOLOGIE NA STAV POVRCHOVÉ VRSTVY

Vývoj v oblasti výrobní techniky, řezných materiálů, je většinou hodnocen z hlediska vlivu na produktivitu práce. Vezme-li se ale v úvahu plné využití řezivosti nových nástrojových materiálů a příkonů strojů, které jsou často několikanásobně vyšší ve srovnání s klasickými, vzniká zde otázka, zda toto množství energie převedené na břit nástroje neovlivní výrazněji vlastnosti obrobeného povrchu, především jeho jakost.

Jakost obrobeného povrchu je možné posuzovat podle následujících hledisek:

- přesnosti rozměru a tvaru,
- drsnosti a mikrostruktury,
- vlastností povrchové vrstvy.

Přesnost rozměru a tvaru je dána vlastní přesností stroje, tuhostí systému stroj-nástroj-obrobek-přípravek a dalšími faktory, které ale působí nepřímo na technologický proces.

Drsnost a mikrostruktura povrchu je ovlivněna bezprostředně procesem řezání. Nejvýznamnějšími prvky tohoto vlivu jsou řezná rychlost a rychlost posuvu, tvar a geometrie nástroje, působení různých řezných materiálů, jejich opotřebení apod.

Vlastnosti povrchové vrstvy jsou vyjadřovány strukturálními změnami, stupněm zpevnění a stavem zbytkové napjatosti. Vzhledem k tomu, že intenzita procesu řezání se stále zvyšuje v důsledku dalšího růstu řezných rychlostí a vyššího energetického působení na břit nástroje, je nutno počítat s tím, že vlastnosti povrchové vrstvy součástečně se mohou výrazně měnit vzhledem k vlastnostem materiálu ve větší vzdálenosti od povrchu [25].

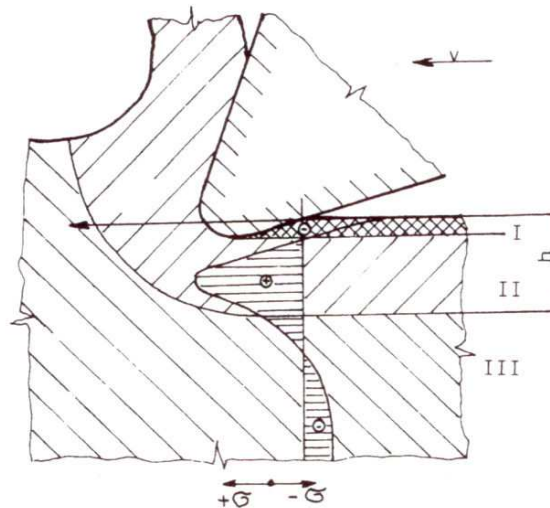
4.1 Technologické příčiny vzniku zbytkových napětí

Vzhledem k typu experimentů diskutovaných v této práci, budeme v tomto odstavci uvažovat případ dokončovacího obrábění. Při tomto druhu obrábění dochází k superpozici stavu zbytkové napjatosti přítomné v obrobku před procesem obrábění a nejčastěji již zmíněných tří vlivů přítomných při obrábění, tj. elasticko-plastické deformaci, teplotních polí a fázových transformací. Podrobněji rozeberme následující případy [12]:

Povrchová vrstva je zatěžovaná mechanicky [11]

- Při oddělování třísky dochází v oblasti zóny řezání k intenzivní celkové deformaci. Tato pružně-plastická deformace zasahuje i pod obrobený povrch, navíc zde působí přechování povrchové vrstvy způsobené tím, že břit není ideálně ostrý a část nastavené hloubky záběru se neodřízne. Z fyzikálního hlediska lze vysvětlit vznik zbytkových napětí např. tím, že při plastické deformaci kovu klesá jeho hustota a roste měrný objem. Je zřejmé, že při zvýšení měrného objemu v povrchové vrstvě vznikne napětí tlakové.
- Při obrábění materiálů, kde $R_m/R_{p0.2} < 1,25$ se tvoří elementární (drobivá) tříska. Při tvoření jednotlivých elementů se narušuje spojení mezi třískou a obráběným materiálem, takže doplňující účinek napětíového pole třísky se do obrobeného povrchu nepřenáší. Třecí síly na hřbetu se snaží prodloužit zrna v povrchové vrstvě a zvětšit tak povrch, čemuž brání níže ležící neovlivněné vrstvy. V povrchové vrstvě vznikne tedy zbytkové napětí tlakové.

- Při obrábění houževnatých a plastických kovů a slitin, kdy $R_m/R_{p0.2} > 1,25$ vzniká plynulá tříška a spojení mezi třískou a obráběným materiálem se nenarušuje. Dochází k deformaci zrn základního materiálu v důsledku jejich vazby s materiálem třísky; zrna (u obrobeného povrchu) se deformují přibližně ve směru odchodu třísky. Může dojít k reorientaci zrn povrchových vrstev (protažení ve směru kolmém na obrobený povrch a stlačení ve směru rovnoběžném s povrchem). Povrchová vrstva se v důsledku toho snaží zaujmout menší povrch, a protože spodní vrstvy zůstávají beze změny, vzniká zbytkové napětí tahové.



Obr. 4.1 Schéma vzniku zbytkových napětí v povrchové vrstvě při obrábění plastických kovů [11]

I – oblast tlakových zbytkových napětí vyvolaných třením hřbetu o obrobenou plochu,

II – oblast tahových napětí vznikajících plastickým stlačením materiálu,

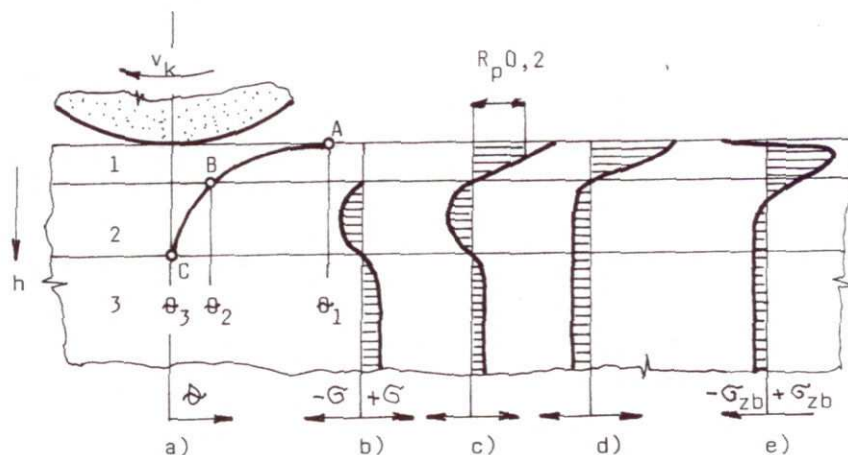
III – neovlivněná oblast; napětí vyrovnává napětí v oblasti I a II.

- Podle modelu sestaveného pro vysvětlení deformačních jevů při kontaktních tlacích válce a elasticko-plastické roviny se předpokládá, že při obrábění plastických materiálů vzniká při velkém zatížení břítu (obr. 3.1-B) zbytkové napětí tahové, při menším zatížení slabších vrstev napětí tlakové.
- Při vzniku vyšších teplot v povrchové vrstvě vznikne napětí tahové; při teplotní deformaci přesahující mez kluzu dojde k plastickému zkrácení povrchové vrstvy, jemuž brání spodní nedeformovaná vrstva [11].

Příklad vzniku zbytkového napětí při obrábění plastického materiálu $R_m/R_{p0.2} > 1,25$ je na obr. 4.1.

Povrchová vrstva je zatěžovaná mechanicky a tepelně – typické pro broušení

Při broušení se specifická práce, potřebná k oddělování materiálu, téměř celá přemění v teplo, které v místě styku kotouče s obrobkem z velké části přechází do povrchové vrstvy (obr. 4.2).



Obr. 4.2 Schéma vzniku zbytkových napětí při broušení [11]

Předpokládejme, že v povrchové vrstvě je teplota rozložena podle obr. 4.2a. Při teplotě větší než θ_2 nechť je vrstva 1 v dokonale plastickém stavu. Její odpor proti deformaci je tedy malý, takže nepůsobí na vrstvu 2. Vrstva 2 má teplotu θ_2 až θ_3 a v důsledku teplotních rozměrových změn se deformuje pouze pružně. Vrstva 3 se broušením již neohřeje.

Průběh okamžitých napětí při tomto rozložení teplot je na obr. 4.2b. Dokonale plastická vrstva 1 je bez napětí, vrstva 2 se snaží roztáhnout (tlakové napětí), čemuž brání vrstva 3 (vyrovnávací tahové napětí).

Po přejetí kotouče nastává chladnutí; v určitém okamžiku bude teplota ve vrstvě 1 nižší než θ_2 , takže tato vrstva má snahu se zkrátit, čemuž klade odpor vrstva 2 a 3. Protože vrstva 1 již při teplotě θ_2 přešla z dokonale plastického v pružně-plastický stav, vzniknou v ní okamžitá napětí tahová (podmínkou vzniku zbytkových napětí je, že tato napětí musí být větší, než je mez kluzu při teplotě θ_2), ve vrstvě 2 a 3 vyrovnávací okamžitá napětí tlaková. Na obr. 4.2e je naznačen skutečný typický průběh zbytkových napětí po broušení. Proti ideálnímu průběhu je zde patrna určitá odchylka těsně pod povrchem, kterou lze nejspíše přisoudit vlivu superpozice napětí tepelných se strukturálními. Mohou rovněž spolupůsobit napětí, která byla vyvolána záběrem brusných zrn s velkým poloměrem zaoblení nebo s nevhodnou orientací; tato zrna neřezala, ale materiál pouze odírala a plasticky deformovala.

Zbytková napětí po dokončovacích operacích vznikají mechanickým přetvořením povrchové vrstvy řeznými silami při úběru mikrotřísek, ke kterému dochází při lapování, honování či superfinišování. U netřískových dokončovacích metod, jako je např. válečkování, kuličkování, přechlazování, balotínování apod. je plastická deformace povrchových vrstev podstatou těchto způsobů. Vzhledem k tomu, že k plastické deformaci povrchové vrstvy u všech těchto metod dochází při relativně nízkých teplotách, vznikají zbytková napětí tlaková. Výjimku v dokončovacích operacích tvoří elektrochemické obrábění a leštění, kde k úběru dochází převážně elektrolytickým rozpouštěním materiálu. Nepůsobí zde ani velké mechanické síly, ani teploty, takže v povrchové vrstvě dojde k minimální redistribuci existujících zbytkových napětí [11].

4.2 Význam zbytkových napětí v povrchových vrstvách

Z teoretického rozboru procesu řezání a na základě experimentálního výzkumu lze konstatovat, že řezné podmínky mají významný vliv na vlastnosti povrchové vrstvy. Ať už je to řezná rychlost, druh nástrojového materiálu, nebo změna dokončovací operace. Je

statisticky doloženo, že většina poruch strojních součástí za provozu vzniká na povrchu, nebo těsně pod ním. To ukazuje, že mezní stav v takových případech závisí především na lokálních vlastnostech materiálu v nejvíce namáhaném místě a nikoli na průměrných vlastnostech celého průřezu.

Každá technologická operace způsobuje redistribuci zbytkových napětí. Velikost ovlivněného objemu je dána nejen přítomným teplotním polem (jeho vývojem) a plastickou deformací, ale také případnými změnami ve fázovém složení. Při obrábění je podstatou vzniku zbytkových napětí pružně-plastická deformace v oblasti tvoření třísky. Důležitým faktorem je doba působení vlivů podmínek řezání a rychlost změn probíhajících stavů. To se výrazně projevuje např. při broušení, kdy ohřev je velmi rychlý a krátkodobý, rychlost ohřevu i doba chladnutí probíhají za extrémních podmínek.

Z těchto důvodů se ukazuje nutnost sledovat a hodnotit zbytková napětí v povrchové vrstvě např. kalených ocelí, které budou použity třeba pro výrobu valivých ložisek. I když na jakost povrchové vrstvy má největší vliv poslední operace, může při nevhodně zvoleném sledu operací zůstat v povrchové vrstvě zachováno ovlivnění z operací předchozích [25].

4.3 Vliv řezných podmínek při obrábění oceli na zbytkové napětí

Výsledná hloubková distribuce zbytkových napětí je stejně jako homogenita povrchových vrstev z hlediska těchto distribucí výsledkem široké škály mnoha vlivů přítomných při obráběcím procesu. Kromě parametrů obrábění jako jsou řezná rychlost, posuv a hloubka záběru, hraje významnou roli také chemické složení nástroje a obrobku (které do značné míry ovlivňuje tepelnou vodivost a tedy přerozdělení tepla mezi obrobkem, třískou a nástrojem), geometrie nástroje, způsob odvodu tepla či lubrikace [26].

Hovoříme-li o hloubkové distribuci zbytkových napětí, máme nejčastěji na mysli závislost některé ze dvou normálových složek makroskopické zbytkové napjatosti. Vzhledem k tomu, že je v nejobecnějším případě tenzor makroskopické zbytkové napjatosti složen ze tří normálových složek σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} a tří smykových σ_{12} , σ_{13} , σ_{23} , lze pomocí některých metod studovat hloubkovou distribuci jakékoliv složky. V dalším textu této podkapitoly se ovšem omezíme na hloubkovou distribuci nejčastěji sledovaných složek napětí σ_{11} , σ_{22} .

Zcela jednoznačná je dostupná literatura v případě vlivu posuvu na zub u frézování. Povrchové napětí a hloubka ovlivněné oblasti se zvyšují s rostoucí hodnotou posuvu na zub [27]. Nabízí se následující vysvětlení pro tvrzení týkající se hloubky ovlivněné oblasti: vyšší posuv na zub se projevuje zvýšením hodnot tečných a obvodových sil při obrábění a povrch je více deformován a z Herzova modelu deformace vyplývá i zmiňovaná závislost.

Při posuzování vlivu řezné rychlosti je podstatným faktorem také materiál nástroje a obrobku, které mají významný vliv na veličinu ε vyjadřující množství energie, které přejde do obrobku. Mezi faktory ovlivňující ε patří výběr materiálu nástroje a materiálu obrobku (resp. jejich koeficienty tepelné vodivosti k), forma odvodu tepla (tepelná jímavost chladiče) a lubrikanty snižující tření. Uvedme názorný příklad týkající se procesu broušení [28].

Tepelná vodivost konvenčních brousicích kotoučů dosahuje hodnot desítek až tisíců [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]; korundový kotouč má k kolem $40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, zatímco CBN kotouč (kubický nitrid boru), který má tvrdost jen o něco málo menší než diamant, má $k = 1300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. CBN se používá jen na obrábění velmi tvrdých materiálů, jinak by docházelo k velkému zanášení kotouče broušeným materiálem. Pro broušení konvenčních ocelí korundovými brousicími kotouči bylo zjištěno ε v rozmezí 60 – 75 %, pro CBN kotouče 20 % [29].

U řezné rychlosti tedy nelze univerzálně říci, zda její vyšší hodnota způsobuje vyšší hodnoty povrchového zbytkového napětí či snižuje hloubku ovlivněné oblasti, je třeba pro danou situaci provést analýzu a teprve z ní učinit závěry.

Použití lubrikantů při obráběcích procesech snižuje řezné síly (mazací účinky) a zároveň odvádí teplo z povrchu (chladičí účinky). Přímo se tedy nabízí závěr, že lubrikace způsobuje snížení velikosti zbytkových napětí a zmenšuje hloubku ovlivněné oblasti. Některé výsledky experimentálních prací však tyto závěry přímo vyvracejí [30].

Většina dostupné literatury se shoduje na faktu, že tvar distribuce makroskopických zbytkových napětí je výsledkem působení desítek vlivů a parametrů. Při korektním přístupu k tomuto problému je třeba zkoumat tyto vlivy za pomoci experimentální analýzy souboru vzorků pečlivě obroběných za účelem výzkumu několika vybraných faktorů.

4.4 Vliv vlastností obráběného materiálu

Různé kovy se při obrábění zpevňují odlišně. Dosažené zpevnění závisí na schopnosti kovu plasticky se deformovat. Základní podíl na plastické deformaci různých kovů má stavba jejich krystalické mřížky, resp. výskyt jejich skluzových systémů, tj. skluzové roviny se skluzovým směrem.

- Kovy se šesterečnou (hexagonální) mřížkou (např. *Ti* a jeho slitiny) – se působením nástroje před jejich porušením plasticky deformují jen velmi málo, protože mají málo skluzových rovin na nichž může docházet ke skluzovému posunutí.
- Kovy s krychlovou (kubickou) plošně centrovanou mřížkou (*Fe- γ* , *Sn*, *Co*, *Cu*, *Ag*, *Pb* a jiné) – u těchto kovů rozlišujeme šest směrů typu $\langle 110 \rangle$ a čtyři roviny typu $\{111\}$, celkem existuje 24 kombinací, ve kterých může docházet ke skluzu hranové dislokace. Kovy této skupiny jsou tedy velmi dobře plasticky deformovatelné.
- Kovy s krychlovou prostorově centrovanou mřížkou (*Fe- α* a δ , *Cr*, *Mo*, *W*, *V* aj.) – jsou přechodem mezi dvěma výše uvedenými typy mřížek [31].

5. METODY MĚŘENÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ

Od vzniku problematiky zbytkových napětí byla vyvinuta široká škála metod určených pro jejich měření. Tyto metody se vyznačují různou přesností závislostí na fyzikální podstatě jevu využívaného ke stanovení těchto napětí a možnosti měření dané veličiny. Používané metody lze rozdělit na základě různých hledisek. Podle stupně ovlivnění zkoumaného vzorku se metody dělí na [32, 33]:

- *destruktivní*, při nichž dochází k zásadnímu porušení zkoumané součásti, která následkem měření není schopna plnit původní funkci;
- *semidestruktivní*, u kterých je měřením mechanicky ovlivněná malá část součásti a lze ji následně po případných malých úpravách dále používat;
- *nedestruktivní*, při kterých nedochází k mechanickému ovlivnění součásti.

V následujícím textu bude použito rozdělení metod na základě fyzikálního principu měření určovaných veličin.

5.1 Metody mechanické

Tyto metody jsou založeny na mechanickém uvolnění napětí, které se projeví deformací zkoumaného objektu. Deformace jsou zpravidla měřeny tenzometry, jejichž uspořádání a vyhodnocení měřených signálů jsou závislá na druhu metody.

- *Metoda odstraňování vrstev*

Během postupného odstraňování povrchových vrstev materiálu součásti se zbytkovou napjatostí dochází k novému rozdělení vnitřních sil. Důsledkem je deformace tělesa, kterou je možno měřit. Nejčastěji se těmito metodami určuje zbytková napjatost v prutových tělesech a deskách. Odstraňování vrstev se z důvodu vnesení dalších napětí neprovádí strojním obráběním, přednost je dáována chemickému a elektrochemickému odstraňování povrchových vrstev [32, 34].

- *Dělicí metody*

Jedná se o destruktivní metody, při nichž je zkoumané těleso rozřezáním rozděleno na části nebo jsou do něj vytvořeny různě uspořádané drážky. Tato operace slouží k uvolnění technologických (zbytkových) napětí. Těmito metodami lze vyšetřovat i prostorová zbytková napětí při vytvoření speciální trojrozměrné tenzometrické růžice zalité do pryskyřice a otvoru ve vyšetřovaném místě [32, 34].

Z velikosti změřených uvolněných deformací se vypočte zbytkové napětí, které působilo na nově vytvořený povrch před jeho vznikem. K přepočtu se používají analytické metody včetně moderních výpočtových metod, jako je metoda konečných prvků.

- *Metoda trhliny*

Ve zkoumaném materiálu je uměle vytvořena trhlina nebo drážka a nejčastěji dále uvedenými optickými metodami (*holografická interferometrie, moiré interferometrie a*

Electronic Speckle Pattern Interferometers) je sledováno uvolnění zbytkových napětí v jejím okolí. Postupným zvětšováním hloubky drážky je možno určit rozložení zbytkových napětí i ve směru kolmém k povrchu [35]. Mezi tyto metody patří i metoda křížového řezu, kdy tenkým kotoučem je naříznut ve dvou vzájemně kolmých směrech povrch součásti. Ten je předem opatřen v jednom takto vzniklém kvadrantu tenzometrickou 45 stupňovou růžicí.

- *Měření mikrotvrdomosti*

Tahová zbytková napětí na rozdíl od tlakových usnadňují prostup vnikacího tělesa do materiálu. V oblasti tahových napětí je naměřena nižší tvrdost, v oblasti tlakových napětí vyšší. Výhodou této metody je její jednoduchost a prakticky nulové poškození vzorku. Na druhou stranu vykazuje nízkou citlivost a možnost pouze kvalitativních měření, pro něž je třeba navíc provést kalibraci [36, 37].

- *Mikrostereoskopická metoda*

Jedná se o geometrickou metodu, při níž je na povrchu objektu ve zkoumaném místě vytvořena jemná mřížka. Do objektu je vyvrtán otvor a následně zkoumaná deformace nanesené mřížky [34]. Popisovaná metoda je v podstatě stará diferenčně pojatá metoda sítí. Obdobné uvolnění zbytkových napětí využívá dále popsaná odvrtávací metoda, ovšem za pomoci přímého měření uvolněných deformací v okolí vývrtu.

- *Odvrtávací metoda tenzometrická*

Představuje tradiční semidestruktivní měření zbytkových napětí přepočtem přes uvolněné deformace, které se nejčastěji měří tenzometry [32, 33, 34, 38]. Tato metoda je rozepsána podrobně v kapitole 5.4.

- *Metoda sloupku (ring core method)*

Jedná se o obdobu odvrtávací metody, při níž je uvolňován sloupek materiálu odfrézováním kruhové drážky. Uvolněné deformace sloupku jsou opět měřeny tenzometry na jeho čele. Oproti odvrtávací metodě je citlivější a uvolněné deformace lze použít přímo pro stanovení zbytkových napětí bez potřeby kalibračních koeficientů [32, 34]. Předpoklad homogenní napjatosti po povrchu ovšem zahrnuje podstatně větší oblast než u odvrtávací metody. Další výhodou je nižší citlivost na odchylky v geometrii (rozdíl středění tenzometrické růžice a odebírané mezikružší).

5.2 Metody optické a mechanicko – optické

- *Piezospektroskopická metoda (Ramanova spektroskopie)*

Jedná se o plně nedestruktivní metodu s vysokou prostorovou citlivostí využívající Ramanova jevu. Při něm dochází dopadem laserového paprsku k rozkmitání atomových vazeb a následnou analýzou odraženého světla (Ramanovo spektrum) lze získat informace nejen o chemickém složení, ale i o fyzikálním stavu povrchové vrstvy materiálu. Mimo jiné tedy i o zbytkových napětích. Prozatím tato metoda je rozpracována a ověřena na omezeném spektru materiálů, jako jsou karbidy křemíku, některé keramické materiály, ale hlavně pro kompozity [39].

- *Fotoelastická metoda*

Tato metoda využívá vlastnosti průhledných materiálů, v nichž se rychlost světla mění anizotropicky vzhledem ke směru hlavních napětí. Při osvětlení objektu monochromatickým nebo bílým světlem a jeho pozorováním přes polarizační filtry vznikají interferenční proužky. Tato měření se obecně používají pro měření dvourozměrných modelů z epoxidových pryskyřic anebo rozřezaných trojrozměrných modelů v nichž byla tato napětí tzv. zmražena.

Povrchová zbytková napětí reálných součástí a konstrukcí lze takto vizualizovat nanesením vhodného laku či tenké vrstvy opticky citlivého materiálu na povrch zkoumaného objektu [35] a zbytkovou napjatost analyzovat pak při jejím uvolnění vývrtem či řezy, jak bylo již shora uvedeno.

- *Holografická interferometrie*

Tato metoda stejně jako další dvě uvedené jsou pro měření zbytkových napětí využívána v kombinaci s odvrtačací metodou, jejíž pomocí jsou zbytková napětí uvolněna. Holografickou interferometrií je dopadajícím monochromatickým světlem vytvořen společný hologram pro stav objektu před a po vyvrtání otvoru. Rekonstrukcí obrazu vzniknou interferenční proužky, jejichž analýzou lze určit uvolněné deformace a tedy i zbytková napětí [40, 41, 42, 43].

- *Moiré interferometrie*

Moiré interferometrie se používá pro měření složek posuvů v rovině povrchu objektu. Na něm je nanesena difrakční mřížka s vysokou hustotou proužků, na které dochází k odrazu dopadajících paprsků. V závislosti na deformaci mřížky způsobené posuvy bodů povrchu lze určit hledané posuvy [44]. Metoda se vyznačuje vysokou citlivostí, avšak preparace mřížky na povrch objektu společně s dalšími vlivy měření prodražuje a omezuje použití spíše na laboratorní prostředí a materiálový výzkum.

- *Metoda ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometers)*

Jedná se o velmi progresivní metodu vhodnou pro měření všech tří složek pole posuvů na povrchu objektu [44].

5.3 Ostatní metody

Jedná se o metody využívající dalších fyzikálních jevů výše neuvedených, a to především elektromagnetického či mechanického vlnění.

- *Rentgenografická metoda*

Metoda patří k tradičním zcela nedestruktivním metodám zjišťování zbytkových napětí. Využívá difrakce rentgenového záření na povrchu krystalických materiálů. Změřením Braggových úhlů, při kterých dochází k úplnému odrazu záření v různých směrech, jsou nepřímo určovány meziatomové vzdálenosti. Aplikací Hookeova zákona lze na základě změřených závislostí úhlů na úhlu Braggově (*metoda $\sin^2\psi$*) určit zbytková napětí ve vzorku, avšak pouze elastická [35, 39, 45].

Předností metody je skutečnost, že není třeba srovnávat dva stavy napjatosti a měření jsou prováděna přímo na základě jediného stavu objektu bez jeho ovlivnění. Na druhou stranu je

pro měření zapotřebí nákladných difraktometrů a je možno vyhodnocovat pouze rovinnou napjatost v tenké povrchové vrstvě vybraných materiálů. Pokud je touto metodou zjišťována zbytková napětí pod povrchem, je tato metoda kombinovaná s šetrným odběrem vrstev.

- *Metoda synchrotronové, neutronové a elektronové difrakce*

Měření je založeno na stejném principu jako rentgenografická metoda s tím rozdílem, že namísto rentgenového záření je použito synchrotronové (resp. neutronové či elektronové) záření [35, 39, 46]. Synchrotronové a neutronové záření proniká hlouběji do materiálu, čímž se oproti rentgenografické metodě zvyšuje prostorová citlivost. Metodou elektronové difrakce lze měřit zbytková napětí II. a III. druhu.

- *Magnetoelastická metoda – Barkhausenův šum*

Při magnetizaci materiálu dochází ke vzniku nespojitostí, tzv. Barkhausenova šumu, na jehož intenzitu má vliv i přítomnost a rozložení pružných napětí. Ta ovlivňují orientaci jednotlivých domén při následné magnetizaci (tzv. Wiedemanův efekt). V důsledku tohoto jevu (tzv. magnetoelastická interakce) u materiálů s pozitivní magnetostrickí (železo, většina ocelí, kobalt) tlakové napětí snižuje intenzitu Barkhausenova šumu, zatím co tahové napětí ji zvyšuje. Měřením jeho intenzity lze stanovit zbytková napětí včetně směru hlavních napětí [32]. Dalšími metodami využívajícími elektromagnetických vlastností materiálů jsou magnetostrickní metoda a metoda vířivých proudů [32, 34, 35].

- *Ultrazvukové metody*

Tyto metody jsou založeny na principu akusticko – elastického jevu. Měřena je rychlost šíření ultrazvukové vlny, která je závislá na stavu napjatosti objektu. Metody vyžadují kalibraci pro každý druh materiálu a pro určení úplného stavu napjatosti je nutno provádět ve zkoumaném vzorku měření ve více směrech (v podélném a v příčném směru). Na obdobném principu funguje metoda akustické emise [47], která je ale povětšinou užívána pro sledování šíření defektu.

- *Termomechanické metody*

Pomocí nich lze za použití infračervené kamery měřit velice malé změny teploty při deformaci materiálu. Zbytková napětí se stanovují na základě tepelné disipace při plastické deformaci [35, 48].

- *Chemické metody*

Tyto metody využívají změn vyvolaných chemickými procesy, jako např. difúze vodíku do povrchové vrstvy nebo koroze pod napětím [32, 34].

5.4 Teoretické základy použitých experimentálních metod

V posledních letech byla vypracována celá řada experimentálních metod pro měření zbytkových napětí, avšak tyto metody nejsou v současné době tak propracované, jako metody pro zjišťování jiných vlastností materiálů. Pro klasifikaci těchto metod může být uplatněno mnoho hledisek, např. rozdělení dle principu: mechanické, difrakční, magnetické, ultrazvukové a nepřímé metody. Dále pak podle toho, do jaké míry je narušena celistvost vyšetřovaného tělesa, tj. nedestruktivní, semidestruktivní a destruktivní atd. Přehled metod pro určování zbytkových napětí a jejich rozdělení dle různých kritérií lze najít v literatuře [46, 49 – 55].

Hlavním těžištěm prováděných experimentů je měření deformací pomocí rentgenografických difrakčních metod. Vlnové délky záření, používaného při rentgenografické tenzometrické difrakční analýze, jsou řádově desítky nanometrů, což odpovídá mezirovinným vzdálenostem v krystalech. Pomocí difrakčních metod lze měřit pouze elastickou deformaci krystalové mřížky, zbytkové napětí lze spočítat z naměřených deformací využitím teorie elasticity.

Pro doplnění těchto výsledků byla na části experimentálních vzorků realizována měření pomocí metody vetknutého nosníku a odvrtávací metody. Tyto dvě mechanické metody jsou založené na principu porušení momentové a silové rovnováhy v tělese a určují celkovou deformaci, která je tvořena jak elastickou tak plastickou složkou.

Zvolené dva mechanické přístupy a difrakční metoda měření stavu zbytkové napjatosti tedy nejsou konkurenční, ale spíše doplňkové. Poskytují jiný náhled na napětí v materiálu a výsledky těchto tří přístupů by neměly být srovnávány měřítkem shody, ale měřítkem vzájemného doplňování.

V následujícím textu jsou uvedeny základní principy použitých experimentálních metod.

5.4.1 Rentgenová difrakční tenzometrie

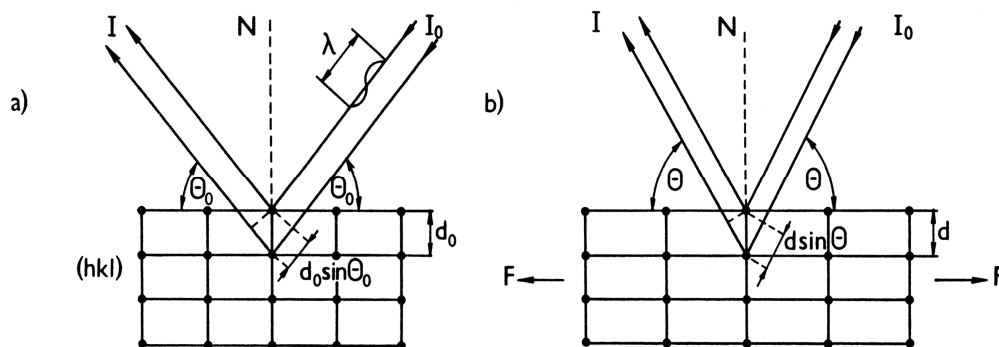
Podstatou rentgenové tenzometrie je využití rozptylu (difrakce) rentgenových paprsků na krystalech k měření změn vzdáleností atomových mřížkových rovin vyvolaných napětím (viz obr. 5.1). Rozptyl záření na sousedních mřížkových rovinách vede ke vzniku interferenčního maxima ve směru θ , pokud je rozdíl drah obou paprsků celočíselným násobkem vlnové délky λ použitého záření, tj. platí-li Braggova podmínka

$$(5.1) \quad n\lambda = 2d \sin \theta,$$

kde d je vzdálenost sousedních rovin typu $\{hkl\}$. Působením mechanického napětí se změní jak mezirovinná vzdálenost d , tak i úhlová poloha θ . Diferencováním (5.1) dostaneme vztah

$$(5.2) \quad \varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = -\cot g \theta_0 (\theta - \theta_0)$$

mezi mřížkovou deformací ε v napjatém krystalu a úhlovým posunem interferenčního maxima $(\theta - \theta_0)$; d_0 a θ_0 jsou hodnoty d a θ odpovídající nenapjatému krystalu.



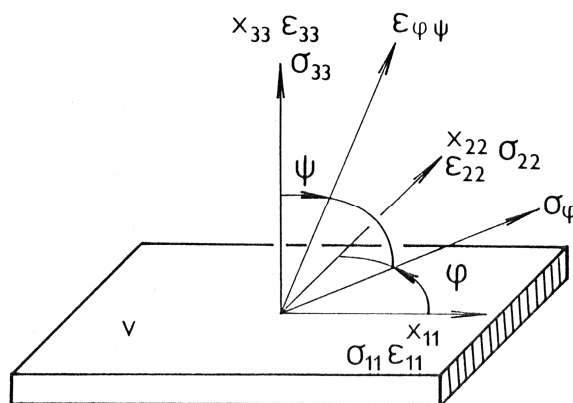
Obr. 5.1 Deformace vzdáleností mřížkových rovin $\{hkl\}$ a změny úhlové polohy interferenčního maxima; I_0 a I jsou intenzity dopadajícího a difraktovaného svazku rentgenového záření; a) nenapjatý stav, b) změny vyvolané silou F

5.4.1.1 Metoda $\sin^2\psi$

Budeme-li uvažovat soustavu souřadnic spojenou se vzorkem (obr. 5.2) a označíme-li σ_{ij} složky tenzoru napětí působícího na objemový element vzorku, který splňuje podmínky lineární teorie elasticity, lze mřížkovou deformaci $\varepsilon_{\varphi,\psi}$ v libovolném směru $\varphi\psi$ vyjádřit vztahem:

$$(5.3) \quad \varepsilon_{\varphi,\psi} = \frac{\nu+1}{E} (\sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi - \sigma_{33}) \sin^2 \psi + \frac{\nu+1}{E} (\sigma_{13} \cos \varphi + \sigma_{23} \sin \varphi) \sin 2\psi + \frac{1}{E} \sigma_{33} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}).$$

Úhel φ charakterizuje směr napětí σ_φ vzhledem k ose x_{11} , ψ je úhel mezi osou x_{33} (normálou k povrchu) a směrem deformace $\varepsilon_{\varphi,\psi}$.



Obr. 5.2 Systém souřadnic spojený se vzorkem

Za předpokladu dvojosého stavu napjatosti, kdy $\sigma_{13} = 0$, a po substituci

$$(5.4) \quad \sigma_\varphi = (\sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi)$$

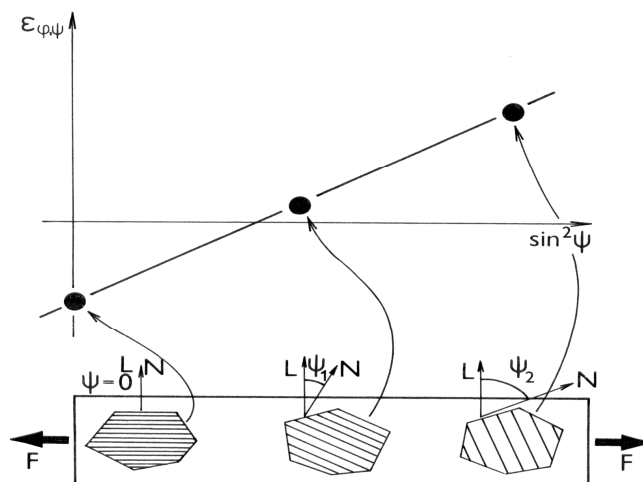
bude vztah (5.3) lineární závislostí mezi mřížkovou deformací $\varepsilon_{\varphi,\psi}$ a $\sin^2\psi$:

$$(5.5) \quad \varepsilon_{\varphi,\psi} = \frac{\nu-1}{E} (\sigma_{\varphi} \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22})).$$

Derivací rovnice (5.5) podle $\sin^2 \psi$ [56] dostáváme

$$(5.6) \quad \frac{\partial \varepsilon_{\varphi,\psi}}{\partial \sin^2 \psi} = \frac{\nu+1}{E} \sigma_{\varphi},$$

tj. směrnice přímky $\varepsilon_{\varphi,\psi}(\sin^2 \psi)$ je dána elastickými konstantami E , ν a působícím napětím σ_{φ} .



Obr. 5.3 Princip měření napětí metodou " $\sin^2 \psi$ "

Ztotožníme-li mřížkovou deformaci ε s deformací $\varepsilon_{\varphi,\psi}$, dostaneme základní rovnici rentgenografického měření napětí podle tzv. metody " $\sin^2 \psi$ " [56]:

$$(5.7) \quad \varepsilon_{\varphi,\psi} = \cot g \theta_0 (\theta - \theta_0) = \frac{\nu+1}{E} \sigma_{\varphi} \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}).$$

Výraz pro výpočet složky napětí σ_{φ} :

$$(5.8) \quad \sigma_{\varphi} = -\frac{E}{\nu+1} \cot g \theta_0 \frac{\partial \theta_{\varphi\psi}}{\partial \sin^2 \psi}.$$

Rentgenografické stanovení složky σ_{φ} metodou " $\sin^2 \psi$ " tedy vyžaduje dostatečně přesné určení úhlové polohy $\theta_{\varphi\psi}$ interferenčních linií získaných difrakcí záření na vhodných systémech $\{hkl\}$ v azimutální rovině $\varphi = \text{konst.}$ při různých hodnotách úhlu ψ . Princip metody " $\sin^2 \psi$ " je schématicky znázorněn na obr. 5.3. Veličiny

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

značí rentgenografické elastické konstanty pro reflektující systém rovin (hkl).

5.4.1.2 Rentgenografická tenzometrická metoda „jedné expozice“

Z předchozího odstavce je zřejmé, že k sestrojení lineární závislosti $\varepsilon_{\varphi,\psi}$ ($\sin^2\psi$), z níž pak počítáme σ_φ , $\sigma_{11} + \sigma_{22}$, jsou potřebné experimentální hodnoty $\varepsilon_{\varphi,\psi}$ alespoň ze dvou měření provedených při různých úhlech ψ .

Dosadíme-li do vztahu (5.7) $\psi_1 \neq \psi_2 \neq 0$, pak po odečtení $\varepsilon_{\varphi,\psi_1} - \varepsilon_{\varphi,\psi_2}$ máme

$$(5.9) \quad \sigma_\varphi = \frac{1}{\frac{1}{2}S_2} \frac{\varepsilon_{\varphi,\psi_1} - \varepsilon_{\varphi,\psi_2}}{\sin^2\psi_1 - \sin^2\psi_2} \cot g\theta_0 \frac{\partial\theta_{\varphi\psi}}{\partial\sin^2\psi}.$$

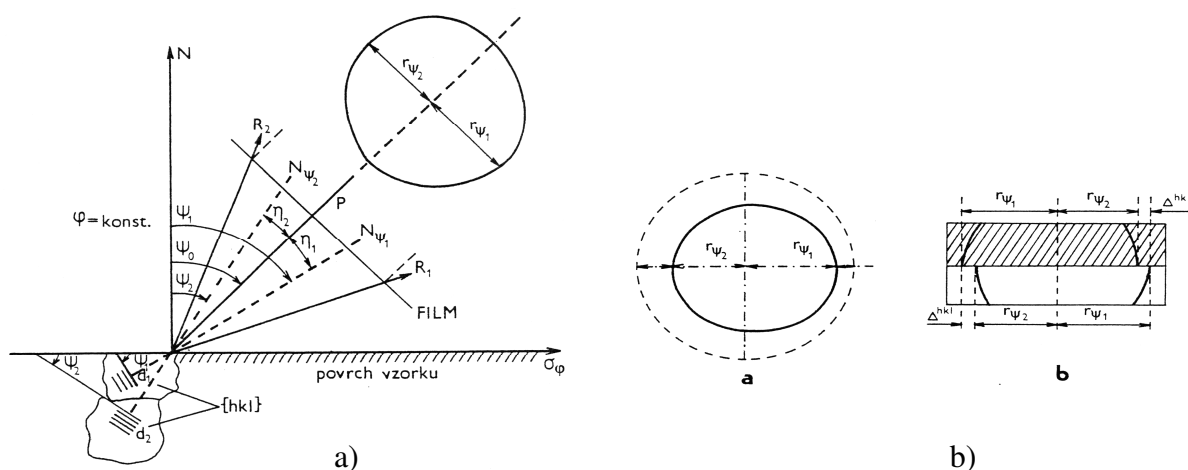
Výraz (5.9) je v rtg tenzometrii používán k výpočtu napětí σ_φ metodou "jedné expozice" [56]. Při uspořádání Debyeovy-Scherrerovy metody s fotografickou registrací difraktovaného záření lze hodnoty $\varepsilon_{\varphi,\psi_1}$, $\varepsilon_{\varphi,\psi_2}$ určit z jednoho rentgenogramu.

Tento experimentální postup se nevyznačuje vysokou přesností určení σ_φ , neboť

- při sestrojení závislosti $\varepsilon_{\varphi,\psi}(\sin^2\psi)$ se zde vychází pouze ze dvou zjištěných hodnot $\varepsilon_{\varphi,\psi}$;
- chyby stanovení Braggova difrakčního úhlu jsou při fotografické detekci zpravidla větší než při měření na rentgenovém difraktometru s počítačovou registrací difraktovaného záření.

Pro praxi však mají smysl hlavně ty rentgenografické metody měření napětí, které dávají rychlou informaci a přitom jsou nezávislé na tvaru a rozměrech zkoumaných objektů. Tyto požadavky splňuje metoda "jedné expozice".

Debyeovo-Scherrerovo uspořádání na zpětný odraz vždy předpokládá úzce kolimovaný dopadající svazek záření. Ozářená ploška má v tomto případě zpravidla menší rozměry než při měření na difraktometru. Tuto skutečnost lze v rtg tenzometrii s výhodou použít pro mapování povrchů studovaných vzorků.



Obr. 5.4 a) Schéma metody zpětného odrazu při šikmém dopadu primárního svazku P na povrch vzorku, který je vystaven tahovému napětí σ_φ ; b) Schéma difrakčního obrazu získaného metodou "jedné expozice", R_1 a R_2 jsou body interferenčního kužele studované látky v azimutální rovině σ_φ , N_{ψ_1} , N_{ψ_2} – normály k systému $\{hkl\}$ mřížkových rovin vhodně orientovaných krystalků, N – normála k povrchu vzorku, $\eta_i = 90^\circ - \theta_i$, kde θ_i je Braggův úhel reflexe na systému $\{hkl\}$ s mezivrstevnou vzdáleností d_i ($i = 1, 2$) [56].

Předpokládejme, že úzký svazek monochromatických rentgenových paprsků P dopadá na povrch napjatého vzorku pod úhlem ψ_0 v azimutální rovině určené směrem primárního svazku a povrchovou normálou N (obr. 5.4). Při uvedeném uspořádání Debyeovy-Scherrerovy metody dostaneme na snímku interferenční linie napjatého materiálu excentrické vzhledem k ose primárního svazku, která určuje střed filmu, tj. $r_{\psi_1} \neq r_{\psi_2}$. Asymetrie rentgenogramů je důsledkem difrakce paprsku P na soustavách rovin $\{hkl\}$ různě orientovaných (a tedy i různě deformovaných) ke směru působícího napětí.

V případě, že primární svazek záření dopadá na povrch zkoumaného vzorku pod úhlem $\psi_0 = 45^\circ$, lze na základě (5.9) odvodit vztah:

$$(5.10) \quad \sigma_\varphi = \frac{\cot g\theta_0 \cos^2 2\theta_0}{\frac{1}{2}s_2} \frac{r_{\psi_1} - r_{\psi_2}}{2 \sin 2\eta} \frac{1}{D},$$

kde θ_0 – Braggův úhel reflexe $\{hkl\}$ odpovídající nenapjatému materiálu, $\eta = 90 - \theta_0$; D je vzdálenost film-vzorek; veličiny r_{ψ_1} , r_{ψ_2} (viz obr. 5.4a) udávají excentricitu interferenční linie vzhledem ke středu filmu.

Zavedeme-li označení:

$$(5.11) \quad \Delta^{hkl} = r_{\psi_1} - r_{\psi_2}; \quad K = \frac{\cot g\theta_0 \cos^2 2\theta_0}{\frac{1}{2}s_2} \frac{1}{2 \sin 2\eta},$$

Pak bude:

$$(5.12) \quad \sigma_\varphi = K \frac{\Delta^{hkl}}{D}.$$

Veličina K je při sledování linie $\{hkl\}$ svazku P dopadajícího pod úhlem $\psi_0 = 45^\circ$ na daný materiál vždy kladnou konstantou. Předpokládáme-li navíc neměnnou vzdálenost D , pak vyplývá, že velikost povrchové složky napětí σ_φ je úměrná excentricitě Δ^{hkl} a $\text{sgn}(\sigma_\varphi) = \text{sgn}(\Delta^{hkl})$.

Protože není možné stanovit polohu středu filmu, nelze určit Δ^{hkl} přímým měřením r_{ψ_1} a r_{ψ_2} . Jeden ze způsobů, jak tuto nesnáz obejít, spočívá v tom, že před expozicí zacloníme horní polovinu filmu (viz obr.5.4–B) maskou dokonale absorbující difraktované záření. Z difrakčního "kroužku" $\{hkl\}$ bude tedy při expozici t_1 registrována pouze jeho spodní část. Po ukončení expozice otočíme kazetu o 180° kolem osy splývající se směrem primárního svazku, horní polovinu opět zacloníme a při nezměněném uspořádání znovu exponujeme (expozice t_2). Nespjitosti průběhu difrakční linie na obou stranách snímku (obr. 5.4–B) odpovídají veličině Δ^{hkl} ze vztahu (5.12).

5.4.2 Odvrtávací metoda

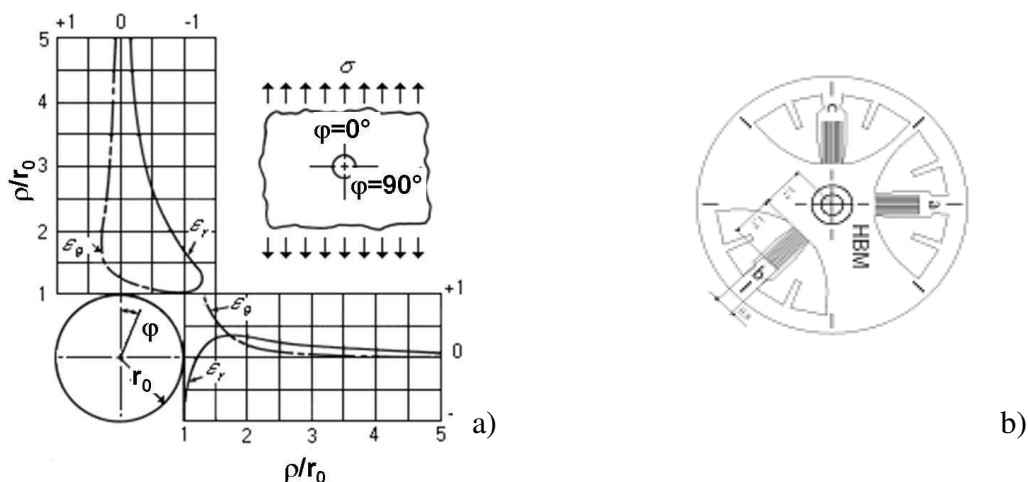
Analytické vztahy pro odvrtávací metodu byly odvozeny pro nejjednodušší případ jednoosé napjatosti bez gradientu napětí do hloubky, kdy byl do tenké rovinné desky vyvrtán průchozí otvor o malém průměru [57]. Vyvrtáním průchozího otvoru o poloměru r_0 dojde v místě P určeném polárními souřadnicemi (ρ, φ) 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 ε_ρ a ε_n :

$$(5.13) \quad \begin{aligned} \varepsilon_\rho &= \sigma(A + B \cos 2\varphi), \\ \varepsilon_n &= \sigma(-A + C \cos 2\varphi), \end{aligned}$$

kde pro konstanty úměrnosti A , B , C platí:

$$(5.14) \quad A = -\frac{1+\mu}{2E} \left(\frac{r_0^2}{\rho^2} \right), \quad B = -\frac{1+\mu}{2E} \left[\left(\frac{4}{1+\mu} \right) \frac{r_0^2}{\rho^2} - \frac{3r_0^4}{\rho^4} \right], \quad C = -\frac{1+\mu}{2E} \left[\left(-\frac{4\mu}{1+\mu} \right) \frac{r_0^2}{\rho^2} - \frac{3r_0^4}{\rho^4} \right].$$

Z průběhů radiálních a tangenciálních deformací, znázorněných na obr. 5.5 plyne, že nevhodnější 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 takřka trojnásobně větší než tangenciální.



Obr. 5.5 a) Radiální a tangenciální deformace v závislosti na vzdálenosti od středu odvrтанého otvoru pro tenkou desku ve stavu jednoosé napjatosti, b) uspořádání odporové tenzometrické růžice pro určení zbytkových napětí [57]

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

$$(5.15)$$

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

V rovnici (5.15) vystupují tři neznámé: hlavní napětí σ_x , σ_y a úhel φ , 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.

Na obr. 5.5b je znázorněno uspořádání tenzometrů na tenzometrické růžici, která byla použita v experimentu. Deformace, které měří tenzometry označené a , b , c , jsou rovny:

$$(5.16) \quad \begin{aligned} \varepsilon_a &= A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\varphi, \\ \varepsilon_b &= A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2(\varphi + 45^\circ), \\ \varepsilon_c &= A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2(\varphi + 90^\circ). \end{aligned}$$

jejichž řešením jsou následující vztahy:

$$(5.17) \quad \begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b}{4A} + \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}, \\ \sigma_{\min} &= \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b}{4A} - \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}, \\ \tan 2\varphi &= \frac{\varepsilon_a - 2\varepsilon_b + \varepsilon_c}{\varepsilon_c - \varepsilon_a}. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \varepsilon_c > \varepsilon_a &\dots\dots\dots \varphi \text{ je vztažen k } \sigma_{\max}, \\ \varepsilon_c < \varepsilon_a &\dots\dots\dots \varphi \text{ je vztažen k } \sigma_{\min}, \\ \varepsilon_c = \varepsilon_a &\dots\dots\dots \varepsilon_b < \varepsilon_a \dots\dots\dots \sigma_{\max} \text{ je v } \varphi = 45^\circ, \\ &\dots\dots\dots \varepsilon_b > \varepsilon_a \dots\dots\dots \sigma_{\max} \text{ je v } \varphi = -45^\circ. \end{aligned}$$

Tímto byly určeny velikosti i směry hlavních napětí. Je nutné a důležité zdůraznit, že vztahy (5.17) byly odvozeny za předpokladů dvojosého stavu napjatosti lineárně elastické, izotropní a homogenní desky, bez gradientu napětí do hloubky, kdy díra o malém průměru byla vyvrtána skrz desku. Používané tenzometry nemají smyčky vinutí pouze v radiálním směru a naměřená deformace obsahuje také tangenciální složky; proto se místo koeficientů A a B zavádí pro danou konstrukci vinutí tenzometru korigované koeficienty A' a B' , které se vypočítají integrací přes skutečnou plochu vinutí nebo se stanoví experimentální kalibrací.

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. V provedeném experimentu byla použita pouze integrální metoda.

Podstata a název integrální metody [58] 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:

$$(5.18) \quad \varepsilon_{\rho_j}(z) = \frac{1}{2E} \int_0^z \left\{ (1 + \mu) \hat{A}(Z, z) [\sigma_x(Z) + \sigma_y(Z)] + \hat{B}(Z, z) [\sigma_x(Z) - \sigma_y(Z)] \right\} dZ,$$

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

$$(5.19) \quad \varepsilon_{\rho_j}(z) = \frac{1}{2E} \sum_{i=1}^j \bar{a}_{ji} (1 + \mu) (\sigma_{xi} + \sigma_{yi}) + \bar{b}_{ji} (\sigma_{xi} - \sigma_{yi}),$$

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

$$(5.20a) \quad p_j = \frac{\varepsilon_{3j} + \varepsilon_{1j}}{2}, \quad q_j = \frac{\varepsilon_{3j} - \varepsilon_{1j}}{2}, \quad t_j = \frac{\varepsilon_{3j} + \varepsilon_{1j} - 2\varepsilon_{2j}}{2},$$

$$(5.20b) \quad P_j = \frac{\sigma_{3j} + \sigma_{1j}}{2}, \quad Q_j = \frac{\sigma_{3j} - \sigma_{1j}}{2}, \quad T_j = \frac{\sigma_{3j} + \sigma_{1j} - \sigma_{2j}}{2}.$$

Po dosazení vztahů (5.20 a, b) do rovnice (5.19) se získá vyjádření pro kombinace napětí odpovídajících j -té vrstvě:

$$(5.21) \quad P_j = \frac{1}{\bar{a}_{jj}} \left[\frac{Ep_j}{(1+\mu)} - \sum_{i=1}^{j-1} \bar{a}_{ji} P_i \right], \quad Q_j = \frac{1}{\bar{b}_{jj}} \left[Eq_j - \sum_{i=1}^{j-1} \bar{b}_{ji} Q_i \right], \quad T_j = \frac{1}{\bar{b}_{jj}} \left[Et_j - \sum_{i=1}^{j-1} \bar{b}_{ji} T_i \right],$$

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

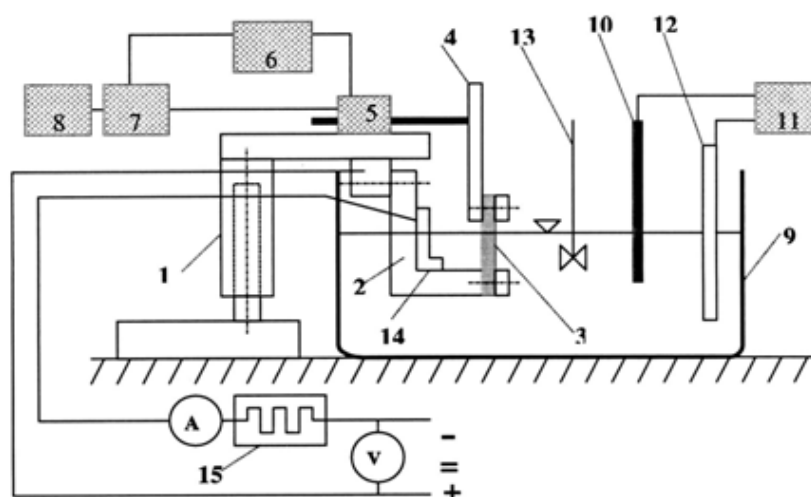
$$(5.22) \quad \sigma_{\max j} = P_j + \sqrt{Q_j^2 + T_j^2},$$

$$\sigma_{\min j} = P_j - \sqrt{Q_j^2 + T_j^2}.$$

5.4.3 Metoda postupného elektrolytického rozpouštění

Metoda postupného elektrolytického rozpouštění (metoda vetknutého nosníku) vychází z klasické mechanické metody pásků. Tato metoda umožňuje poměrně snadným způsobem zjišťovat průběhy zbytkových napětí v závislosti na hloubce pod povrchem. Zejména v tom případě, kdy je mechanické nebo chemické odstraňování povrchových vrstev materiálu nahrazeno elektrolytickým (anodovým) rozpouštěním.

Elektrolytickým rozpouštěním dochází k úběru materiálu, přičemž je registrována změna polohy konce nosníku v měřicím třmenu viz obr 5.6.



Obr. 5.6 Schéma zařízení pro měření zbytkových napětí metodou pásků: 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 čítač, 9 – nádoba s elektrolytem, 10 – kontaktní teploměr, 11 – automatické spínací relé, 12 – topné tělísko, 13 – míchadlo, 14 – katoda, 15 – variátor [11]

Vzorek je nejprve proměřen a zvážen a poté upnut do třmenů měřicího zařízení. Plochy vzorku, které nebudou elektrochemicky rozpouštěny, se pokryjí ochrannými vosky. 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.

Deformace vzorku ε 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 rozpouštěnou 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 Δz . Odebráním vrstvy Δz z vetknutého nosníku šířky b způsobí zbytkové napětí σ stejnou deformaci, jako kdyby na něj působila vnější síla F velikosti $F = \Delta z \cdot b \cdot \sigma$. Průhyb vetknutého nosníku délky l způsobený odebráním vrstvy Δz je:

$$(5.23) \quad y = \frac{1}{EI} \int_0^l M \cdot x \cdot dx,$$

kde

$$(5.24) \quad I = \frac{bh^3}{12},$$

je moment setrvačnosti průřezu.

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

$$(5.25) \quad \sigma_n = \sigma_{vn} - \sum_{i=1}^{n-1} \sigma_1 \cdot \frac{4 \cdot \Delta z_i}{h_i},$$

$$(5.26) \quad z_i = z_o - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta z_i.$$

6. UŽITNÉ VLASTNOSTI A TRIBOLOGICKÉ CHOVÁNÍ DYNAMICKY NAMÁHANÝCH STROJNÍCH SOUČÁSTÍ

Vývoj moderních vysokopevnostních materiálů, modernizace měřicích metod v oblasti materiálových věd a dlouhodobá zkušenost s provozem vyspělých technologických celků ukazují, že povrchové vrstvy významně ovlivňují jejich životnost a spolehlivost. S rostoucí intenzitou obráběcích procesů, kdy dochází ke zvyšování řezných rychlostí, roste také role teplotních polí při vzniku zbytkových napětí v povrchových vrstvách strojních součástí. V konečném důsledku jsou v mnoha případech mechanické a fyzikální charakteristiky povrchu značně odlišné od tzv. jádra. Znalost stavu povrchu se tedy jeví jako základní informace jak pro určení jeho kvality, tak pro pochopení různých procesů probíhajících v povrchové vrstvě. Nejčastěji analyzovanými parametry je povrchová drsnost a tvrdost. Kromě těchto veličin se stále častěji analyzují zbytková napětí a jejich vliv na tribologické vlastnosti, nově vzniklého funkčního povrchu, dále pak korozi, únavovou odolnost či na náchylnost k šíření trhlin [49, 56].

6.1 Tribologie

Tribologie hodnotí vlastnosti, které ovlivňují vzájemné působení povrchu, prostředí a tělesa při jejich vzájemném pohybu. Zahrnuje procesy vzájemného působení na rozhraní mezi pevnými, kapalnými a plynými tělesy. Hlavním úkolem tribologie je zajistit, aby vzájemný pohyb dvou povrchů probíhal s co nejmenší ztrátou energie a materiálů. Tribologické vlastnosti popisují především koeficient tření a opotřebení, které závisí především na typu tření a mechanismu opotřebení. [59, 60, 61]. Při zkoumání třecích projevů a účinků pohlížíme na soustavu tvořenou dvěma tělesy a jejich stykovými plochami a látkou, která je mezi stykovými plochami a blízkým okolím, jako na tribologický systém.

6.1.1 Mechanismus tření

Tření je definováno jako odpor proti vzájemnému pohybu dvou těles v oblasti jejich styku. Třecí síla F závisí na koeficientu tření μ a zátěžné síle L [59]. Popisem tření a zavedením tohoto pojmu se poprvé zabýval Coulomb (1799) a dodnes je základní vztah označován jako Coulombův zákon:

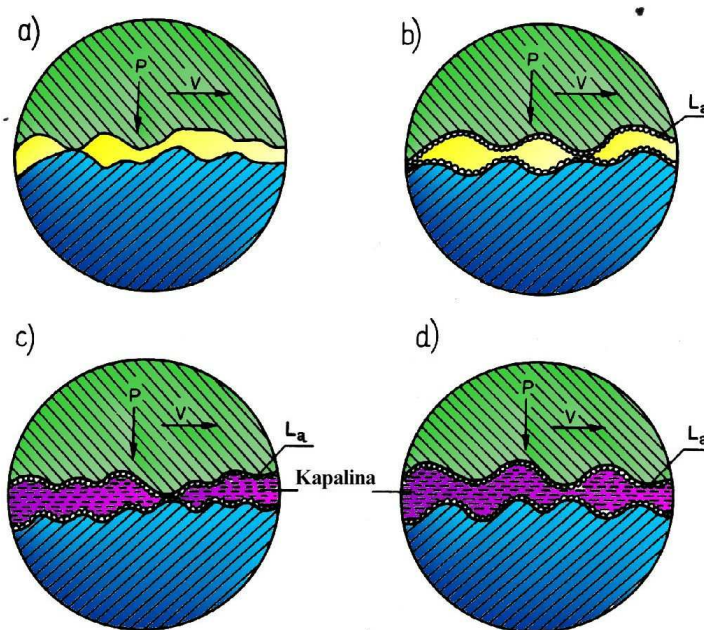
$$(6.1) \quad \mu = \frac{F_t}{F_p},$$

kde: F_t je třecí síla působící proti směru pohybu,
 F_p je přítláčná síla působící kolmo ke směru pohybu,
 μ je koeficient tření.

Z pohledu charakteristických podmínek procesu je možné tření rozdělit na vnější a vnitřní [60]:

- *Vnější tření* – tření působící na dotkových plochách látek nebo těles. Existují dva základní druhy vzájemného pohybu dvou těles – vzájemný posuvný pohyb (kluzné tření) a odvalování (valivé tření).
- *Vnitřní tření* – způsobené vzájemným vnitřním pohybem mezi stavebními částmi látek plynu, kapaliny, nebo pevné látky.

Z hlediska přítomnosti maziva lze tření rozdělit na (obr 6.1):

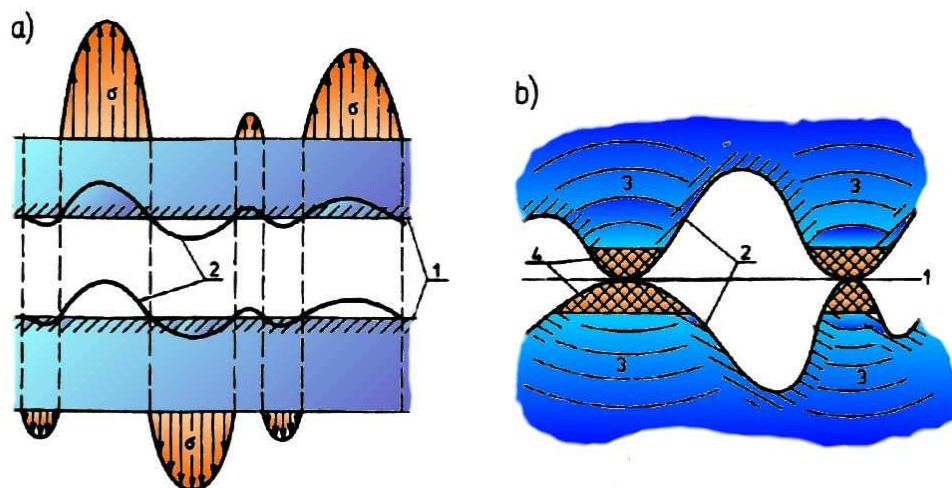


Obr. 6.1 Tření dle přítomnosti maziva, a) fyzikální suché tření b) technické suché tření c) smíšené tření d) kapalinné tření, L_a – vrstva oxidů [60]

- fyzikální suché tření* – mezi povrchy není plyn, ani kapalina a nejsou pokryty nějakou chemickou sloučeninou (tření ve vakuu),
- technické suché tření* – povrch může být pokryt vrstvou oxidů, plynů nebo par,
- smíšené tření* - dochází k občasným dotykům mikronerovností, mezi povrchy je přítomno mazivo,
- kapalinné tření* – povrchy jsou za pohybu zcela odděleny souvislou vrstvou kapalného maziva, nebo jiného kapalného média.

6.1.1.1 Kluzné tření

Kluzné tření vzniká, jestliže dvě tělesa se dostanou do vzájemného kontaktu a dochází k jejich pohybu vůči sobě. Skutečný kontakt mezi nimi se vyskytuje jen v omezeném počtu malých oblastí (obr. 6.2).



Obr. 6.2 Schematické znázornění dotyku při kluzném tření, a) kontakt tělesa s ideálně rovným povrchem – rozložení napětí, b) reálný kontakt: 1 – ideální povrch, 2 – reálný povrch, 3 – oblast elastické deformace, 4 – oblast plastické deformace [60]

Velikost plochy dotyku se zvyšuje se zvyšující se zátěží. Na vrcholcích může docházet ke vzniku spojení a vzniká tak odpor vůči vzájemnému pohybu. V odborné literatuře [60] byl odvozen vztah pro koeficient tření:

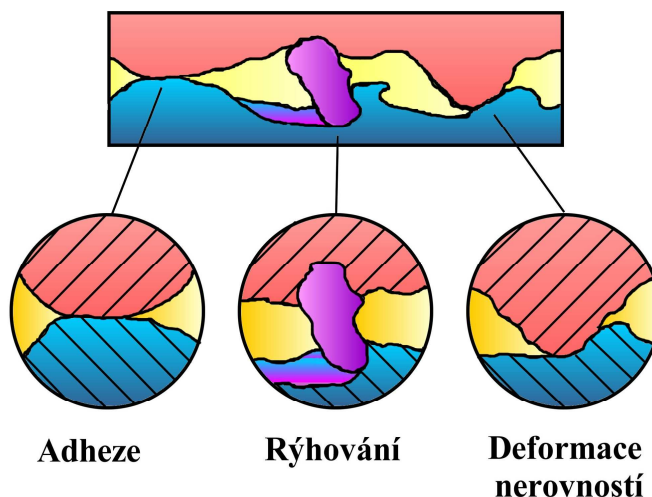
$$(6.2) \quad F_t = A_{mech} \cdot \tau_s = \frac{P}{p} \cdot \tau_s = \frac{\tau_s}{p} \cdot P = \mu \cdot F_p$$

kde: F_t je třecí síla působící proti směru pohybu,
 A_{mech} je skutečná kontaktní plocha pevného spojení,
 τ_s je pevnost materiálu ve smyku,
 F_p je zatěžovací síla,
 p je tlak způsobující plastickou deformaci,
 μ je koeficient tření.

V případě kluzného tření je možné pozorovat tři základní komponenty. Poměr jednotlivých komponent závisí na typu materiálové dvojice, podmínkách tření (vlastnostech materiálových dvojic, způsobu pohybu, drsnosti povrchu, přítomnosti lubrikantu atd.) a na časovém stádiu vzájemného pohybu [62, 63].

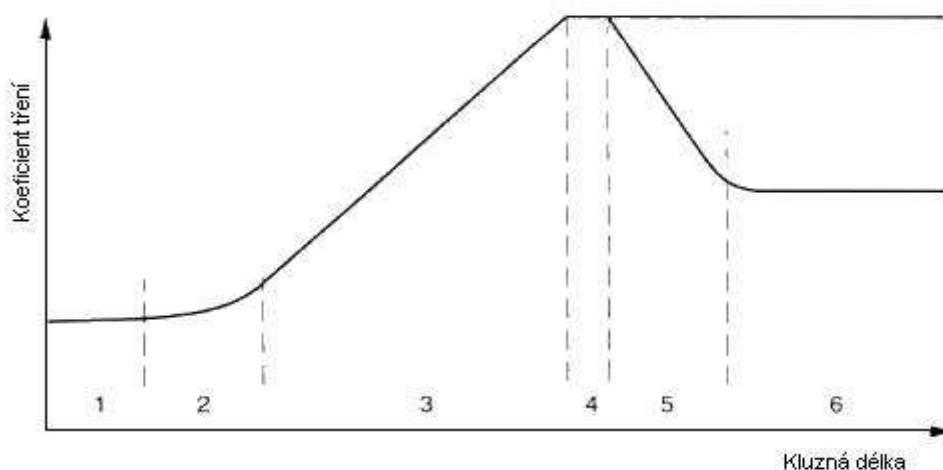
Při tření se uplatňují tyto mechanismy (obr. 6.3):

- tření vlivem adheze mezi nerovnostmi povrchu,
- tření vlivem rýhování, způsobené přítomností jemných částic vzniklých při opotřebenosti povrchu tření vlivem deformace nerovností povrchu,
- tření vlivem deformace nerovností povrchu.



Obr. 6.3 Tři komponenty kluzného tření [62, 64]

V odborné literatuře [59] (obr. 6.4) uvádí autoři šest různých stádií tření, vzájemně se lišících mechanismem tření.



Obr. 6.4 Průběh koeficientu tření [59]

První stádium (1) je charakteristické tím, že dominantní je mechanismus rýhování povrchu ostrými nerovnostmi. Také se uplatňuje mechanismus postupné deformace povrchových nerovností. Adhezní mechanismus neovlivňuje výrazně koeficient tření, protože povrch materiálu bývá kontaminován cizími částicemi, například oxidy. Koeficient tření není v této fázi závislý na podmínkách tření ani na materiálu kluzné dvojice.

Ve druhém stádiu (2) dochází vlivem rostoucích adhezních sil k mírnému nárůstu koeficientu tření a může docházet ke vzniku adhezních spojů.

Třetí stádium (3) je charakteristické tím, že dochází vlivem přibývání částic uchycených v místě styku k nárůstu koeficientu tření. Dochází také ke zvětšování aktivované plochy povrchu podléhající adheznímu tření. Při srovnatelné tvrdosti obou materiálů dosahuje mechanismus rýhování maxima.

Ve čtvrtém stádiu (4) vykazuje koeficient tření konstantní úroveň. Množství částic, deformace a míra adhezního tření jsou také konstantní.

Páté stadium (5) se objevuje v případě kluzné dvojice s velmi měkkým a velmi tvrdým povrchem. Nerovnosti měkkého povrchu jsou zaleštěny a dochází tak k poklesu koeficientu tření.

V průběhu šestého stádia (6) je dosaženo zrcadlového lesku a koeficient tření je konstantní.

6.1.1.2 Valivé tření

K valivému tření dochází v případě, je-li jedno těleso odvalováno po povrchu druhého. Oblast kontaktu je v případě ideálně tuhých těles tvořena bodem. Tato oblast se po povrchu těles pohybuje a doba kontaktu v daném místě je relativně krátká. V reálných podmínkách však v místě kontaktu dochází k deformaci těles a ke kombinaci odvalování a posuvného pohybu. V případě odvalování bývá koeficient tření v porovnání s posuvem obvykle nižší. Mechanismy vzniku tření jsou obdobné jako při posuvném pohybu, je však nutno zohlednit následující činitele [62]:

- mikroposuv v oblasti kontaktu těles,
- elastická hystereze,
- plastická deformace materiálu,
- adheze v kontaktní oblasti.

6.1.2 Opotřebení

Výsledek vzájemného působení třecích elementů je opotřebení, je to proces zničení a odstranění materiálu z povrchů obou částí třecí dvojice. Způsoby jakými dochází k úbytku materiálu jsou popsány mechanismy opotřebení. Základní příčiny opotřebení jsou pružná a plastická deformace vrcholů drsnosti povrchu a jejich zpevnění, utváření oxidační vrstvy, zatlačování částeczek povrchové vrstvy jednoho materiálu do druhé, adhezivní spojení mezi výstupky třecích elementů. V praxi je opotřebení výsledkem několika působících faktorů, z nichž jeden je dominantní a ten převážně rozhoduje o velikosti opotřebení. Nejčastějším mechanismem je abrazivní opotřebení, na které připadá 80-90% všech tribologických opotřebezení.

Literatura [60, 61] uvádí pět typů porušování materiálu podle stupně deformace v okolí dotyku nerovností:

- Elastická deformace mikronerovností nastává v případě, že napětí ve stykové oblasti nepřekročí mez pružnosti. Charakter deformace je závislý na hloubce vtlačení mikronerovnosti do druhého tělesa. Opotřebení se projevuje jako únavové porušování povrchových vrstev,
- Plastická deformace nastává, když dojde k překročení meze pružnosti v místě styku. Tento proces probíhá až do vyčerpání deformačních schopností. Opotřebení je v tomto případě vyvoláno nízkocyklovou únavou povrchových vrstev v oblasti styku.
- Rýhování se uplatňuje, není-li povrch schopen další plastické deformace. Opotřebení je výsledkem rýhování a odřezávání částí materiálu.
- Adhezivní spojení probíhá, když v místě dotyku působí meziatomové síly, které se snaží spojit oba povrchy v jeden celek. Jestliže je pevnost vytvořeného spoje menší než pevnost základních materiálů, pak dochází ke střížnému porušení ve spoji.

- Adhezní spojení, které dosahuje větší pevnosti než základní materiál, způsobí vytržení částice. Při tomto mechanismu dochází k intenzivnímu porušování materiálu a tvorbě volných částic.

Opotřebení způsobují nejčastěji mechanické vlivy, ale ve skutečnosti se vyskytují v kombinaci s ostatními vlivy, např. chemickými, příp. elektrochemickými. Podle vnějších změn a podmínek vzniku můžeme opotřebení rozdělit na [60, 61, 62, 64]:

- Adhezivní opotřebení vzniká v případě vysokých kontaktních tlaků a při malých rychlostech. Vyskytuje se převážně na vrcholcích profilu drsnosti. Mezi dotykovými plochami dochází ke vzniku lokálních adhezních spojů. K porušení vzniklých mikrospojů může dojít na původní ploše spojení, nebo může docházet k vytržení částice. Tyto mechanismy se uplatňují v závislosti na pevnosti vytvořeného spoje a pevnosti materiálu. Tento mechanismus se uplatňuje především v povrchových oxidických vrstvách.
- Abrazivní opotřebení je charakterizováno kontaktem dvou povrchů, z nichž jeden je výrazně tvrdší než druhý. V závislosti na geometrii povrchu dochází při vzájemném pohybu k rýhování nebo „odřezávání“ měkčího povrchu. Toto může nastat i vlivem přítomnosti cizích tvrdých částic, které se pohybují mezi dvěma povrchy. Rozsah poškození funkčního povrchu součásti závisí především na zatížení, délce kluzné dráhy a tvrdosti. Značný vliv na opotřebení má i množství, velikost, tvar a drsnost těchto částí.
- Erozivní opotřebení je způsobené dopadem pevných nebo kapalných částic, které mají vysokou kinetickou energii. Při nárazu se kinetická energie změní v deformační práci a na povrchu tak vzniká stopa po dopadu. Proces erozivního opotřebení je ovlivňován zejména [61]:
 - podmínkami nárazu (úhel a rychlost dopadu částice),
 - vlastnostmi média (velikost, tvar a druh částic, rozložení v médiu, teplota),
 - vlastnostmi materiálu, který je poškozován (modul pružnosti, tvrdost).

Podle typu dopadajících částic můžeme erozivní opotřebení dělit na [59]:

- opotřebení proudem pevných částic,
- opotřebení proudem kapalných částic,
- opotřebení proudem kapaliny obsahující pevné částice.
- Kavitační opotřebení lze označit za zvláštní případ erozivního, které vzniká interakcí povrchu s plynem obsaženým v proudící kapalině. Vzniká v místech kde náhle klesne tlak kapaliny pod tlak syté páry a opět stoupne na tlak syté páry. Dosud neexistuje všeobecně přijatá teorie o mechanismu kavitačního opotřebení materiálu. Předpokládá se, že opotřebení je ve své podstatě způsobeno mechanickým jevem. Vznik mechanických sil objasňují dva modely [61]:
 - sférické rázové vlny od místa zániku bubliny k povrchu (Rayleigh),
 - bezprostřední náraz paprsků kapaliny (Kornfeld, Suvorov).
- Únavové opotřebení vzniká v případě, že je povrch střídavě zatěžován a odlehčován. Mechanismus spočívá v sečtení zbytkových a vnějších napětí, v místech koncentrátorů napětí dochází ke vzniku mikrotrhlin a jejich následnému růstu až po uvolnění částice. Typickým příkladem únavového porušení je poškození valivých ložisek. Tento jev je označován jako kontaktní únava. Nepříznivě na únavu v oceli působí vliv oxidických vměstků.
- Vibrační opotřebení vzniká vlivem vzájemného kmitavého pohybu o různé frekvenci a amplitudě za současného působení zatížení. Tělesa mohou být v bodovém, plošném nebo čárovém styku. Vibrační opotřebení bývá označováno jako třecí únava nebo třecí koroze. Hlavním znakem je kombinace adheze, abraze a oxidace.

7. PROVEDENÉ EXPERIMENTY

V této kapitole jsou uvedeny experimenty, jejichž společným cílem bylo vyhodnocení obrobených povrchů z hlediska výsledného stavu zbytkové napjatosti. Ve všech případech se jednalo o ocelové vzorky, které byly opracovány zvoleným druhem technologie (tj. frézováním, broušením a zaškrabáváním) s odlišnými obráběcími parametry. Význam experimentů spočívá zejména v porovnání vlivů vybraných parametrů opracování na stav povrchové zbytkové napjatosti i na distribuci zbytkových napětí do hloubky.

7.1 Rentgenografická tenzometrická analýza povrchu a porovnání experimentálních metod studia gradientů zbytkových napětí při diagnostice tvarových vodících lišt

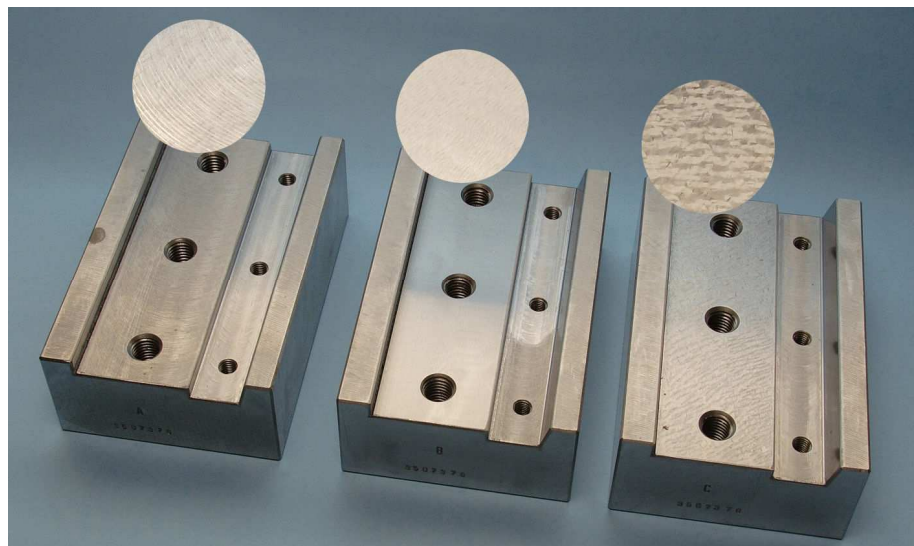
Cílem tohoto experimentu, který vznikl ve spolupráci s Výzkumným centrem Nové technologie na ZČU v Plzni a laboratoří Katedry obrábění na Fakultě strojní ČVUT v Praze, bylo:

1) Zmapování obrobených povrchů tvarových vodících lišt pomocí rentgenografické difrakční metody *jedné expozice bez referenční látky* za účelem zjištění nehomogenit v povrchové distribuci zbytkových napětí (důsledek nestability řezného procesu a nevhodných řezných podmínek).

2) Aplikace a zhodnocení tří odlišných metod studia gradientů zbytkových napětí (rentgenografická tenzometrická *metoda "sin²ψ"*, odvrtávací metoda a metoda postupného elektrolytického rozpouštění povrchových vrstev), které jsou nejlépe aplikovatelné při optimalizaci technologií obrábění v průmyslové praxi.

7.1.1 Zkoumané vzorky a použitá technologie

Pro porovnání a zhodnocení experimentálních metod studia zbytkových napětí byly připraveny tři typy (*A*, *B*, *C*) vzorků tvarových vodících lišt (obr. 7.1). Výchozím materiálem byla ocel 11 375.0 (max 0,17 % C, max 0,045 % P, max 0,045 % S, max 0,009 % Ni) v původním stavu bez tepelného zpracování. Polotovary pro výrobu zkušebních těles byly zhotoveny z plechu o tloušťce 60 mm na souřadnicovém stroji acetylenovým hořákem. Po následném mechanickém obrobení na požadované rozměry byly připraveny zkoumané povrchy frézováním (*A*), broušením (*B*) a zaškrabáváním (*C*).



Obr. 7.1 Zkoumané vzorky A – frézovaný, B – broušený, C – zaškrabávaný

7.1.2 Použité analytické metody

1) Pro zmapování nehomogenit obrobené plochy

Metoda jedné expozice bez referenční látky

Hlavní parametry použité metody: úhel dopadu záření $CrK\alpha$ na analyzovaný povrch $\psi_0 = 45^\circ$, vzdálenost plošného detektoru od povrchu vzorku $D = 46$ mm, průměr cylindrického kolimátoru 1,7 mm, plocha ozářeného povrchu byla v případě měření statického vzorku cca $2,5 \text{ mm}^2$, symbol analyzované difrakční linie $\{211\}$. Chyba měření napětí nepřesahuje ± 40 MPa.

2) Pro studium gradientů zbytkových napětí

Rentgenografická tenzometrická metoda “ $\sin^2\psi$ ”

Měření bylo prováděno na ω -goniometru X'Pert PRO firmy PANalytical se zářením rentgenky s chromovou anodou. Byla analyzována difrakční linie $\{211\}$ α -Fe. Hodnoty mřížkových deformací byly interpretovány napětím za předpokladu dvojosého stavu zbytkové napjatosti z experimentálně stanovených závislostí difrakčního úhlu $2\theta(\sin^2\psi)$, kde ψ je úhel mezi povrchem vzorku a difraktujícími atomovými mřížkovými rovinami. Závislosti $2\theta^{211}(\sin^2\psi)$ byly měřeny ve dvou azimutech σ_T a σ_L . Experimentální chybu jednotlivých naměřených hodnot představuje směrodatná odchylka výpočtu zbytkových napětí metodou “ $\sin^2\psi$ ” [65].

Efektivní hloubka vnikání použitého rtg záření u kovů a slitin na bázi železa je pouze cca $5 - 10 \mu\text{m}$. Proto pro stanovení hloubkových profilů makroskopických zbytkových napětí bylo zvoleno destruktivní odebrání povrchových vrstev materiálu pomocí elektrolytického leštění, toto odlešťování bylo realizováno na leštičce zn. LectroPol-5 od firmy Struers elektrolytem A2 dodávaným výrobcem přístroje, chladicí systém udržoval teplotu elektrolytu v intervalu $15 - 25^\circ\text{C}$.

Odvrtávací metoda

Zbytková napětí byla měřena pomocí vysokorychlostního odvrtávacího zařízení pro měření zbytkových napětí *HBM SINT MTS 3000*. Zařízení umožňuje přesné odvrtání otvoru pomocí čelní válčové frézy poháněné vysokorychlostní vzduchovou turbínkou (až 300 000 ot./min). Poloha otvoru byla stanovena pomocí vestavěného mikroskopu s přesností na 0,01 mm, hloubka otvoru byla řízena krokovým motorem s přesností na jednotky μm .

Vrtání bylo prováděno postupně po krocích cca 20 μm , mezi jednotlivými kroky byla dostatečná prodleva tak, aby měření uvolněných deformací nebylo ovlivněno tepelnou chybou. Pro odvrtávání vzorků byly použity frézy *SINTCTT*. Měřené uvolněné deformace jsou aproximovány polynomem 4. - 5. stupně pro vyhlazení dat, vlastní vyhodnocení je provedeno pomocí numericky získaných kalibračních koeficientů integrální metodou.

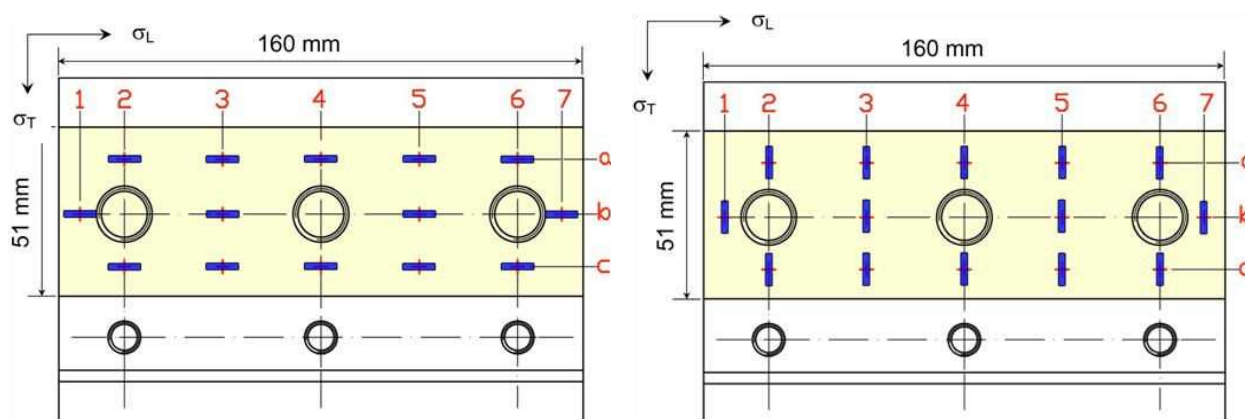
Pro měření uvolněných deformací byly použity 45° tenzometrické růžice se třemi elementy *HBM 1,5/120RY61S* - citlivost 1,95, velikost středního poloměru 2,55 mm, délka měřicího elementu 1,5 mm a nominální odpor elementu 120 Ω .

Metoda postupného elektrolytického rozpouštění povrchových vrstev

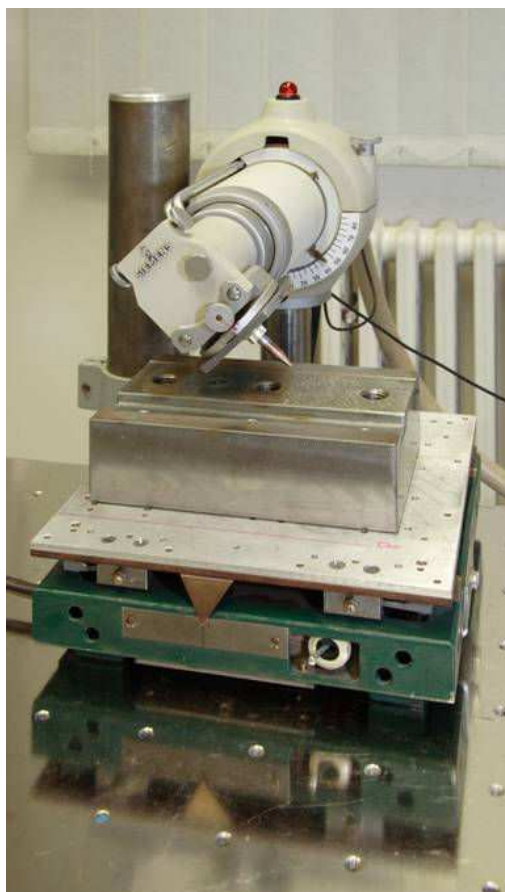
Měření deformací pro výpočet zbytkových napětí bylo realizováno na experimentálním zařízení sestaveném na ČVUT FSI. Byl použit elektrolyt $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HCl}$, proudová hustota byla 0,790-1,590 $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ při vzdálenosti 2 cm mezi katodou a anodou (vzorkem).

7.1.3 Metodika měření rozložení zbytkových napětí na obrobených plochách za užití rentgenografické tenzometrické metody jedné expozice

Na zkoumaném povrchu o velikosti 160 × 51 mm byla zvolena síť 14 měřených bodů (obr. 7.2). Difrakční měření byla prováděna s translací vzorku ± 5 mm (viz obr. 7.3) a to vždy v měřeném směru kolem zkoumaného místa, čímž byla plocha ozářeného povrchu cca 24 mm^2 . Dosažené zvýšení měřené oblasti vzorku vede k eliminaci vlivu úzce lokálních nehomogenit zbytkových napětí.



Obr. 7.2 Schématické znázornění měření s translací ± 5 mm ve směru σ_L [MPa] a ve směru σ_T [MPa] kolem měřeného místa



Obr. 7.3 Vzorek C - zaškrabávaný umístěný na stolku umožňujícím translační pohyb ± 5 mm kolem měřeného místa

7.1.4 Výsledky experimentálního výzkumu studia homogenity povrchu

Metodou *jedné expozice bez referenční látky*, popsanou v kapitole 7.1.2, byly u frézovaného vzorku (A) změřeny hodnoty zbytkových napětí s translací vzorku ± 5 mm ve zvolených bodech podle obrázku 7.2. V tabulce 7.1 jsou zobrazeny hodnoty zbytkových napětí ve směru posuvu nástroje σ_L [MPa] a v tabulce 7.2 ve směru kolmém na posuv nástroje σ_T [MPa].

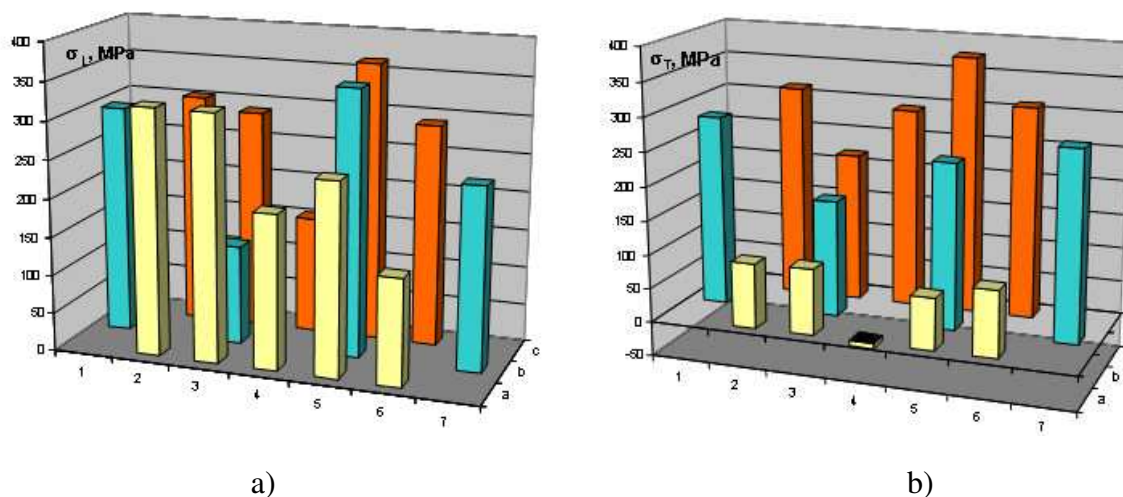
Tab. 7.1 Hodnoty vypočtených zbytkových napětí σ_L [MPa] u vzorku A obrobeného frézováním (viz obr. 7.2)

σ_L [MPa] ve směru posuvu nástroje							
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
<i>a</i>		322	322	202	251	139	
<i>b</i>	299		130		348		239
<i>c</i>		303	288	153	364	290	

Tab. 7.2 Hodnoty vypočtených zbytkových napětí σ_T [MPa] u vzorku A obrobeného frézováním (viz obr. 7.2)

σ_T [MPa] ve směru kolmém na posuv nástroje							
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
<i>a</i>		95	97	-8	76	97	
<i>b</i>	281		171		243		279
<i>c</i>		313	218	292	375	310	

Na obrázku 7.4a je vidět rozložení zbytkových napětí ve směru posuvu nástroje σ_L [MPa] a 7.4b ve směru kolmém na posuv nástroje σ_T [MPa].

Obr. 7.4 Výsledky mapování povrchového zbytkového napětí a) σ_L [MPa] ve směru posuvu nástroje a b) σ_T [MPa] ve směru kolmém na posuv nástroje u vzorku A obrobeného frézováním

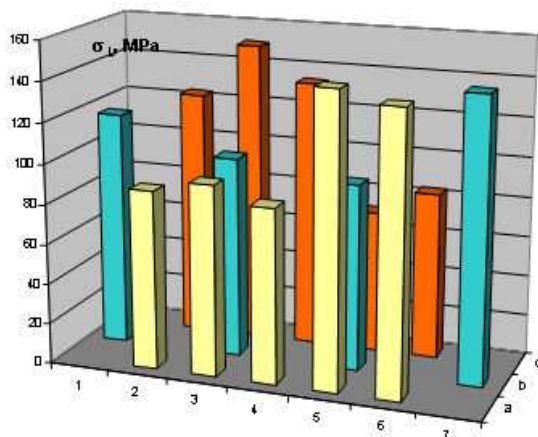
Stejným způsobem (*metodou jedné expozice bez referenční látky*) byly u vzorku obrobeného broušením (B) změřeny hodnoty zbytkových napětí s translací vzorku ± 5 mm ve zvolených bodech podle obrázku 7.2. V tabulce 7.3 a na obrázku 7.5a jsou zobrazeny hodnoty zbytkových napětí ve směru posuvu nástroje σ_L [MPa] a v tabulce 7.4 a na obrázku 7.5b ve směru kolmém na posuv nástroje σ_T [MPa].

Tab. 7.3 Hodnoty vypočtených zbytkových napětí σ_L [MPa] u vzorku B obrobeného broušením (viz obr. 7.2)

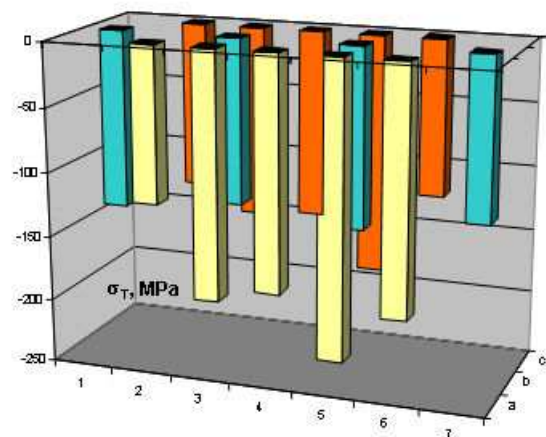
σ_L [MPa] ve směru posuvu nástroje							
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
<i>a</i>		89	95	87	145	139	
<i>b</i>	117		100		93		141
<i>c</i>		123	150	133	71	83	

Tab. 7.4 Hodnoty vypočtených zbytkových napětí σ_T [MPa] u vzorku *B* obrobeného broušením (viz obr. 7.2)

σ_T [MPa] ve směru kolmém na posuv nástroje							
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
<i>a</i>		-121	-192	-181	-228	-190	
<i>b</i>	-139		-129		-140		-126
<i>c</i>		-129	-149	-145	-185	-122	



a)



b)

Obr. 7.5 Výsledky mapování povrchového zbytkového napětí a) σ_L [MPa] ve směru posuvu nástroje a b) σ_T [MPa] ve směru kolmém na posuv nástroje u vzorku *B* obrobeného broušením

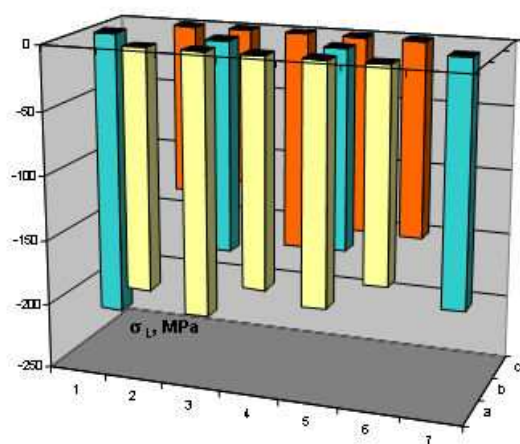
U vzorku obrobeného zaškrabáváním rozložení zbytkových napětí na povrchu (*metodou jedné expozice bez referenční látky*) s translací vzorku ± 5 mm ve zvolených bodech podle obrázku 7.2. V tabulce 7.5 a na obrázku 7.6a jsou uvedena zbytková napětí ve směru posuvu nástroje σ_L [MPa] a v tabulce 7.6 a na obrázku 7.6b napětí ve směru kolmém na posuv nástroje σ_T [MPa].

Tab. 7.5 Hodnoty vypočtených zbytkových napětí σ_L [MPa] u vzorku *C* obrobeného zaškrabáváním (viz obr. 7.2)

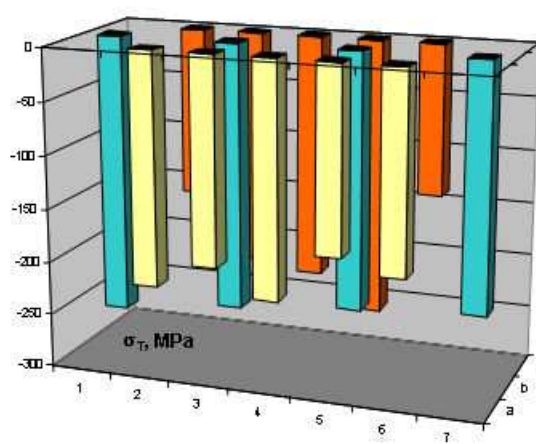
σ_L [MPa] ve směru posuvu nástroje							
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
<i>a</i>		-184	-199	-173	-182	-160	
<i>b</i>	-221		-162		-152		-188
<i>c</i>		-131	-120	-168	-150	-151	

Tab. 7.6 Hodnoty vypočtených zbytkových napětí σ_T [MPa] u vzorku C obrobeného zaškrabáváním (viz obr. 7.2)

σ_T [MPa] ve směru kolmém na posuv nástroje							
	1	2	3	4	5	6	7
a		-218	-194	-219	-173	-185	
b	-264		-250		-239		-231
c		-158	-219	-227	-258	-141	



a)



b)

Obr. 7.6 Výsledky mapování povrchového zbytkového napětí a) σ_L [MPa] ve směru posuvu nástroje a b) σ_T [MPa] ve směru kolmém na posuv nástroje u vzorku C obrobeného zaškrabáváním

7.1.5 Diskuse výsledků experimentálního výzkumu studia homogenity povrchu

Jednotlivé zkoumané povrchy se charakterem zbytkových makroskopických napětí kvalitativně liší:

V případě frézovaného vzorku A jsou jak napětí σ_L [MPa] ve směru opracování (obr. 7.4a), tak napětí σ_T [MPa] ve směru k němu kolmém tahová (obr. 7.4b).

Broušený povrch B vykazuje ve směru opracování σ_L [MPa] napětí tahová (obr. 7.5a), ve směru kolmém σ_T [MPa] tlaková (obr. 7.5b).

Zbytková napětí v povrchových vrstvách zaškrabávaného vzorku C jsou v obou sledovaných směrech σ_L a σ_T [MPa] tlaková (viz obr. 7.6a a 7.6b).

Na základě proměřování zvolené sítě míst lze soudit, že pole povrchových zbytkových napětí je u všech vzorků nehomogenní. Míru homogenity zkoumaných povrchů z hlediska

velikosti zbytkových napětí je třeba posuzovat s ohledem na nepřesnost měření, která nepřesahuje ± 40 MPa.

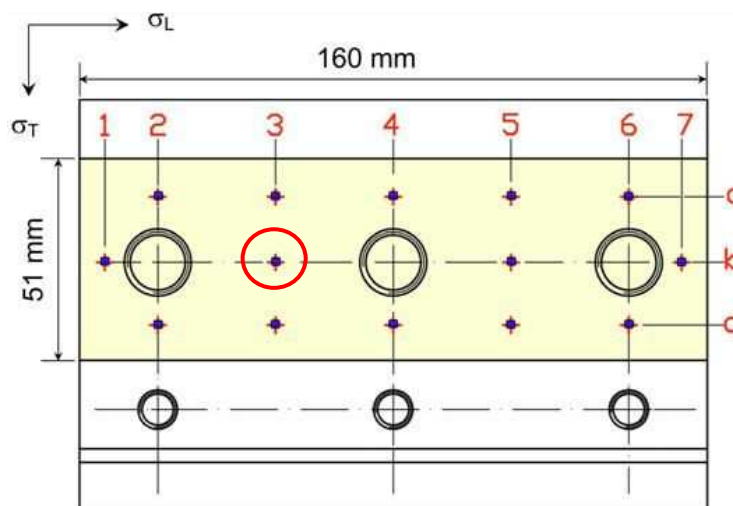
Z rozdílů mezi maximem a minimem povrchových napětí plynou následující závěry:

- Jako nejméně homogenní se jeví *frézovaný povrch A*, rozdíly mezi maximálními a minimálními hodnotami napětí dosahují u σ_L cca 200 MPa, u σ_T cca 300 MPa (obr. 7.4a a 7.4b).
- Nehomogenita zbytkových napětí naměřených na *broušeném (B) povrchu* (viz obr. 7.5a a 7.5b) a *zaškrabávaném (C) povrchu* (viz obr. 7.6a a 7.6b) má obdobný charakter a je nižší než u vzorku A.

7.1.6 Metodika měření hloubkové distribuce zbytkových napětí

Pro porovnání a zhodnocení experimentálních metod studia zbytkových napětí byla vždy vybrána pro každou metodu jedna oblast z analyzované plochy (viz obr. 7.7). Pro stanovení hloubkových profilů makroskopických zbytkových napětí byla použita metoda *postupného elektrolytického rozpouštění povrchových vrstev*, *odvrtávací metoda* a také rentgenografická tenzometrická metoda „ $\sin^2\psi$ “, která byla doplněna o destruktivní odebrání povrchových vrstev materiálu pomocí *elektrolytického leštění*.

Odlešťování bylo realizováno na leštičce zn. *LectroPol – 5* firmy *Struers* elektrolytem A2 dodávaným výrobcem přístroje. Výkon pumpy čerpající elektrolyt byl nastaven na stupni 19, chladič systém udržoval teplotu elektrolytu v intervalu 15 – 25°C.



Obr. 7.7 Schématické znázornění vybrané oblasti z analyzované plochy za použití rentgenografickou tenzometrickou metodou „ $\sin^2\psi$ “

7.1.7 Výsledky experimentálního výzkumu gradientů zbytkových napětí

Mechanickou metodou *postupného elektrolytického rozpouštění* povrchových vrstev byla zjišťována zbytková napjatost pouze ve směru posuvu obráběcího nástroje σ_L [MPa].

Stav zbytkové napjatosti zjišťovaný pomocí rentgenografické *metody "sin² ψ "* a mechanické *odvrtávací metody* byl zjišťován jak ve směru posuvu obráběcího nástroje σ_L [MPa], tak ve směru kolmém σ_T [MPa].

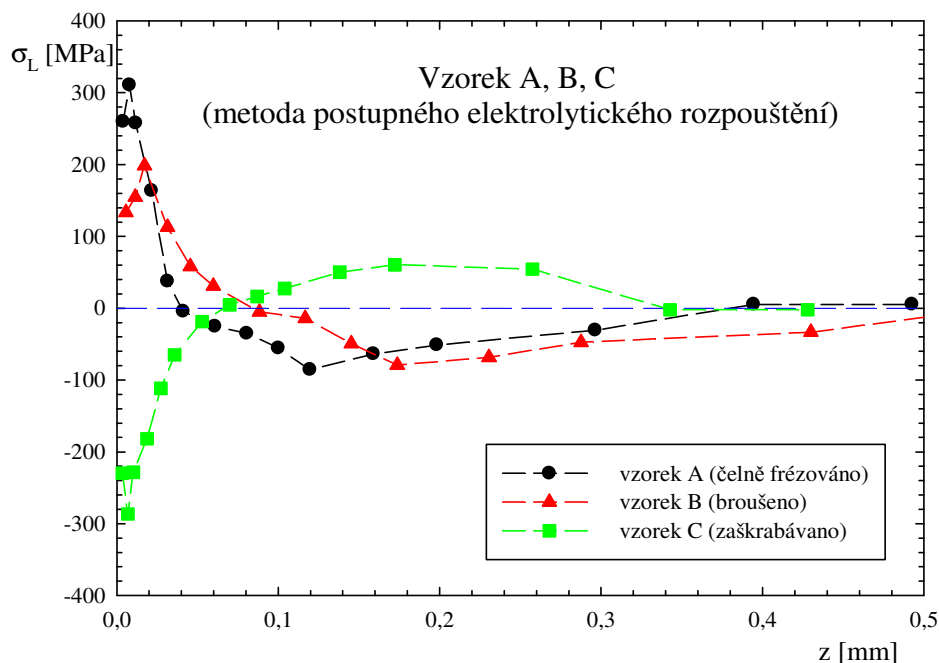
Výsledky získané metodou postupného elektrolytického rozpouštění povrchových vrstev jsou uvedeny v tabulce 7.7 a na obrázku 7.8.

Tab. 7.7 Hodnoty naměřených zbytkových napětí σ_L [MPa]

Vzorek A čelní frézování		Vzorek B broušení		Vzorek C zaškrabávání	
hloubka z [mm]	σ_L [MPa]	hloubka z [mm]	σ_L [MPa]	hloubka z [mm]	σ_L [MPa]
0,004	260	0,006	133	0,003	-230
0,008	311	0,011	155	0,007	-287
0,012	258	0,017	199	0,010	-228
0,022	163	0,031	113	0,019	-182
0,031	37	0,046	58	0,027	-112
0,041	-4	0,060	31	0,036	-65
0,061	-25	0,088	-5	0,053	-19
0,080	-35	0,117	-14	0,070	5
0,100	-56	0,145	-49	0,087	16
0,120	-86	0,174	-79	0,104	28
0,159	-64	0,231	-69	0,138	50
0,198	-51	0,288	-47	0,172	60
0,296	-31	0,430	-33	0,257	54
0,395	5	0,572	9	0,343	-2
0,493	5	0,715	9	0,428	-2

Z následujícího obrázku 7.8, na němž jsou vyneseny gradienty zbytkových napětí získané metodou *postupného elektrolytického rozpouštění* je ve všech případech v podpovrchové oblasti 5 – 10 μm patrná náhlá až skoková změna v hloubkovém průběhu distribuce zbytkových napětí.

Tato změna je pravděpodobně způsobena tzv. překmitem vzorku z předem nastavené nulové polohy snímače deformací při startu reakce elektrochemického rozpouštění. Tento efekt nebyl pomocí rtg difrakční tenzometrické analýzy pozorován (viz obr 7.9, 7.10 a 7.11). Z tohoto důvodu nelze usuzovat na lokální překonání meze pevnosti spojené poklesem hodnot zbytkových napětí v povrchové vrstvě (5 – 10 μm) způsobené relaxací.



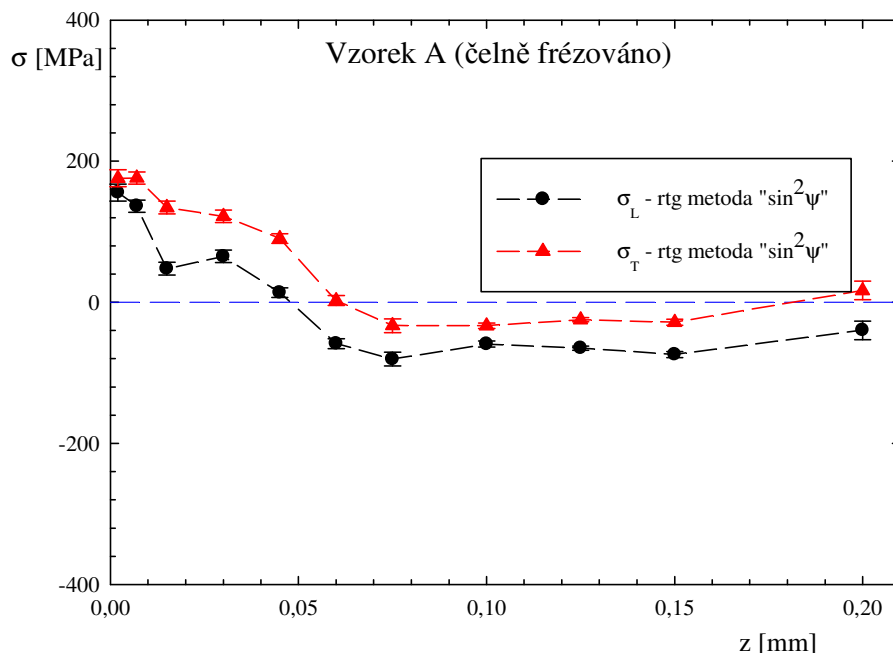
Obr. 7.8 Makroskopická zbytková napětí σ_L [MPa] stanovená pomocí mechanické metody postupného elektrolytického rozpouštění povrchových vrstev. Vzorek: A – čelní frézování, B – broušení a C – zaškrabávání

Výsledky z rentgenografické metody “ $\sin^2\psi$ ” jsou uvedeny v tabulkách 7.8 až 7.10 a na obrázcích 7.9, 7.10 a 7.11.

Tab. 7.8 Hodnoty vypočtených zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa]

Frézovaný povrch - Vzorek A				
hloubka z, [mm]	σ_L [MPa]	střední kvadratická odchylka [MPa]	σ_T [MPa]	střední kvadratická odchylka [MPa]
0,002	155,5	12,2	175,9	12,2
0,007	136,3	8,7	176,3	8,7
0,015	47,6	9,0	134,3	9,0
0,030	65,1	8,9	122,0	8,9
0,045	13,8	6,8	90,6	6,8
0,060	-58,5	7,1	2,5	7,1
0,075	-80,5	9,8	-33,0	9,8
0,100	-59,1	4,4	-33,3	4,0
0,125	-64,9	3,0	-24,6	3,0
0,150	-73,9	4,4	-28,3	4,4
0,200	-39,6	13,2	16,8	13,2

Z následujícího obrázku 7.9 na němž jsou vykresleny průběhy zbytkových napětí jak ve směru σ_L [MPa] tak i ve směru σ_T [MPa] lze konstatovat fakt, že technologické opracování čelním frézováním v tomto případě generuje biaxiální izotropní stav zbytkové napjatosti tj. $\sigma_L \approx \sigma_T$. Podpovrchová oblast je ovlivněna tahovým zbytkovým napětím, které v tomto případě zasahuje do hloubky cca 70 μm a je ze všech tří případů obrábění v této kapitole největší.

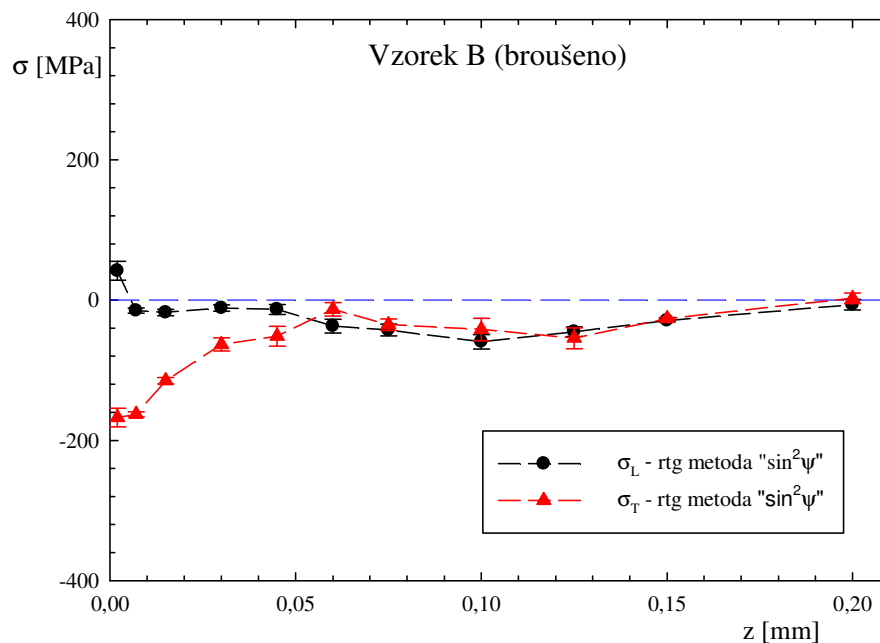


Obr. 7.9 Makroskopická zbytková napětí σ_T a σ_L [MPa] stanovená rentgenograficky za užití metody „ $\sin^2\psi$ “ na fázi α -Fe. Vzorek A obroben technologií čelní frézování

Tab. 7.9 Hodnoty vypočtených zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa]

Broušený povrch - Vzorek B				
hloubka z , [mm]	σ_L [MPa]	střední kvadratická odchylka [MPa]	σ_T [MPa]	střední kvadratická odchylka [MPa]
0,002	41,8	13,3	-167,4	13,3
0,007	-15,0	3,8	-162,9	3,8
0,015	-17,7	4,6	-115,0	4,6
0,030	-11,4	4,7	-63,2	9,3
0,045	-13,3	7,2	-51,5	14,1
0,060	-37,1	9,7	-13,2	9,7
0,075	-42,7	8,3	-34,9	8,3
0,100	-59,4	10,3	-41,8	16,0
0,125	-45,1	7,0	-54,3	14,8
0,150	-29,2	1,9	-26,4	1,9
0,200	-6,5	7,5	2,6	7,5

Z následujícího obrázku 7.10 na němž jsou vykresleny průběhy zbytkových napětí, jak ve směru σ_L [MPa] tak i ve směru σ_T [MPa]. Lze konstatovat fakt, že technologie broušení generuje anizotropní stav zbytkové napjatosti tj. $\sigma_L \neq \sigma_T$. Tento efekt je pozorován pouze v tomto případě na rozdíl od vzorků obrobených frézováním a zaškrabáváním. Ve směru rotace broušícího kotouče povrchová oblast vykazuje mírné tahové zbytkové napětí. Naopak ve směru kolmém lze pozorovat tlaková zbytková napětí, které dosahují na povrch hodnotu téměř -180 MPa. Ovlivněná oblast v tomto případě zasahuje do hloubky cca $50 \mu\text{m}$.

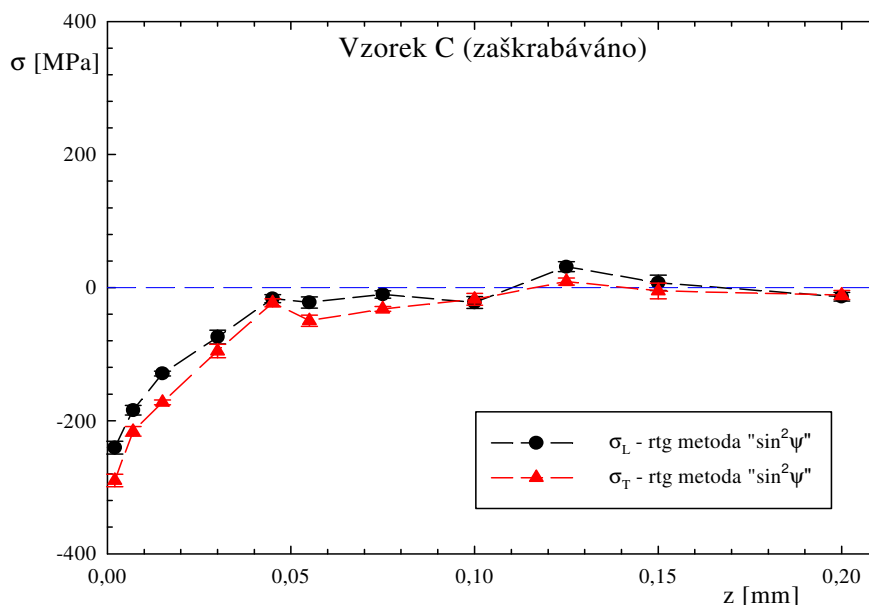


Obr. 7.10 Makroskopická zbytková napětí σ_T a σ_L [MPa] stanovená rentgenograficky za užití metody „ $\sin^2 \psi$ “ na fázi α -Fe. Vzorek B obroben technologií broušení

Tab. 7.10 Hodnoty vypočtených zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa]

Zaškrabávaný povrch - Vzorek C				
hloubka z, [mm]	σ_L [MPa]	střední kvadratická odchylka [MPa]	σ_T [MPa]	střední kvadratická odchylka [MPa]
0,002	-240,6	9,5	-289,9	9,5
0,007	-184,2	7,3	-216,1	7,3
0,015	-129,1	3,6	-172,3	3,6
0,030	-74,2	10,3	-95,2	10,3
0,045	-16,5	6,1	-22,7	6,1
0,060	-22,1	8,3	-49,7	8,3
0,075	-10,1	5,6	-32,0	3,6
0,100	-22,4	8,8	-17,7	8,8
0,125	31,4	7,4	9,3	5,4
0,150	7,3	11,7	-5,0	11,7
0,200	-13,7	6,6	-11,0	6,6

Z následujícího obrázku 7.11 na němž jsou vykresleny průběhy zbytkových napětí zaškrabávaného vzorku, jak ve směru σ_L [MPa] tak i ve směru σ_T [MPa]. Lze konstatovat fakt, že technologie zaškrabávání generuje izotropní tlaková zbytková napětí tj. $\sigma_L \approx \sigma_T$. Ovlivněná podpovrchová oblast v tomto případě činní také cca 50 μm .

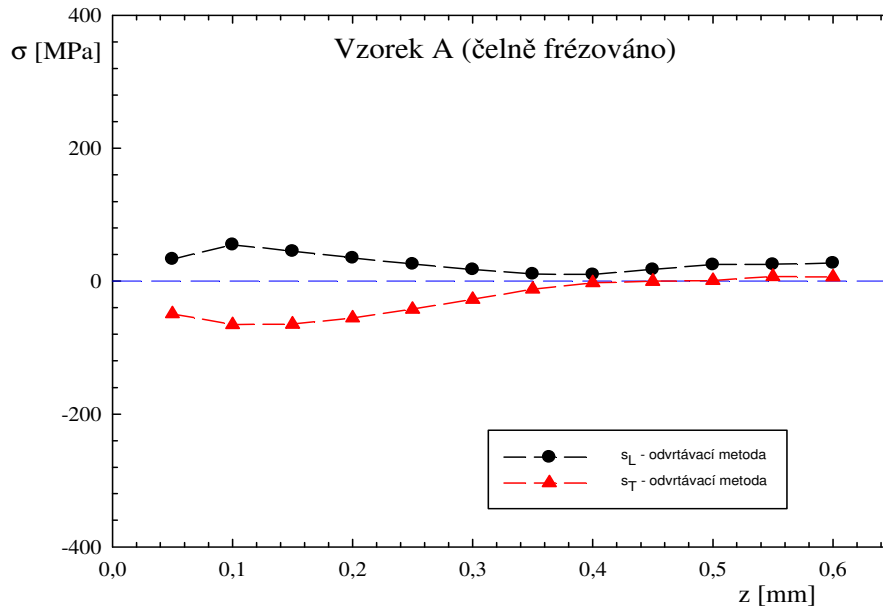


Obr. 7.11 Makroskopická zbytková napětí σ_T a σ_L [MPa] stanovená rentgenograficky za užití metody „ $\sin^2 \psi$ “ na fázi α -Fe. Vzorek C obroběn technologií zaškrabávání

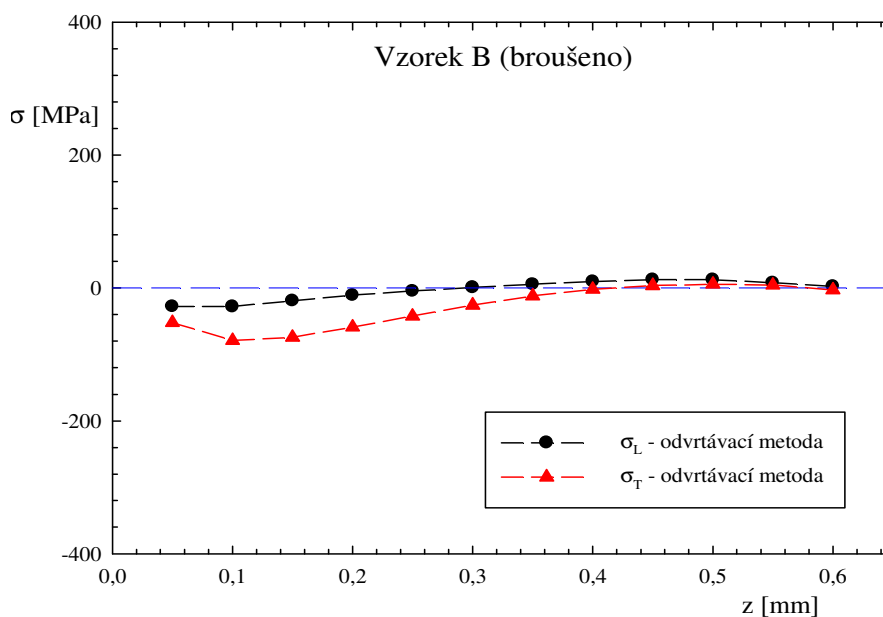
V následující tabulce 7.11 a na obrázcích 7.12, 7.13 a 7.14 lze nalézt výsledky získané odvrtávací metodou u frézovaného (A), broušeného (B) a zaškrabávaného (C) vzorku.

Tab. 7.11 Hodnoty vypočtených zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa]

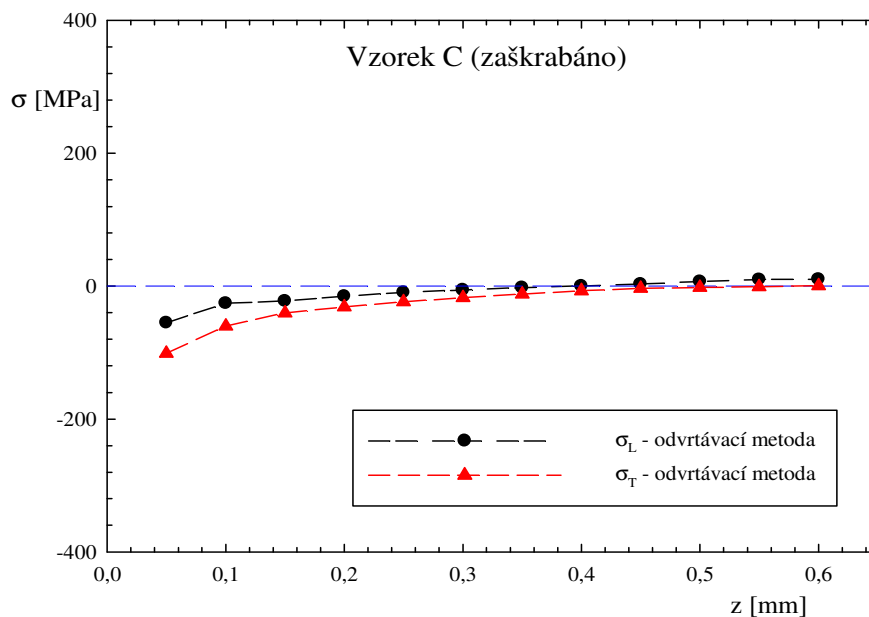
hloubka, z [mm]	Vzorek A čelní frézování		Vzorek B broušení		Vzorek C zaškrabávání	
	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]
0,05	33	-49	-28	-52	-55	-101
0,10	55	-65	-28	-79	-26	-60
0,15	45	-65	-19	-74	-22	-40
0,20	35	-55	-11	-59	-15	-31
0,25	26	-42	-4	-42	-10	-24
0,30	17	-27	1	-26	-6	-17
0,35	11	-12	6	-12	-2	-12
0,40	10	-2	10	-2	0	-7
0,45	18	0	13	4	3	-3
0,50	25	1	12	6	7	-2
0,55	25	7	8	5	10	-1
0,60	27	6	2	-3	10	0



Obr. 7.12 Makroskopická zbytková napětí σ_L a σ_T [MPa] stanovená pomocí *odvrtávací metody* (vyhodnocení provedeno za užití *Integrální metody*). Vzorek A obroběn technologií čelní frézování

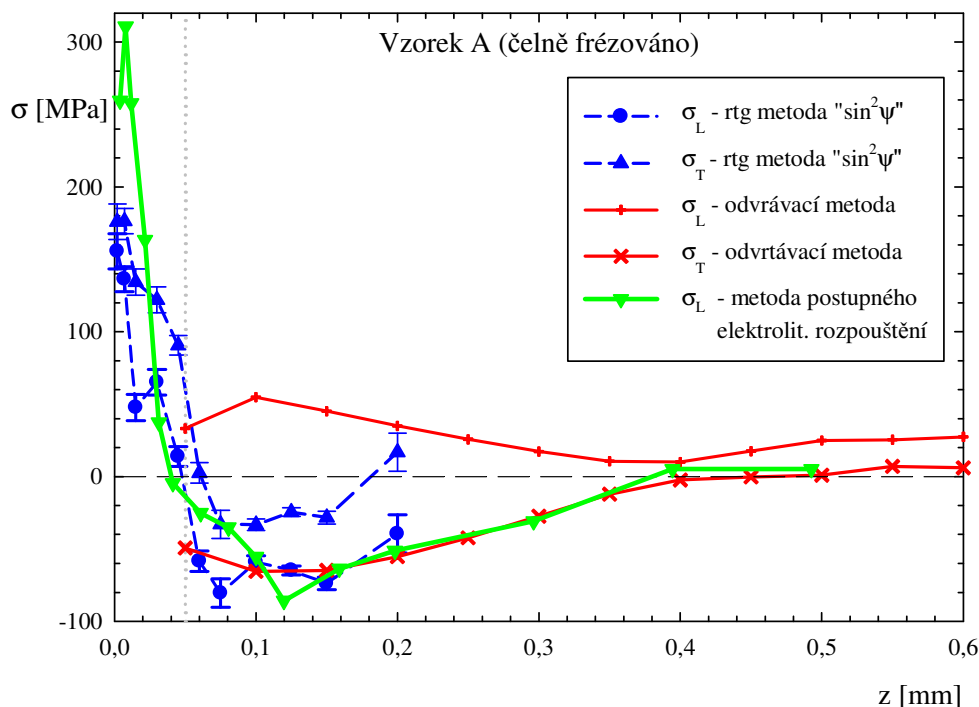


Obr. 7.13 Makroskopická zbytková napětí σ_L a σ_T [MPa] stanovená pomocí *odvrtávací metody* (vyhodnocení provedeno za užití *Integrální metody*). Vzorek B obroběn technologií broušení

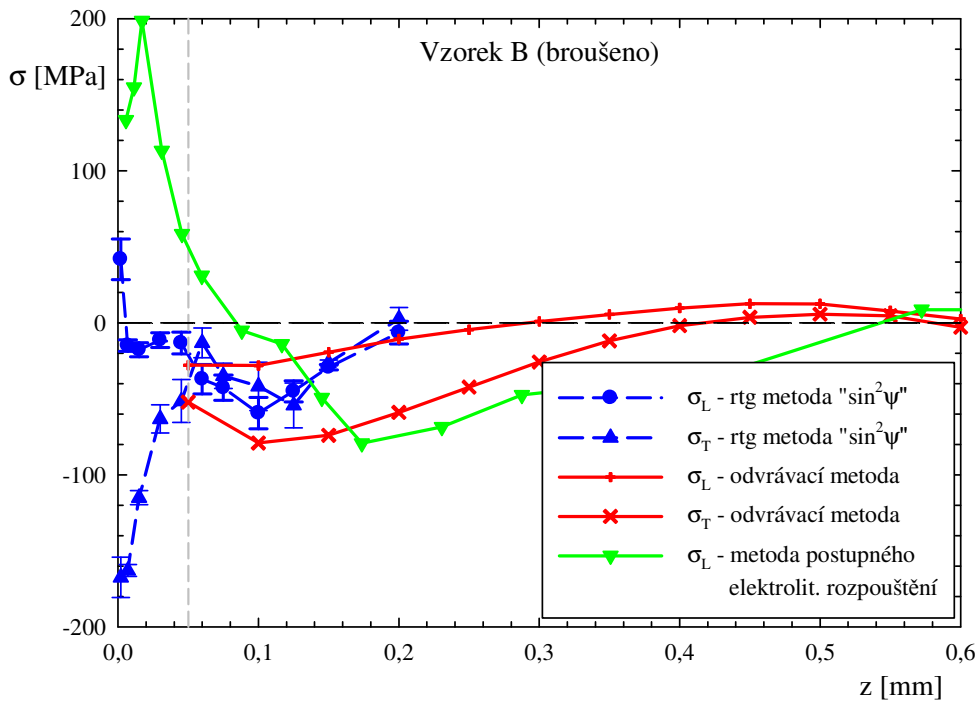


Obr. 7.14 Makroskopická zbytková napětí σ_L a σ_T [MPa] stanovená pomocí *odvrtávací metody* (vyhodnocení provedeno za užití *Integrální metody*). Vzorek C obrobena technologií zaškrabávání

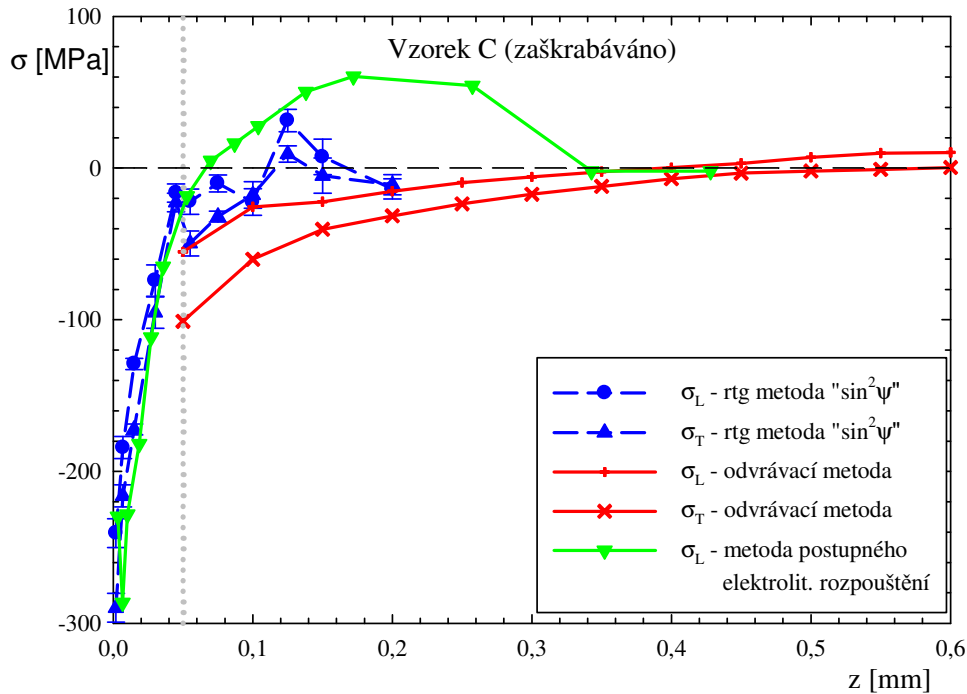
Hloubkové profily zbytkových makroskopických napětí získané pomocí rtg tenzometrické metody „ $\sin^2\psi$ ” jsou znázorněny na obr. 7.15 – 7.17, tyto závislosti jsou doplněny o výsledky mechanických metod (*odvrtávací metoda* a *metoda postupného elektrolytického rozpouštění povrchových vrstev*).



Obr. 7.15 Makroskopická zbytková napětí σ_L a σ_T [MPa] stanovená rentgenograficky za užití metody „ $\sin^2\psi$ “ na fázi α -Fe, odvrtávací metody a metody postupného elektrolytického rozpouštění povrchových vrstev. Vzorek A – čelní frézování



Obr. 7.16 Makroskopická zbytková napětí σ_L a σ_T [MPa] stanovená rentgenograficky za užití metody „ $\sin^2\psi$ “ na fázi α -Fe, odvrávací metody a metody postupného elektrolytického rozpouštění povrchových vrstev. Vzorek B – broušení



Obr. 7.17 Makroskopická zbytková napětí σ_L a σ_T [MPa] stanovená rentgenograficky za užití metody „ $\sin^2\psi$ “ na fázi α -Fe, odvrávací metody a metody postupného elektrolytického rozpouštění povrchových vrstev. Vzorek C – zaškrabávání

7.1.8 Diskuse výsledků experimentálního výzkumu gradientů zbytkových napětí

Z dosažených výsledků lze na základě diskuse učinit následující dílčí závěry. Za předpokladu, že napětí ve směru kolmém k odstraňované vrstvě je nulové, tj $\sigma_{33} = 0$ (platí pro všechny případy diskutovaných použitých tenzometrických analýz).

Rentgenografická tenzometrická metoda “ $\sin^2\psi$ ”

Každý ze studovaných povrchů je charakterizován odlišnými zbytkovým napětím a jeho hloubkovým profilem. Zatímco frézované vzorky vykazují tahová (obr. 7.9) a zaškrabávané tlaková (obr. 7.11) povrchová napětí ve směru obrábění a kolmo k němu, na broušeném povrchu byl zjištěn anizotropní stav zbytkové napjatosti s tahovými napětími ve směru broušení a tlakovými ve směru k němu kolmém (viz obr. 7.10). Odpovídající hloubkové distribuce představují pokles/růst zbytkových napětí k úrovni nenapjatého materiálu.

Srovnávací studium potvrdilo skutečnost, že *difrakční analýza zbytkových napětí* patří k metodám nejlépe propracovaným, i když klade vyšší nároky na provedení experimentu a interpretaci výsledků měření. Jako jediná podává informace o experimentální chybě měření. Metody rtg tenzometrie v kombinaci s elektrolytickým leštěním (bezsilový způsob odstranění materiálu) jsou vhodné převážně ke studiu gradientů napětí v tenkých povrchových vrstvách, např. vzniklých po dokončovacím obrábění.

Z obr. 7.15 – 7.17 vyplývá, že metoda rtg difrakce v kombinaci s elektrolytickým leštěním (bezsilový způsob odstranění materiálu) je vhodná převážně ke studiu gradientů tenkých povrchových vrstev, v tomto případě vzniklých po dokončovacím obrábění.

Odvrtávací metoda

Hloubkové profily zbytkových makroskopických napětí získané pomocí *odvrtávací metody* (vyhodnocení provedeno za užití *Integrální metody*) jsou znázorněny na obr. 7.12 – 7.14 a hodnoty vypočtených zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa] jsou uvedeny v tabulce 7.11.

Omezením praktické použitelnosti této metody je vznik plastické deformace v okolí otvoru při jeho odvrtávání. Tato metoda je určena zejména pro hloubky od cca 50 až 100 μm (viz obr. 7.15 – 7.17). V menších vzdálenostech od povrchu není dostatečná odezva z tenzometrického vinutí a nelze tedy přesně stanovit uvolněnou deformaci. Z tohoto důvodu není tato metoda vhodná pro analýzu zbytkových napětí po dokončovacím obrábění.

Metoda postupného elektrolytického rozpouštění povrchových vrstev

Z naměřených výsledků je patrné, že tato metoda poskytuje hloubkové profily zbytkových napětí ve shodě s rtg difrakcí pouze v případě izotropně předpjatých povrchových vrstev, kdy je $\sigma_{11} \approx \sigma_{22}$ (viz obr. 7.15 a 7.17).

Zjištěný nesoulad výsledků obou metod u broušeného vzorku je důsledkem směrově závislého stavu zbytkové napjatosti (obr. 7.16).

7.2 Výzkum vlivu rozdílných řezných prostředí na distribuci zbytkových napětí v povrchových vrstvách při obrábění oceli po frézování

Podmínky experimentů pro výzkum účinku řezných prostředí na obráběcí proces byly zvoleny tak, aby při všech prováděných zkouškách byly prakticky identické. Jak z pohledu nástroje, obrobku, technologické operace, řezných podmínek i koncentrace a teploty řezného prostředí, tak také z hlediska způsobu jeho aplikace a dodávaného množství. Tato volba umožnila vzájemnou analýzu jednotlivých účinků a jevů způsobených aplikacemi různých řezných prostředí.

7.2.1 Zkoumané vzorky a použitá technologie

Zkušební vzorky o rozměrech 50x15x7 mm byly vyrobeny z oceli 12 050.9 (tvrdość cca 198 HB). Chemické složení této oceli je: 0,42 – 0,50 % C, 0,50 – 0,80 % Mn, 0,17 – 0,37 % Si, max 0,25 % Cr, max 0,30 % Ni, max 0,30 % Cu, max 0,040 % P, max 0,040 % S.

Čelní frézování bylo realizováno na horizontálním frézovacím centru LM – 2. Jako nástroj byla zvolena stopková fréza 20A3R032B20C–SAP11D o průměru 20 mm, osazená třemi vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD) APKX 1103PDER–M ze slinutého karbidu (SK) typu P s multi povlakem TiN a (TiAlSi)N naneseným metodou PVD. Bylo provedeno šest samostatných experimentů označených římskými číslicemi I až VI (viz obr. 7.18 až 7.22). Řezné podmínky byly v průběhu všech experimentů konstantní (tab. 7.13), změna nastávala pouze v použitém řezném prostředí (tab. 7.12). Tato nastavení vedlo k vyloučení ostatních vlivů, a sledován byl pouze efekt řezného prostředí.

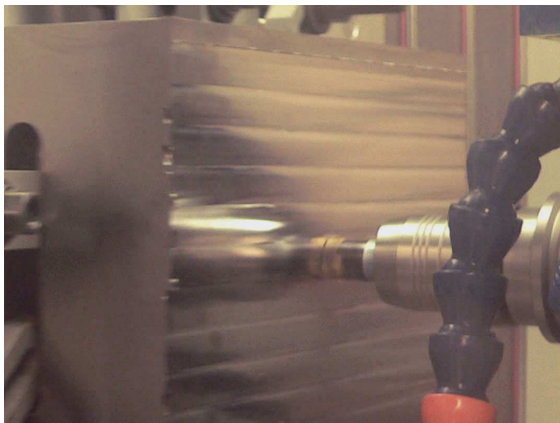
Tab. 7.12 Charakteristiky jednotlivých řezných prostředí při zkouškách

	Charakteristika řezného prostředí	Řezné prostředí			
		typ (koncentrace)	složení	způsob aplikace	počet trysek, kanálků
Vzorek I	bez chlazení	neupravený vzduch	vzduch	-	-
Vzorek II	intenzivně chlazené emulzí	emulze (5,5%)	voda+Ecocool 2520	externě	2
Vzorek III	intenzivně chlazené emulzí	emulze (5,5%)	voda+Ecocool 2520	interně (středem nástroje)	3
Vzorek IV	MQL (minimum quantity lubrication)	aerosol	vzduch+Lubri Oil	externě (olejová mlha)	2
Vzorek V	chlazený stlačený vzduch + 4 °C	chlazený vzduch	vzduch (+4 °C)	externě	1
Vzorek VI	mražený stlačený vzduch – 8 °C	mražený vzduch	vzduch (-8 °C)	externě	1

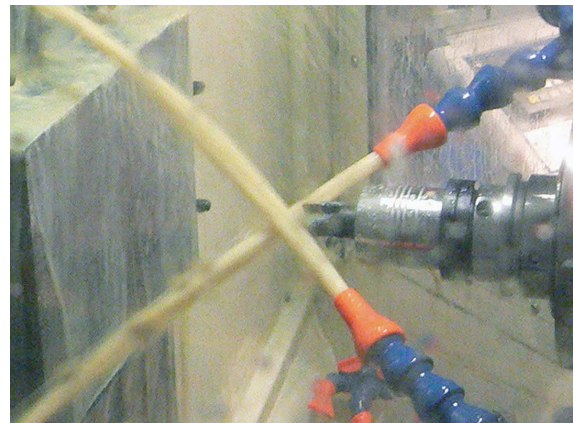
Tab. 7.13 Řezné podmínky pro zkoušky

obráběcí stroj	Frézka LM-2
typ nástroje	stopková fréza s VBD
typ VBD	Povlakovaný slinitý karbid APKX 1103PDER-M
rozměry nástroje: \varnothing [mm]	20
počet zubů $z[-]$	3
otáčky n [min^{-1}]	3342
řezná rychlost v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	210
posuv na zub f_z [mm]	0,15
posuvová rychlost v_f [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	1504
axiální hloubka záběru [mm]	2
radiální hloubka záběru [mm]	16

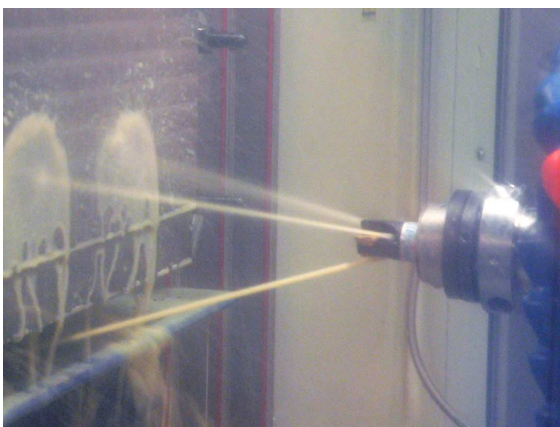
Na obrázcích 7.18 až 7.22 jsou znázorněna jednotlivá řezná prostředí při šesti samostatných experimentech označených římskými číslicemi I až VI.



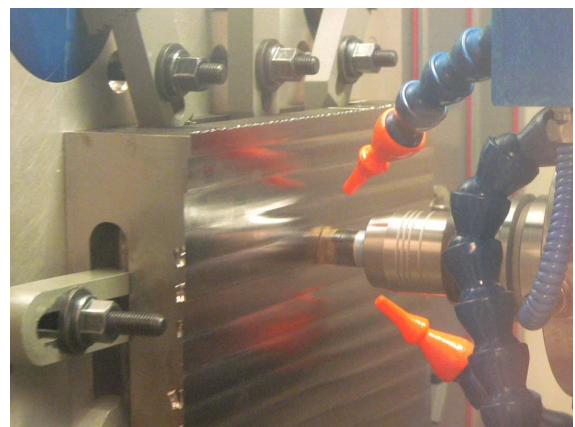
Obr.7.18 Obrobena na sucho (Vzorek I)



Obr.7.19 Intenzivně chlazeno emulzí (Vzorek II)



Obr. 7.20 Intenzivně chlazeno emulzí středem nástroje (Vzorek III)

Obr.7.21 *MQL* (minimum quantity lubrication) – olejová mlha – ekologičtější způsob chlazení (Vzorek IV)



Obr.7.22 *Ranque – Hilschova vírová trubice*
chlazený stlačený vzduch + 4°C (Vzorek V)
mražený stlačený vzduch – 8°C (Vzorek VI)

7.2.2 Použitá analytická metoda

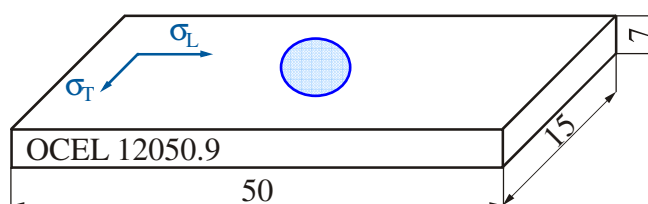
K rentgenografickému určení makroskopických zbytkových napětí na frézovaném povrchu byla použita metoda *jedné expozice bez referenční látky* s detekcí difraktovaného záření na paměťové fólii.

Hlavní parametry použité metody: úhel dopadu záření $CrK\alpha$ na analyzovaný povrch $\psi_0 = 45^\circ$, vzdálenost filmu od povrchu vzorku $D \approx 47$ mm, průměr cylindrického kolimátoru 1,7 mm, plocha ozářeného povrchu cca 2,5 mm², symbol analyzované difrakční linie $\{211\}$. Chyba měření napětí nepřesahuje ± 40 MPa.

Efektivní hloubka vnikání použitého rtg záření u kovů a slitin na bázi železa je pouze cca 5 – 10 μ m. Proto pro stanovení hloubkových profilů makroskopických zbytkových napětí bylo zvoleno postupné odebrání povrchových vrstev materiálu pomocí elektrolytického leštění. Toto odlešťování bylo realizováno na leštičce zn. *LectroPol – 5* od firmy *Struers* elektrolytem A2 dodávaným výrobcem přístroje, chladicí systém udržoval teplotu elektrolytu v intervalu 15 – 25°C.

7.2.3 Metodika měření hloubkové distribuce zbytkových napětí za užití rentgenografické tenzometrické metody jedné expozice

Na zkoumaných površích o velikosti 50×15×7 mm byla vybrána oblast uprostřed analyzované plochy vzorku (obr. 7.23) a v této oblasti byly určeny hodnoty zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa]. Pro stanovení hloubkových profilů makroskopických zbytkových napětí byla použita metoda *jedné expozice bez referenční látky*, která byla doplněna o destruktivní odebrání povrchových vrstev materiálu pomocí *elektrolytického leštění* (viz kap.7.2.2).



Obr. 7.23 Schématické znázornění měření makroskopických zbytkových napětí ve směru pracovního posuvu nástroje σ_L [MPa] a ve směru kolmém σ_T [MPa]

7.2.4 Výsledky experimentálního výzkumu

Výsledky měření gradientů zbytkových napětí ve vzorcích po frézování ve zvolených řezných prostředích (obr. 7.18 až 7.22) jsou uvedeny v tab.7.14 a tab. 7.15. V tabulce 7.14 jsou uvedené průměrné hodnoty zbytkových napětí ve směru rovnoběžném se směrem pracovního posuvu nástroje σ_L [MPa] a v tabulce 7.15 jsou uvedeny hodnoty napětí ve směru kolmém na směr posuvu nástroje σ_T [MPa].

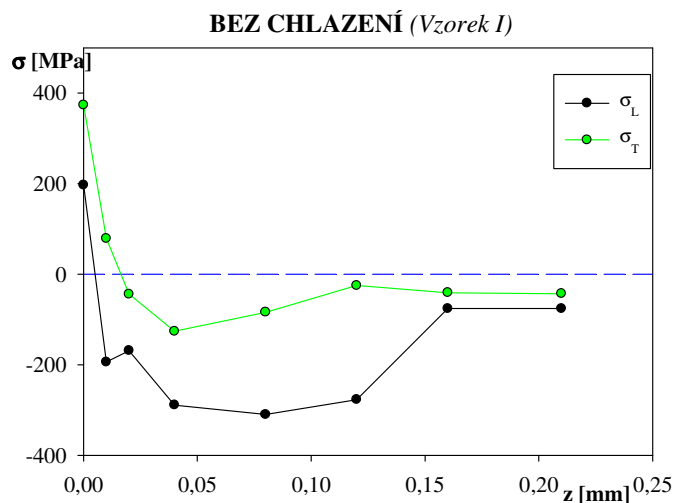
Tab. 7.14 Makroskopická zbytková napětí σ_L [MPa] ve směru pracovního posuvu nástroje

σ_L [MPa]						
hloubka z [mm]	Řezné prostředí					
	bez chlazení	chlazeno emulzí (externě)	chlazeno emulzí (interně)	MQL (externě)	chlazený vzduch (+4°C)	mražený vzduch (-8°C)
0,00	197	136	317	335	249	246
0,01	-194	-125	-123	-86	-184	-149
0,02	-169	-234	-225	-241	-198	-182
0,04	-289	-266	-339	-281	-309	-287
0,08	-310	-295	-315	-229	-196	-181
0,12	-277	-110	-118	-123	-132	-208
0,16	-76	-97	-120	-67	-44	-52
0,21	-76	-24	-45	-8	-7	-15

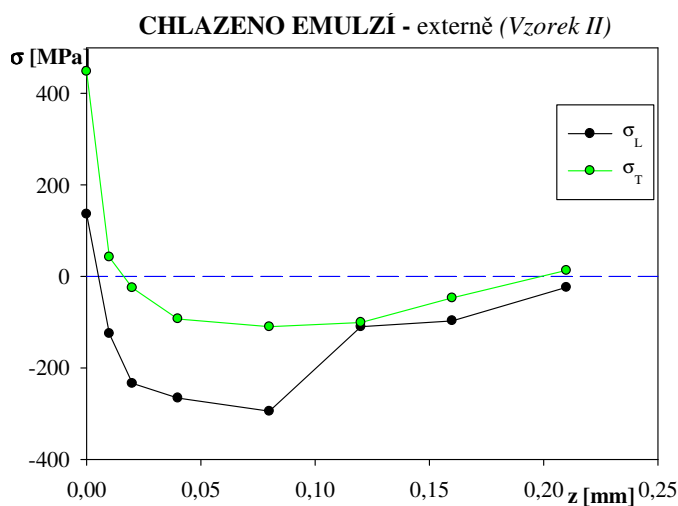
Tab. 7.15 Makroskopická zbytková napětí σ_T [MPa] ve směru kolmém na posuvu nástroje

σ_T [MPa]						
hloubka z [mm]	Řezné prostředí					
	bez chlazení	chlazeno emulzí (externě)	chlazeno emulzí (interně)	MQL (externě)	chlazený vzduch (+4°C)	mražený vzduch (-8°C)
0,00	374	448	465	339	218	235
0,01	79	42	141	170	92	52
0,02	-44	-25	30	143	-17	-45
0,04	-126	-93	-43	9	-12	-71
0,08	-84	-110	-71	-64	-6	-10
0,12	-25	-101	-39	-26	-2	-46
0,16	-41	-47	85	11	54	-37
0,21	-43	13	109	-26	46	68

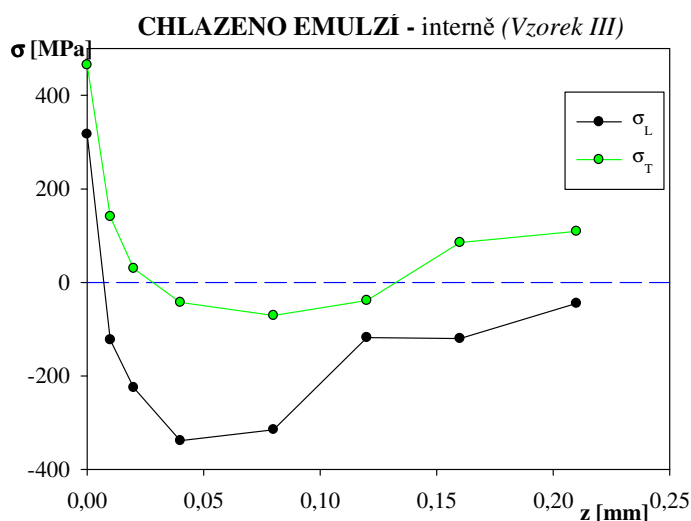
Na obrázcích 7.24 až 7.29 jsou znázorněny hloubkové profily makroskopických zbytkových napětí σ_L [MPa] ve směru posuvu pracovního nástroje a σ_T [MPa] ve směru kolmém při šesti samostatných experimentech označených římskými číslicemi I až VI.



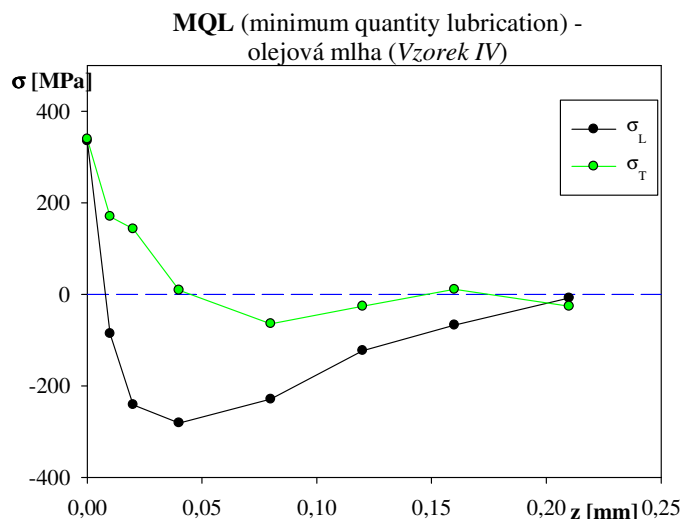
Obr. 7.24 Hloubkové profily makroskopických zbytkových napětí σ_L [MPa] ve směru posuvu pracovního nástroje a σ_T [MPa] ve směru kolmém u *Vzorku I* – bez chlazení



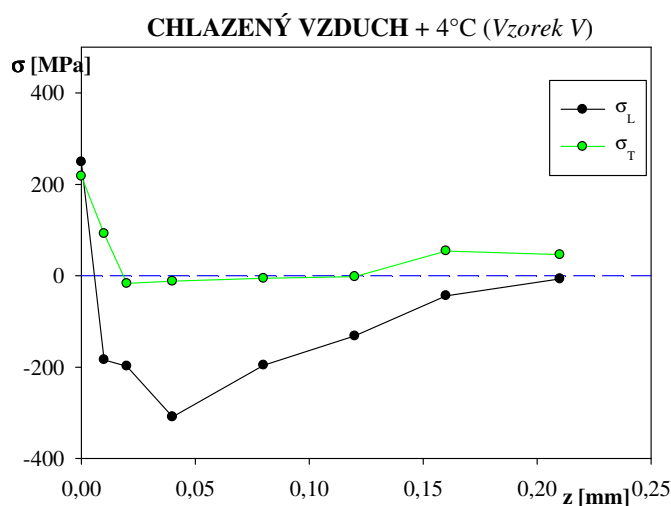
Obr. 7.25 Hloubkové profily makroskopických zbytkových napětí σ_L [MPa] ve směru posuvu pracovního nástroje a σ_T [MPa] ve směru kolmém u *Vzorku II* – chlazeno emulzí (externě)



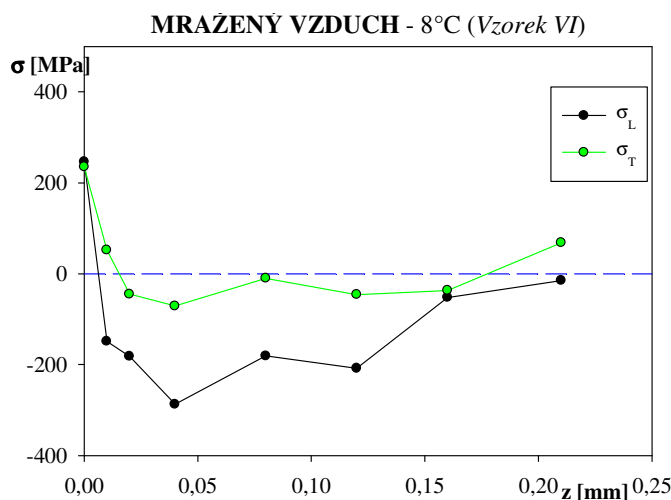
Obr. 7.26 Hloubkové profily makroskopických zbytkových napětí σ_L [MPa] ve směru posuvu pracovního nástroje a σ_T [MPa] ve směru kolmém u *Vzorku III* – chlazeno emulzí (interně)



Obr. 7.27 Hloubkové profily makroskopických zbytkových napětí σ_L [MPa] ve směru posuvu pracovního nástroje a σ_T [MPa] ve směru kolmém u *Vzorku IV* – MQL – olejová mlha

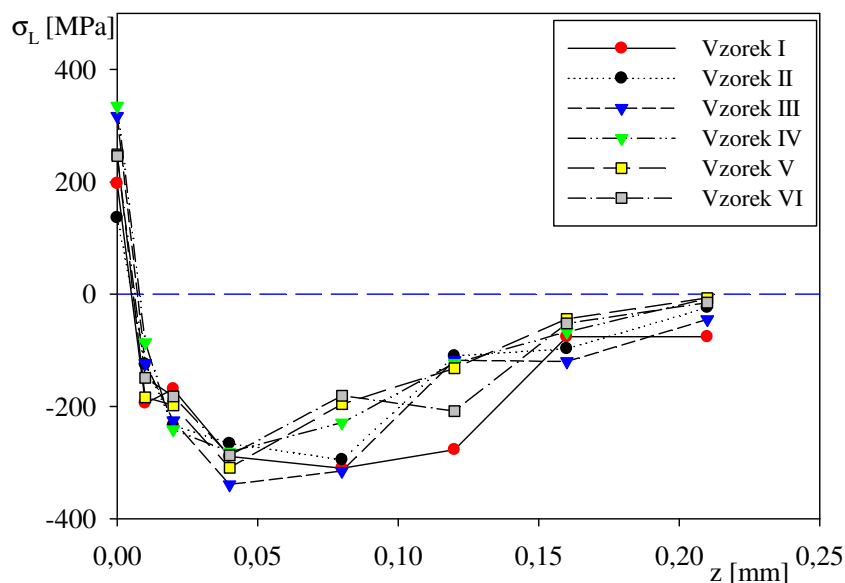


Obr. 7.28 Hloubkové profily makroskopických zbytkových napětí σ_L [MPa] ve směru posuvu pracovního nástroje a σ_T [MPa] ve směru kolmém u *Vzorku V* – chlazený vzduch + 4°C

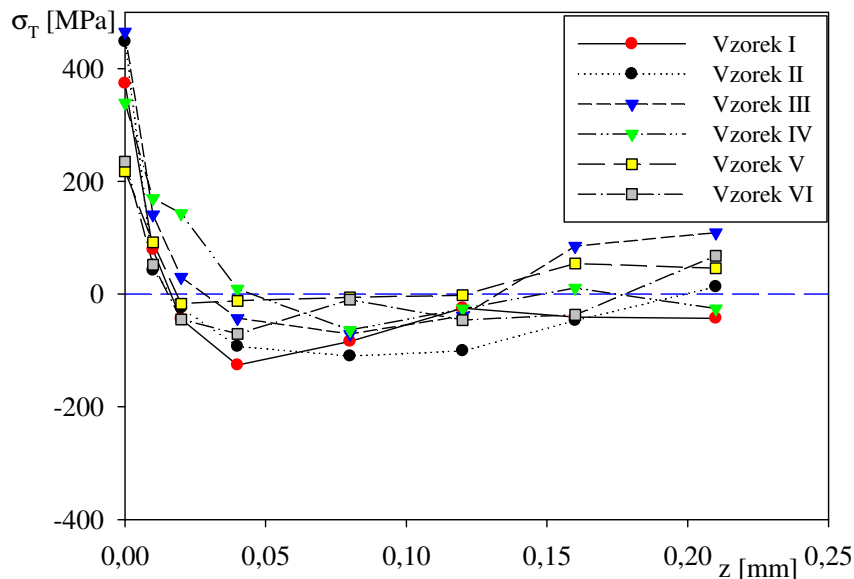


Obr. 7.29 Hloubkové profily makroskopických zbytkových napětí σ_L [MPa] ve směru posuvu pracovního nástroje a σ_T [MPa] ve směru kolmém u *Vzorku VI* – mražený vzduch - 8°C

Na obrázcích 7.30 a 7.31 jsou vyneseny hloubkové profily makroskopických zbytkových napětí σ_L [MPa] ve směru posuvu pracovního nástroje a σ_T [MPa] ve směru kolmém získané pomocí rtg tenzometrické metody jedné expozice bez referenční látky.



Obr. 7.30 Průběhy zbytkových napětí ve směru σ_L [MPa] při šesti samostatných experimentech označených římskými číslicemi I až VI



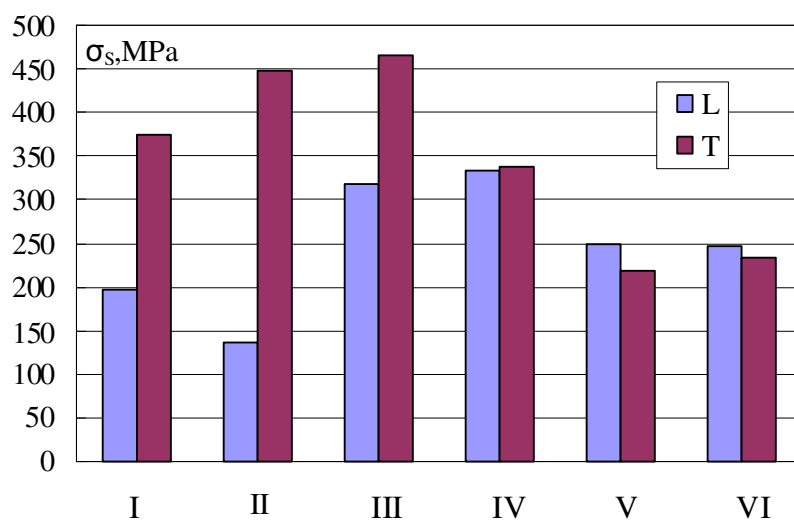
Obr. 7.31 Průběhy zbytkových napětí ve směru σ_T [MPa] při šesti samostatných experimentech označených římskými číslicemi I až VI

Následující tabulka 7.16 a obrázky 7.32 a 7.33 obsahují výsledky analýzy povrchových hodnot a gradientů napětí v povrchové vrstvě. Hodnoty gradientů byly vypočítány z prvních dvou hodnot napětí z hloubkových distribucí příslušných vzorků. Tato analýza byla

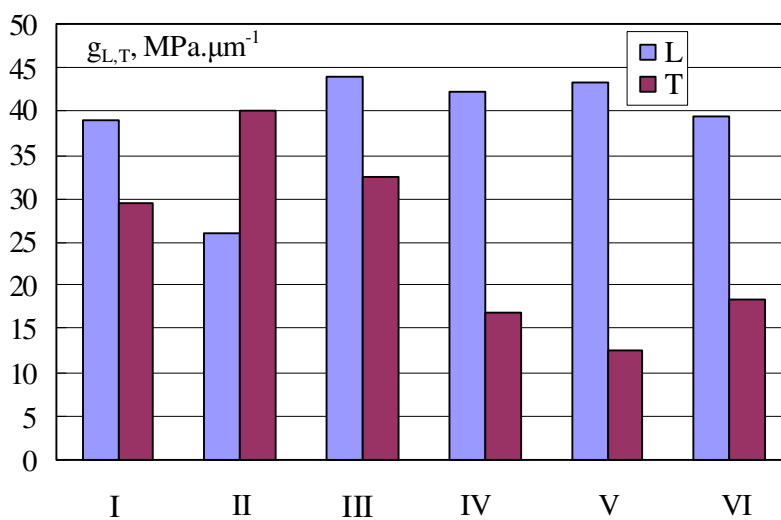
provedena z důvodů porovnání jednotlivých vlivů chladicích prostředí na stav zbytkové napjatosti v povrchových vrstvách.

Tab. 7.16 Povrchová makroskopická zbytková napětí σ_L [MPa], σ_T [MPa] a jejich gradienty g_L [MPa. μm^{-1}], g_T [MPa. μm^{-1}]

	Řezné prostředí					
	bez chlazení	chlazeno emulzí (externě)	chlazeno emulzí (interně)	<i>MQL</i> (externě)	chlazený vzduch (+4°C)	mražený vzduch (-8°C)
σ_{Ls} [MPa]	197	136	317	335	249	246
σ_{Ts} [MPa]	374	448	465	339	218	235
g_L [MPa. μm^{-1}]	39,1	26,1	44	42,1	43,3	39,5
g_T [MPa. μm^{-1}]	29,5	40,1	32,4	16,9	12,6	18,3



Obr. 7.32 Zbytková napětí měřená v podélném L (σ_{Ls}) [MPa] a příčném směru T (σ_{Ts}) [MPa] na površích analyzovaných vzorků



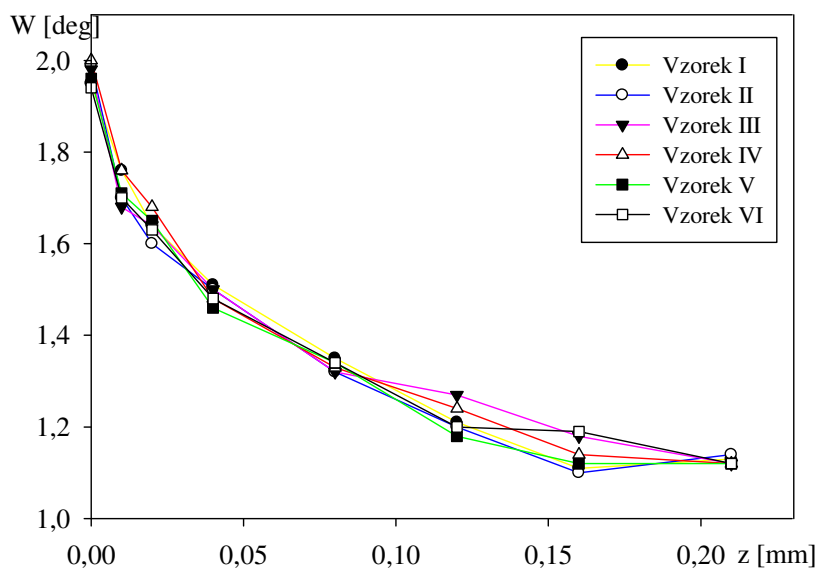
Obr. 7.33 Gradienty napětí g_L (L) a g_T (T) [MPa. μm^{-1}]

Následující tabulka 7.17 obsahuje výsledné hodnoty šířky difrakční linie W [deg] naměřené na povrchu analyzovaných vzorků.

Tab. 7.17 Hodnoty šířky W [deg] difrakční linie $\{211\}$ naměřené na povrchu analyzovaných vzorků I, II, III, IV, V a VI

z [mm]	vzorek I W [deg]	vzorek II W [deg]	vzorek III W [deg]	vzorek IV W [deg]	vzorek V W [deg]	vzorek VI W [deg]
0,00	1,95	1,99	1,98	2,00	1,96	1,94
0,01	1,76	1,70	1,68	1,76	1,71	1,70
0,02	1,64	1,60	1,64	1,68	1,65	1,63
0,04	1,51	1,50	1,50	1,48	1,46	1,48
0,08	1,35	1,32	1,32	1,33	1,34	1,34
0,12	1,21	1,20	1,27	1,24	1,18	1,20
0,16	1,11	1,10	1,18	1,14	1,12	1,19
0,21	1,13	1,14	1,12	1,12	1,12	1,12

Plastická deformace má vliv na šířku difrakční linie, neboť profilovou analýzou lze získat informace o mikrodeformaci, hustotě dislokací či velikosti zrn. Na obrázku 7.34 se porovnávají hodnoty šířky W [deg] difrakční linie $\{211\}$ α -Fe jednotlivých vzorků v měřených hloubkách.



Obr. 7.34 Hodnoty šířky W [deg] difrakční linie $\{211\}$ α -Fe naměřené na povrchu analyzovaných vzorků

7.2.5 Diskuse experimentálního výzkumu

Na povrchu vzorku I (viz obr. 7.24), který byl frézován bez chlazení, byla zjištěna směrově závislá tahová zbytková napětí. Tato napětí jsou ve směru opracování (197 MPa) téměř dvakrát menší než hodnoty naměřené kolmo ke směru obrábění, které činí 374 MPa.

U vzorků *II* a *III* (obr. 7.25 a obr. 7.26) chlazených emulzí (externě *vzorek II* a interně *vzorek III*) byla na povrchu zjištěna nižší tahová napětí ve směru opracování než ve směru k němu kolmém (viz tab. 7.14 a tab. 7.15). Ze získaných výsledků je patrné, že použití vnějšího chladicího proudu emulze vede k výraznějšímu snížení tahových zbytkových napětí ve směru obrábění (*vzorek II* → 136 MPa) v porovnání s použitím chlazení vnitřkem nástroje (*vzorek III* → 317 MPa). Přitom tahová zbytková napětí ve směru kolmém ke směru opracování jsou téměř stejná (*vzorek II* → 448 MPa, *vzorek III* → 465 MPa).

V případě *vzorku IV* (obr. 7.27) chlazeného MQL (*minimum quantity lubrication*) externě nebyl pozorován statisticky významný rozdíl mezi hodnotami tahových zbytkových napětí naměřenými ve dvou sledovaných směrech (≈ 335 MPa).

Vzorky V a *VI* (viz obr. 7.28 a obr. 7.29) chlazené pomocí *Ranqueovy – Hilschovy vírové trubice* (chlazený stlačený vzduch + 4 °C a mražený stlačený vzduch – 8 °C) rovněž nevykazují podstatný rozdíl povrchových zbytkových napětí v obou směrech (≈ 235 MPa).

Distribuce zbytkových napětí do hloubky (při $z = 0,01$ mm) ve směru opracování ukazuje u *vzorku I* opracovaného bez chlazení na přechod zbytkových napětí od tahů (+ 197 MPa) k tlakům (– 194 MPa). Současně však ve směru kolmém ke směru obrábění napětí ve stejné hloubce zachovávají svůj tahový charakter a jejich hodnoty dosahují cca 170 MPa (*vzorek IV – MQL – minimum quantity lubrication*).

Se zvětšující se hloubkou ($z = 0,04$ až $0,08$ mm) tlaková zbytková napětí se ve směru opracování zvětšují v absolutní hodnotě do cca – 300 MPa. Tloušťka plasticky zdeformované povrchové vrstvy je v tomto případě přibližně 0,10 mm (viz obr. 7.30).

Profily zbytkového napětí pro hloubky $z > 0,010$ mm se podstatně neliší s chladicími podmínkami.

Stav zbytkového napětí v hloubkách $z > 0,010$ mm je anizotropní a $\sigma_L < \sigma_T$, což je pravděpodobně následek asymetrie řezání (řezné dráhy nástroje).

Průběh šířky difrakční linie $\{211\}$ α -Fe W [deg] získané pro všechny zkoumané vzorky naznačuje, že tloušťka plasticky deformovaných vrstev je přibližně 0,15 – 0,20 mm (viz obr. 7.34). Tato zjištění odpovídají charakteru rozložení zbytkových napětí, kde hodnoty zbytkových napětí v hloubkách 0,15 až 0,20 mm jsou v rámci experimentální chyby rovny nule.

Hlavní výstup rozdílných řezných prostředí, může být pozorován na průběhu zbytkových napětí získaných na povrchu a těsně pod povrchem $z \leq 0,010$ mm (obr. 7.33 gradienty).

Podpovrchové gradienty, počítané za použití prvních dvou párů (z, σ) (viz tab. 7.16 a obr. 7.33) podélného napětí g_L jsou vyšší než g_T s výjimkou *vzorku II* chlazený emulzí externě.

Vzorky IV – MQL (minimum quantity lubrication), V a *VI – Ranque – Hilschova vírová trubice* (chlazený stlačený vzduch + 4 °C a mražený stlačený vzduch – 8 °C) ukazují vyšší „anizotropii gradientů“ ve srovnání s ostatními třemi vzorky, tj. g_L je více než dvakrát větší než g_T (obr. 7.33).

7.3 Výzkum vlivu konstrukčního uspořádání nástroje, strategie obrábění a pracovních podmínek při frézování tvarových ploch z oceli

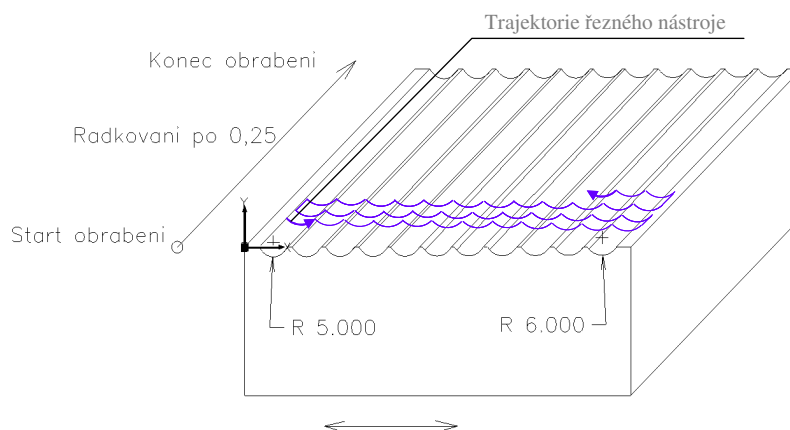
Difrakční analýza byla provedena na základě spolupráce s průmyslem a to za účelem zjistit, zda je pro dosažení požadované kvality nutné obrábět vnitřní rádiusy nástrojem s výrazně menším poloměrem než je výsledný poloměr profilu obrobku; dále byl sledován vliv konstrukce použitého nástroje, byly hodnoceny rozdíly na povrchu obrobku po obrábění monolitní frézou nebo frézovací hlavou osazenou vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD).

7.3.1 Zkoumané vzorky a použitá technologie

Zkušební vzorky, označené 1, 2, 3, 4, 5 a 6 (viz obr. 7.35) o rozměrech 150×70×60 mm byla vyrobena z oceli 19 552.0 (0,32 – 0,42 % C, 0,20 – 0,50 % Mn, 0,80 – 1,20 % Si, max 0,030 % P, max 0,030 % S, 4,50 – 5,50 % Cr, 1,10 – 1,60 % Mo, 0,35 – 0,60 % V), která nebyla tepelně zpracována.



Obr. 7.35 Zkušební vzorky: 1 – frézovaný kulovou monolitní frézou, 2 – frézovaný kulovou frézou s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD)



Obr. 7.36 Schématické znázornění dráhy řezného nástroje

Technologie frézování byla realizována na stroji *Varia* (viz obr. 7.37 a 7.38). Pracovní podmínky jsou uvedeny v tab. 7.18.



Obr. 7.37 Monolitní fréza



Obr. 7.38 Fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD)

Tab. 7.18 Pracovní podmínky při výrobě zkušních vzorků 1, 2, 3, 4, 5, 6

vzorek	1	2	3*	4*	5***	6***
použitá technologie	frézování	frézování	frézování	frézování	frézování	frézování
přídavek na dokončování [mm]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
programované řádkování [mm]	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
typ nástroje (kulová fréza)	<i>monolit</i>	<i>VBD</i>	<i>monolit</i>	<i>VBD</i>	<i>monolit</i>	<i>VBD</i>
rozměry nástroje: Ø, délka [mm]	D10 L122	D10 L122	D10 L122	D10 L122	D10 L122	D10 L122
řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	99	99	99	99	99	99
počet zubů z [-]	2	2	2	2	2	2
posuv na zub f_z [mm]	0,07	0,07	0,07	0,07	dle <i>NC Speed</i>	dle <i>NC Speed</i>
posuv [mm]	441	441	441	441	dle <i>NC Speed</i>	dle <i>NC Speed</i>
chlazení **	ano	ano	ano	ano	ano	ano

*Vzorek obráběn na čisto celý s řádkováním frézou *D12* a rádius vybrán frézou *D10* (frézováním po kontuře rádiusu)

**Procesní kapalina *DASNOBOR 4010*

***Vzorek obráběn s nekonstantním posuvem optimalizovaným programem pomocí software *NC Speed*

7.3.2 Použitá analytická metoda

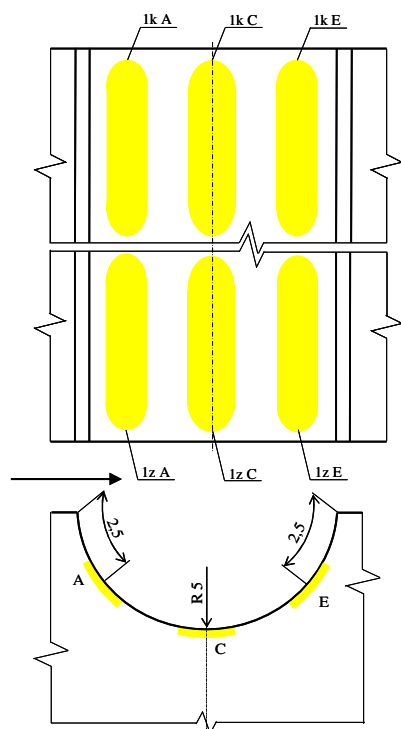
K rentgenografickému určení makroskopických zbytkových napětí byla použita metoda *jedné expozice bez referenční látky* s detekcí difraktovaného záření na paměťové fólii.

Hlavní parametry použité metody [45]: úhel dopadu záření $CrK\alpha$ na analyzovaný povrch $\psi_0 = 45^\circ$, vzdálenost plošného detektoru od povrchu vzorku $D = 46 \text{ mm}$, průměr cylindrického kolimátoru $1,7 \text{ mm}$, plocha ozářeného povrchu byla v případě měření statického vzorku *cca* $2,5 \text{ mm}^2$, symbol analyzované difrakční linie $\{211\}$. Chyba měření napětí nepřesahuje $\pm 40 \text{ MPa}$.

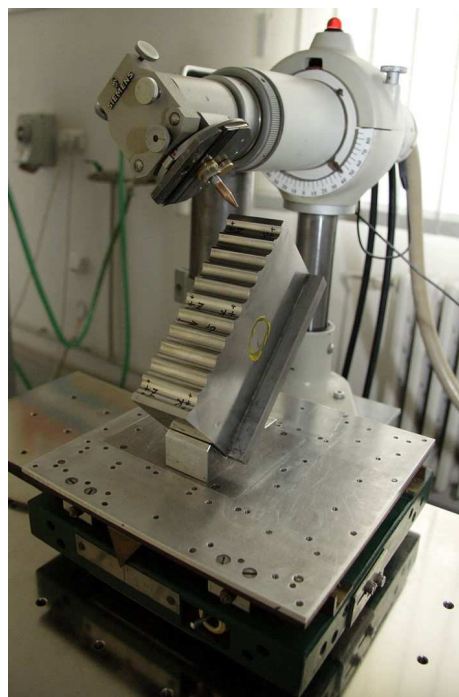
7.3.3 Metodika měření rozložení zbytkových napětí na obrobených plochách za užití rentgenografické tenzometrické metody jedné expozice

Na zkoumaných površích (viz obr. 7.40) byla zvolena síť 18 měřených míst $1zA, 1zC, 1zE, 2zA, \dots, 11kA, 11kC, 11kE$. Čísla značí polohu vnitřního rádiusu od počáteční polohy obrábění v souřadnici X (obr. 7.36). Oblasti A a E představují boky vnitřních rádiusů a oblast C dno (obr. 7.39). Místa, jejichž symbol obsahuje „z“ odpovídají začátku frézovaného povrchu, označení obsahující „k“ jsou pro místa *konečných* přejezdů nástroje. Geometrie profilu analyzovaných vzorků (obr. 7.36) neumožňuje provést měření napětí ve směru posuvu frézy, proto byly určeny pouze hodnoty zbytkového napětí σ_T ve směru kolmém na posuv obráběcího nástroje.

Difrakční měření byla prováděna s translací vzorku $\pm 5 \text{ mm}$ ve směru σ_T kolem měřeného místa, čímž byla plocha ozářeného povrchu *cca* 24 mm^2 (viz obr. 7.40). Zvětšení ozářené oblasti, dosažené díky translaci vzorku vede k eliminaci vlivu lokálních nehomogenit zbytkových napětí.



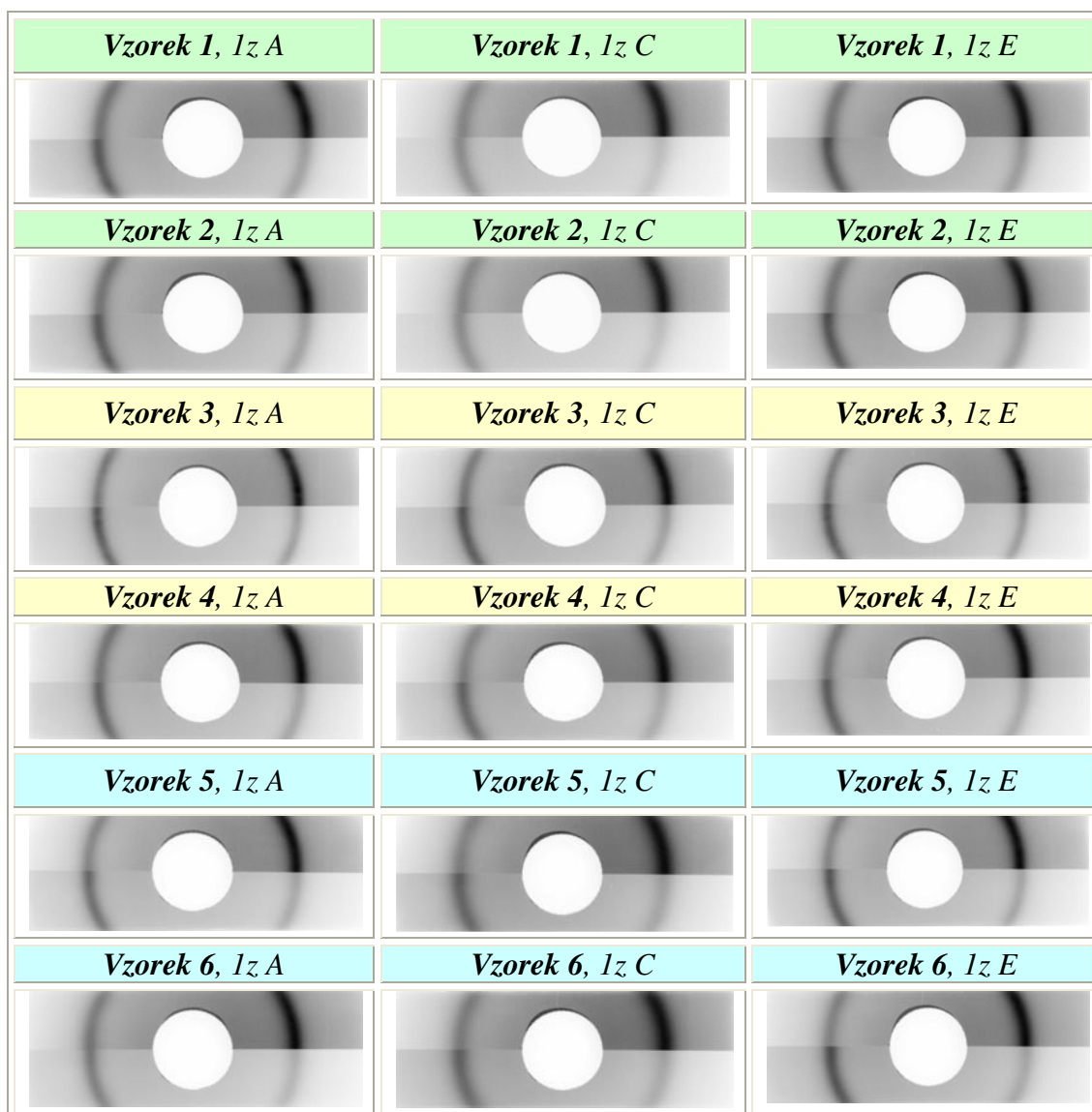
Obr. 7.39 Schématické znázornění zvolené sítě analyzovaných ploch první drážky hřebenového profilu vzorků 1 až 6



Obr. 7.40 Zkušební těleso „hřeben úzký“ umístěný na stolku umožňujícím translační pohyb $\pm 5 \text{ mm}$ kolem měřeného místa

7.3.4 Výsledky experimentálního výzkumu

Před zahájením vlastních měření zbytkových napětí metodou *jedné expozice bez referenční látky* byly ze všech studovaných povrchů pořízeny difrakční obrazce (statické měření). Spojitý charakter difrakčních linií $\{211\}$ vypovídá kvalitativně o jemnozrnném izotropním polykrystalickém materiálu v povrchové vrstvě. Tloušťka vrstvy cca 3 až 5 μm (viz obr. 7.41) odpovídá efektivní hloubce vnikání použitého rtg záření do materiálů na bázi železa. V tomto případě je tedy aplikace metody *jedné expozice bez referenční látky* korektní.



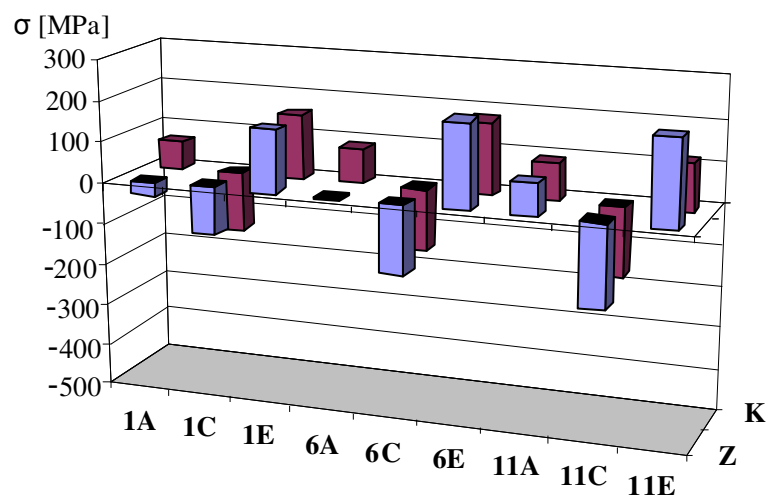
Obr. 7.41 Difrakční obrazce $\{211\} CrK\alpha$ pořízené z povrchu 1. drážky analyzovaných vzorků

Hodnoty naměřených zbytkových napětí σ_T [MPa] a šířky W [deg] difrakční linie $\{211\}$, které mohou být interpretovány jako míra plastické deformace obroběného povrchu jsou uvedeny v následujících tabulkách 7.19 – 7.24 a graficky znázorněny na obr. 7.42 – 7.53.

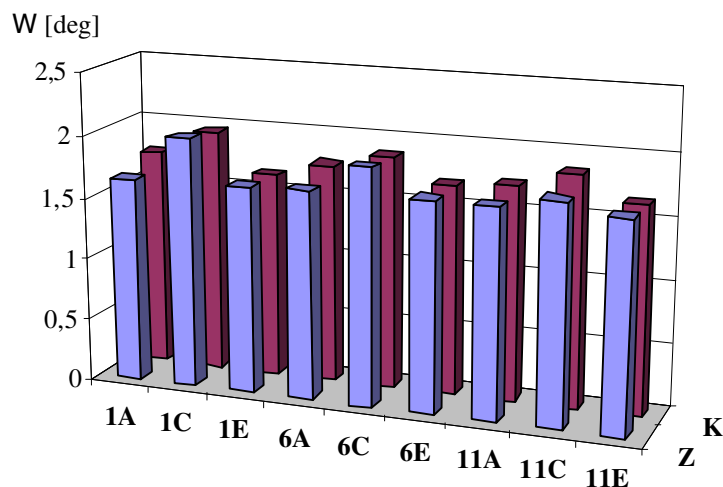
Tab. 7.19 Hodnoty zbytkových napětí σ_T [MPa] a šířky W [deg] difrakční linie $\{211\}$ u vzorku 1 obrobeneho monolitním nástrojem (s translací vzorku ± 5 mm)

	Oblast A		Oblast C		Oblast E	
poloha	σ_T [MPa]	W [deg]	σ_T [MPa]	W [deg]	σ_T [MPa]	W [deg]
1 z	-31	1,64	-113	2,01	153	1,66
6 z	-2	1,67	-168	1,90	231	1,69
11 z	75	1,68	-200	1,76	205	1,67
1 k	66	1,75	-142	1,96	154	1,65
6 k	83	1,76	-151	1,86	174	1,68
11 k	89	1,72	-169	1,85	114	1,67
Průměr	47	1,70	-157	1,89	172	1,67

Vzorek 1

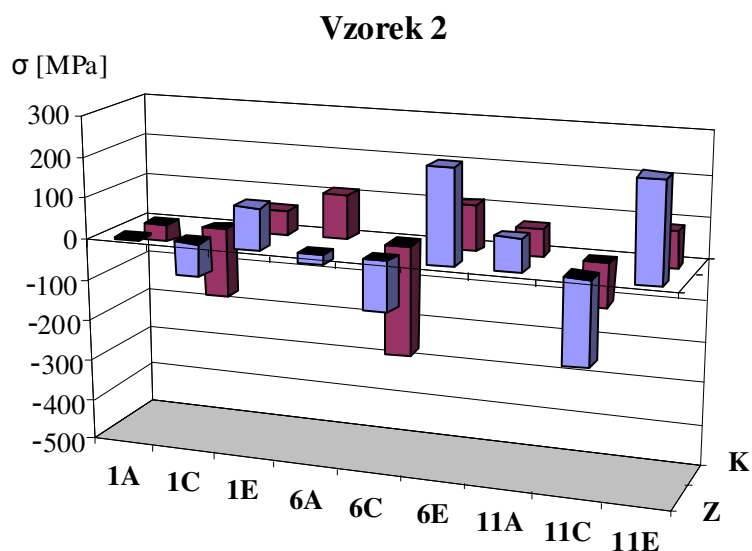
Obr. 7.42 Hodnoty zbytkových napětí σ_T [MPa] vzorku 1 obrobeneho monolitním nástrojem

Vzorek 1

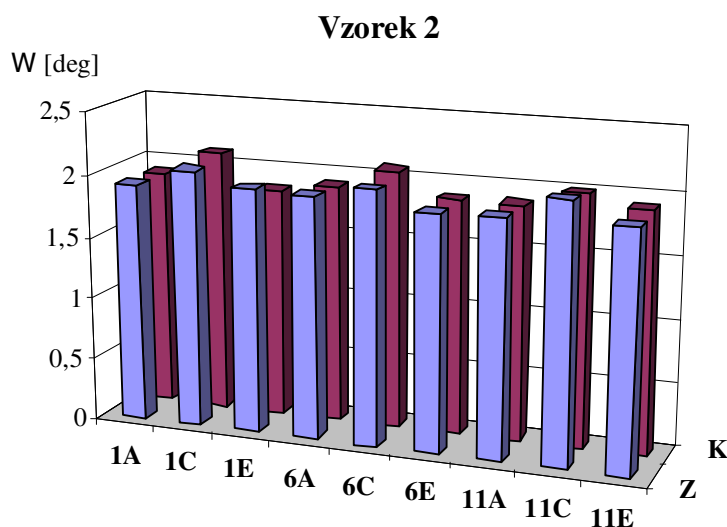
Obr. 7.43 Hodnoty šířky W [deg] difrakční linie $\{211\}$ naměřené na povrchu vzorku 1

Tab. 7.20 Hodnoty zbytkových napětí σ_T [MPa] a šířky W [deg] difrakční linie $\{211\}$ u vzorku 2 obrobeného nástrojem osazeným VBD (s translací vzorku ± 5 mm)

	Oblast A		Oblast C		Oblast E	
poloha	σ_T [MPa]	W [deg]	σ_T [MPa]	W [deg]	σ_T [MPa]	W [deg]
1 z	-7	1,91	-80	2,06	100	1,95
6 z	-23	1,93	-124	2,02	229	1,88
11 z	79	1,89	-206	2,06	239	1,90
1 k	-46	1,91	-170	2,10	60	1,84
6 k	111	1,91	-272	2,07	107	1,88
11 k	67	1,87	-109	2,00	85	1,93
Průměr	30	1,90	-160	2,06	137	1,90



Obr. 7.44 Hodnoty zbytkových napětí σ_T [MPa] vzorku 2 obrobeného nástrojem osazeným VBD

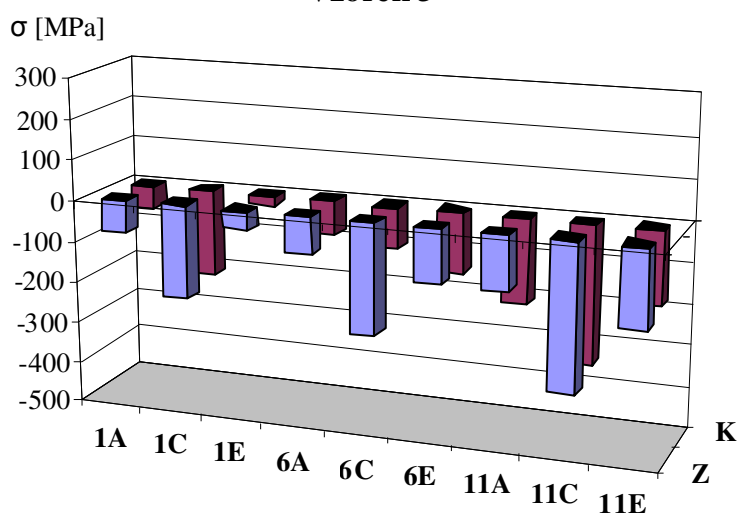


Obr. 7.45 Hodnoty šířky W [deg] difrakční linie $\{211\}$ naměřené na povrchu vzorku 2

Tab. 7.21 Hodnoty zbytkových napětí σ_T [MPa] a šířky W [deg] difrakční linie $\{211\}$ u vzorku 3 obrobeneho monolitním nástrojem (s translací vzorku ± 5 mm)

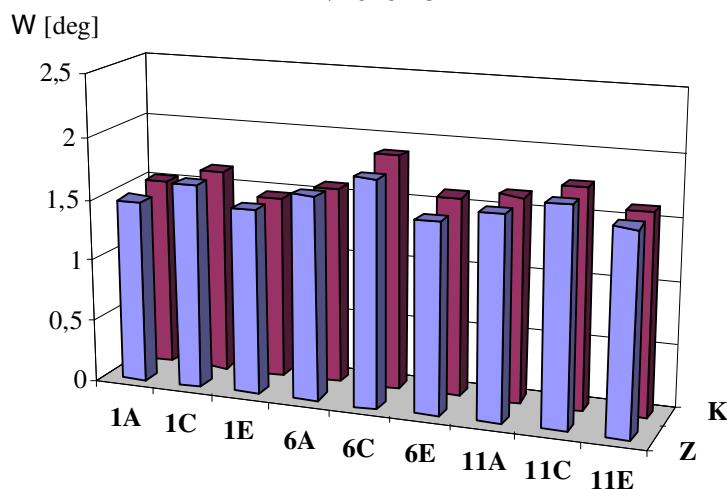
	Oblast A		Oblast C		Oblast E	
poloha	σ_T [MPa]	W [deg]	σ_T [MPa]	W [deg]	σ_T [MPa]	W [deg]
1 z	-79	1,48	-227	1,64	-45	1,49
6 z	-91	1,64	-271	1,82	-131	1,53
11 z	-132	1,64	-357	1,75	-192	1,61
1 k	-53	1,53	-212	1,65	-24	1,47
6 k	-83	1,58	-97	1,89	-149	1,6
11 k	-209	1,65	-336	1,76	-181	1,62
Průměr	-108	1,59	-250	1,75	-120	1,55

Vzorek 3



Obr. 7.46 Hodnoty zbytkových napětí σ_T [MPa] vzorku 3 obrobeneho monolitním nástrojem

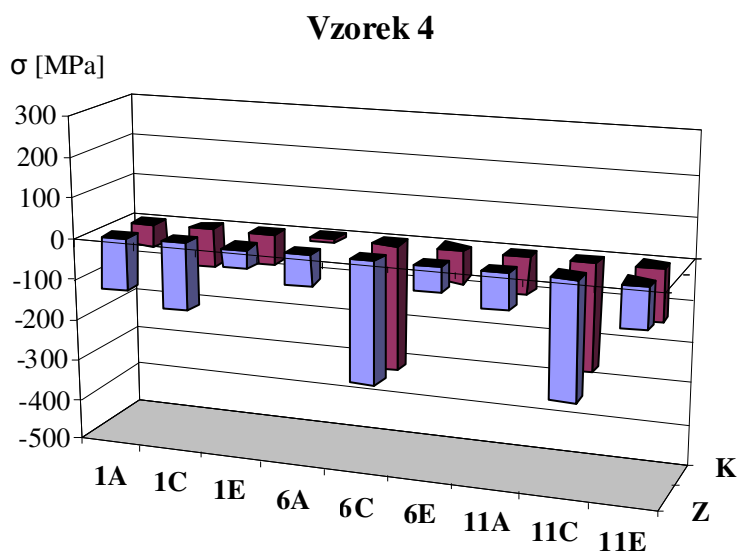
Vzorek 3



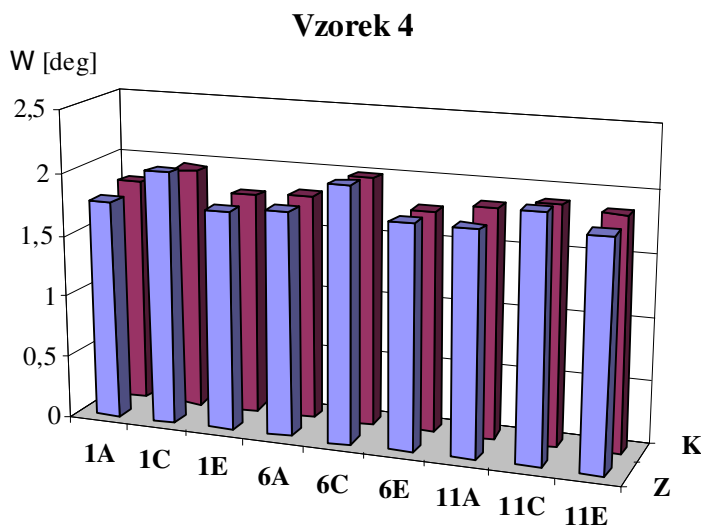
Obr. 7.47 Hodnoty šířky W [deg] difrakční linie $\{211\}$ naměřené na povrchu vzorku 3

Tab. 7.22 Hodnoty zbytkových napětí σ_T [MPa] a šířky W [deg] difrakční linie $\{211\}$ u vzorku 4 obrobeného nástrojem osazeným VBD (s translací vzorku ± 5 mm)

	Oblast A		Oblast C		Oblast E	
poloha	σ_T [MPa]	W [deg]	σ_T [MPa]	W [deg]	σ_T [MPa]	W [deg]
1 z	-128	1,76	-166	2,04	-46	1,77
6 z	-74	1,81	-300	2,04	-60	1,79
11 z	-88	1,78	-288	1,96	-103	1,83
1 k	-57	1,82	-94	1,95	-76	1,78
6 k	-10	1,8	-310	2	-77	1,78
11 k	-90	1,85	-263	1,91	-126	1,87
Průměr	-75	1,80	-237	1,98	-81	1,80



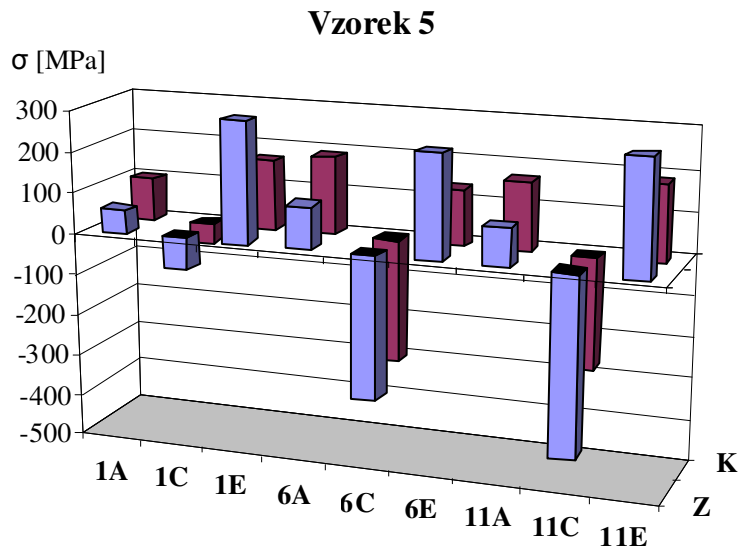
Obr. 7.48 Hodnoty zbytkových napětí σ_T [MPa] vzorku 4 obrobeného nástrojem osazeným VBD



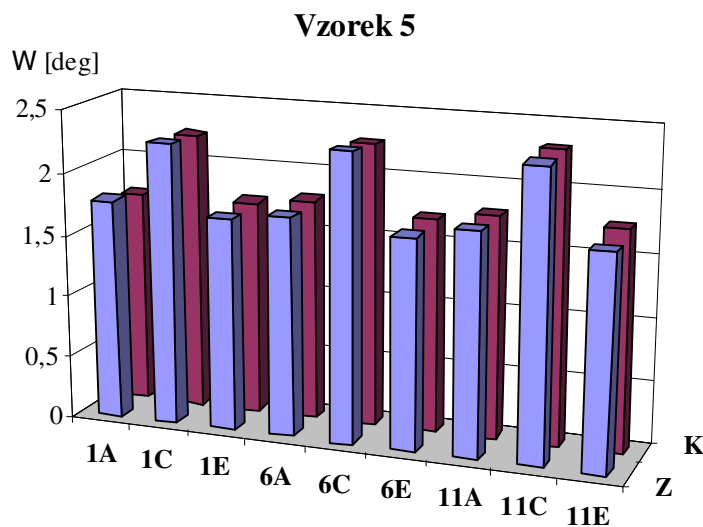
Obr. 7.49 Hodnoty šířky W [deg] difrakční linie $\{211\}$ naměřené na povrchu vzorku 4

Tab. 7.23 Hodnoty zbytkových napětí σ_T [MPa] a šířky W [deg] difrakční linie $\{211\}$ u vzorku 5 obrobeneho monolitním nástrojem (s translací vzorku ± 5 mm)

	Oblast A		Oblast C		Oblast E	
poloha	σ_T [MPa]	W [deg]	σ_T [MPa]	W [deg]	σ_T [MPa]	W [deg]
1 z	58	1,77	-76	2,26	294	1,7
6 z	104	1,76	-349	2,3	251	1,68
11 z	92	1,77	-435	2,3	275	1,71
1 k	105	1,71	-47	2,23	167	1,72
6 k	188	1,69	-299	2,27	134	1,71
11 k	166	1,78	-271	2,32	183	1,76
Průměr	119	1,75	-246	2,28	217	1,71



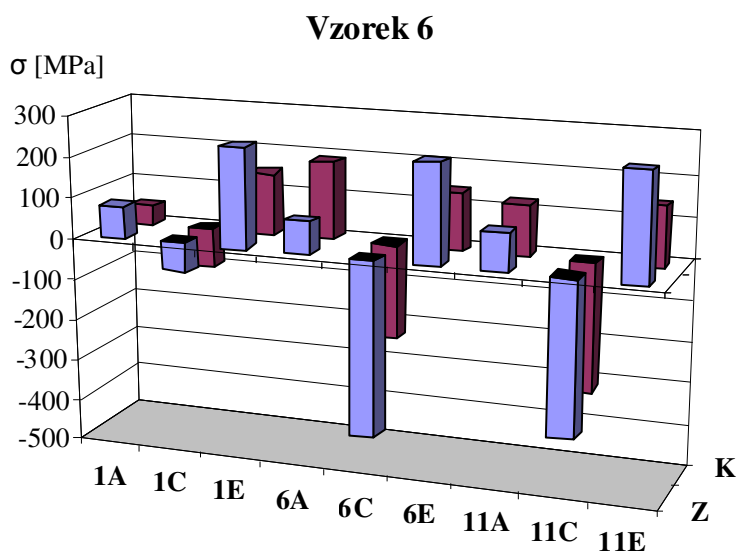
Obr. 7.50 Hodnoty zbytkových napětí σ_T [MPa] vzorku 5 obrobeneho monolitním nástrojem



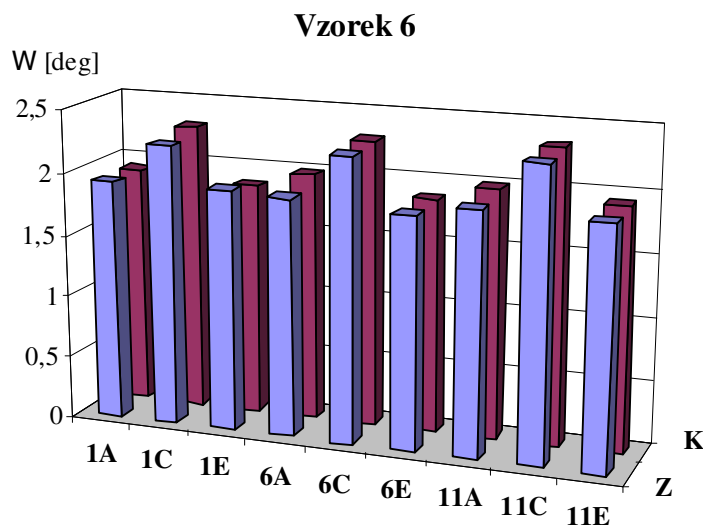
Obr. 7.51 Hodnoty šířky W [deg] difrakční linie $\{211\}$ naměřené na povrchu vzorku 5

Tab. 7.24 Hodnoty zbytkových napětí σ_T [MPa] a šířky W [deg] difrakční linie $\{211\}$ u vzorku 6 obrobeneho nástrojem osazeným VBD (s translací vzorku ± 5 mm)

	Oblast A		Oblast C		Oblast E	
poloha	σ_T [MPa]	W [deg]	σ_T [MPa]	W [deg]	σ_T [MPa]	W [deg]
1 z	77	1,92	-69	2,24	245	1,92
6 z	80	1,9	-428	2,26	240	1,85
11 z	93	1,94	-375	2,31	255	1,92
1 k	46	1,92	-93	2,29	149	1,86
6 k	188	1,88	-229	2,29	139	1,86
11 k	120	1,99	-312	2,34	142	1,94
Průměr	101	1,93	-251	2,29	195	1,89

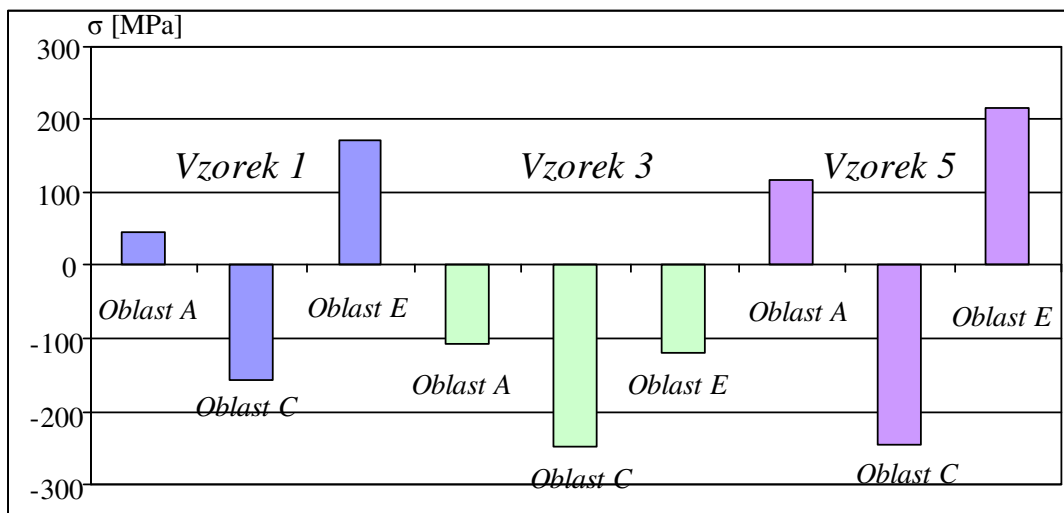


Obr. 7.52 Hodnoty zbytkových napětí σ_T [MPa] vzorku 6 obrobeneho nástrojem osazeným VBD

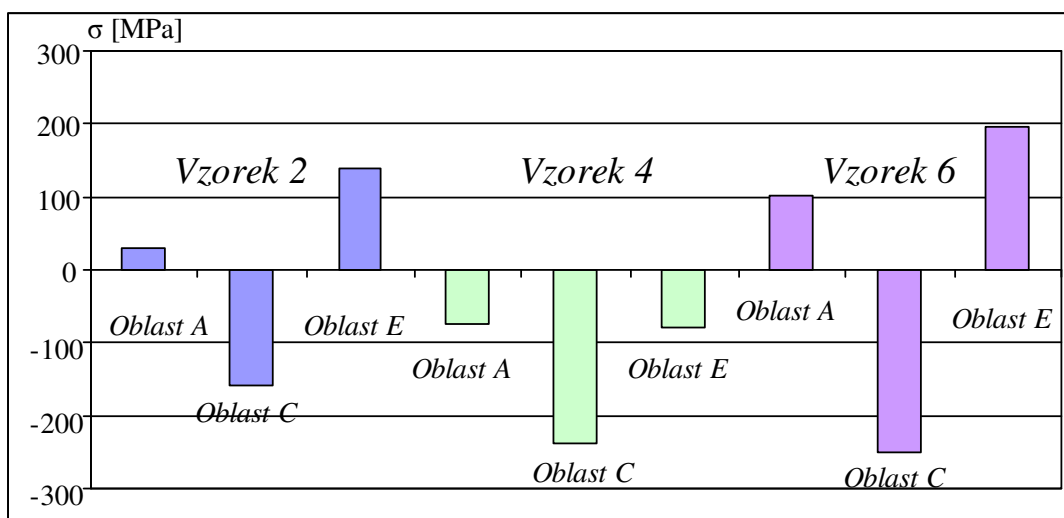


Obr. 7.53 Hodnoty šířky W [deg] difrakční linie $\{211\}$ naměřené na povrchu vzorku 6

Na následujících grafech (obr. 7.54 a 7.55) jsou vyneseny průměrné hodnoty makroskopických zbytkových napětí získaných rtg difrakční metodou *jedné expozice bez referenční látky*, vzorků 1, 3 a 5 (obrobených monolitním nástrojem) a vzorků 2, 4 a 6 (obrobených nástrojem s VBD).



Obr. 7.54 Průměrné hodnoty makroskopických zbytkových napětí σ_T [MPa] vzorků 1, 3 a 5 obrobených monolitním nástrojem



Obr. 7.55 Průměrné hodnoty makroskopických zbytkových napětí σ_T [MPa] vzorků 2, 4 a 6 obrobených nástrojem osazeným VBD

7.3.5 Diskuse výsledků experimentálního výzkumu

- Porovnání vzorků 1 a 2:

Cílem tohoto srovnání je diskuse ohledně vlivu konstrukčního uspořádání obráběcího nástroje (monolitní fréza – nástroj číslo 1, nebo frézovací hlava osazená výměnnými břitovými destičkami (VBD) – nástroj číslo 2).

Stav zbytkové napjatosti na obrobeném povrchu je *nehomogenní*.

V případě analyzovaných vzorků 1 a 2 je patrné, že úrovně zbytkových napětí měřených oblastí *A*, *C* a *E* jsou kvalitativně odlišné. Přitom smysl (tahy či tlaky) a velikost hodnot zbytkových napětí u vzorku 1 a 2 je ve shodě ve všech analyzovaných oblastech tj. *A*, *C* a *E*. Tento fakt je viditelný též z průměrných hodnot vynesných v (tab. 7.19 a 7.20).

Oblast A vykazuje u obou vzorků zbytková napětí v rozsahu statisticky nevýznamných tlakových hodnot (do – 46 MPa) až k tahovým zbytkovým napětím překračujícím více než dvojnásobně odhad experimentální chyby (111 MPa). Charakter napětí je u měřených vzorků stejný. Na začátku obrábění (místa *Iz*, *6z*) jsou pozorovány tlaky, zatímco na jeho konci (místa *6k*, *11k*) jsou napětí výrazně tahová. Ve většině případů, dochází ke změně plastické deformace v oblasti řezu a tím i ke změně v tepelné bilanci při řezném procesu. Tento fakt má přímý vliv na redistribuci v rozložení výsledné zbytkové napjatosti.

Zbytková napětí zjištěná v *oblasti C* jsou tlaková a jejich průměrné hodnoty se u vzorků 1 a 2 prakticky neliší (tab. 7.19 a 7.20). Na základě provedené difrakční analýzy není pozorována tendence změny naměřených hodnot napětí v průběhu obrábění. Tuto skutečnost lze vysvětlit tzv. nulovou řeznou rychlostí v ose nástroje, kdy geometrie frézy (monolit – nástroj č. 1) či tvar *VBD* – nástroj č. 2 nemá významný vliv na míru plastické deformace a teplotu.

Oblast E vykazuje výrazná tahová napětí v absolutní hodnotě srovnatelná s tlaky v *oblasti C*. Ani zde se vliv obráběcího nástroje neprojevuje nad rámec chyby měření, která představuje ± 40 MPa.

Z tabulek 7.19, 7.20 je patrné, že hodnoty *šířky W difrakční linie {211}* jsou u jednotlivých vzorků shodné pro *oblasti A* a *E*, zatímco *oblast C* je charakterizována veličinou *W* větší o cca $0,2^\circ$, tj. o čtyřnásobek odhadu experimentální chyby jejího stanovení. Jde tedy o rozdíl statisticky významný.

Vliv obráběcího nástroje se projevuje zcela jednoznačně na hodnoty *šířky W difrakční linie {211}*. V případě frézovací hlavy osazené *VBD* (vzorek 2) je šířka difrakční větší o cca $0,2^\circ$ než u vzorku 1 obrobeného monolitním nástrojem. Z tohoto zjištění lze usoudit, že vzorek obrobený nástrojem č. 2 byl podroben větší plastické deformaci, za jejíž měřítko (z pohledu rtg difrakce) lze považovat právě *šířku difrakční linie W*.

Difrakční analýza vzorků 1 (obrobení monolitním nástrojem) a 2 (obrobení nástrojem osazením *VBD*) prokázala kvalitativní odlišnost charakteristik naměřených v oblastech *A*, *C* a *E* obrobeného povrchu (obr 7.42 a 7.44). Tyto rozdíly svědčí o tom, že průběh procesu řezání a jím způsobené nerovnoměrné plastické deformace vedoucí ke vzniku zbytkových makroskopických deformací v povrchové vrstvě obrobku, se v oblastech *A*, *C*, *E* navzájem liší. Pozorované rozdíly zjištěných difrakčních charakteristik odrážejí skutečnost, že povrch *C* vzniká obráběním čelem nástroje (*tlaková zbytková napětí*), zatímco *oblasti A* a *E* jeho bokem (*tahová zbytková napětí*). Přitom v případě *oblasti A* probíhá frézování nesousledně (nižší hodnoty tahových napětí), v *oblasti E* však sousledně (vyšší hodnoty tahových napětí).

S respektováním experimentální chyby nebyl v rámci provedených měření pozorován vliv obráběcího nástroje (monolitní a osazený *VBD*) na hodnoty zbytkových makroskopických napětí.

Typ použité frézy však významně ovlivňuje hodnoty *šířky W* analyzované difrakční linie *{211}*, která závisí na úrovni mikroskopických zbytkových napětí a velikosti krystalitů v povrchové vrstvě a je možné ji interpretovat jako míru plastické deformace.

- Porovnání vzorků 3 a 4:

Cílem tohoto srovnání je diskuse ohledně vlivu konstrukčního uspořádání nástroje při shodné strategii frézování vnitřních rádiusů (obr. 7.36), která spočívala v obrobení tvaru

řádkováním frézou *D12* a následným dokončením tvaru frézou *D10* po kontuře rádiusu. Použité nástroje byly opět monolitní fréza – nástroj č. 3 a frézovací hlava osazená vyměnitelnými břitovými destičkami (*VBD*) – nástroj č. 4.

Na základě provedených měření uvedených v tab. 7.21 a 7.22 znázorněných na obr. 7.46, 7.47, 7.48 a 7.49 lze učinit následující diskusi týkající se vlivu typu nástroje při obrábění za podmínek v tab. 7.18.

Všechna zjištěná zbytková makroskopická napětí jsou tlaková (tab. 7.21 a 7.22).

Stav zbytkové napjatosti je v rámci jednotlivých *oblastí A, C a E* nehomogenní. Zatímco u vzorku 4 obrobeného nástrojem osazeným *VBD* není pozorovatelný trend závislosti napětí na poloze, u vzorku 3 obrobeného monolitní frézou jsou tlaková napětí zjištěná na první drážce (polohy *Iz, Ik*) ve všech oblastech systematicky nejnižší.

Porovnáním hodnot napětí naměřených u vzorků 3 a 4 je patrné, že vliv nástroje (*monolit – VBD*) není vzhledem k experimentální chybě (± 40 MPa) významný.

Tlaky zjištěné v *oblasti C* jsou největší a jejich střední hodnoty jsou – 250 MPa pro vzorek 3 a – 237 MPa pro vzorek 4.

Hodnoty tlakových zbytkových napětí v *oblastech A a E* jsou systematicky nižší a dosahují cca 30 až 40 % úrovně *oblasti C*. Přitom není významný rozdíl mezi hodnotami naměřenými v těchto dvou oblastech.

Diskutované odlišné úrovně zbytkových napětí *oblasti C* (dno drážky) ve srovnání s *oblastmi A a E* (boky drážky) svědčí o rozdílech ve způsobu tvorby zkoumané povrchové vrstvy.

Šířky *W* difrakční linie $\{211\}$ v tab. 7.21 a 7.22, jejichž experimentální chyba nepřesahuje $0,05^\circ$, rovněž potvrzují předchozí konstatování. V případě obou sledovaných vzorků jsou jejich hodnoty v *oblasti C* o cca $0,20^\circ$ větší než pro *oblasti A a E*.

Z tabulek tab. 7.21 a 7.22 je vidět, že na rozdíl od zbytkových napětí jsou hodnoty *W* u vzorku 4 o cca $0,20^\circ$ systematicky vyšší než šířky odpovídající vzorku 3.

Z toho lze soudit, že za daných podmínek opracování je povrchová vrstva vzorku 4 (*VBD*) podrobena výraznější plastické deformaci než vzorek 3 (*monolit*).

Na závěr je nutno poznamenat, že ani u jednoho ze sledovaných vzorků 3 (obrobený monolitním nástrojem) a 4 (obrobený nástrojem osazeným *VBD*) nebyly pozorovány statisticky významné rozdíly difrakčních charakteristik (σ_T a *W*), stanovených v *oblastech A a E* (boky drážky).

Odlišný způsob frézování (tab. 7.18), které se blíží nesouslednému frézování – *oblast A* (levý bok drážky) a souslednému frézování – *oblast E* (pravý bok drážky) se neprojevuje změnou zbytkových napětí a šířky difrakční linie (viz tab. 7.21 a 7.22).

- Porovnání vzorků 5 a 6:

Cílem tohoto srovnání je diskuse vlivu konstrukčního uspořádání nástroje a vlivu optimalizace programu pomocí software *NC Speed*. Použité nástroje v tomto experimentu byly opět monolitní fréza – nástroj č. 5 a frézovací hlava osazená výměnnými břitovými destičkami (*VBD*) – nástroj č. 6.

Na základě provedených měření uvedených v tab. 7.23 a 7.24 a znázorněných na obr. 7.50, 7.51, 7.52 a 7.53 lze učinit následující diskusi týkající se vlivu korekce posuvu pro obrábění konstantní třísky za podmínek v tab. 7.18.

V případě obou analyzovaných vzorků je patrné, že úrovně zbytkových napětí měřených *oblastí A, C a E* jsou kvalitativně odlišné. Přitom smysl (*tahy či tlaky*) a velikost hodnot

zbytkových napětí u vzorku 5 a 6 je ve shodě, ve všech analyzovaných oblastech tj. *A*, *C* a *E*. Tento fakt je viditelný s průměrných hodnot vynesenech v (tab. 7.23 a 7.24).

Oblast A vykazuje u obou vzorků tahová zbytková napětí v rozsahu 46 MPa až k hodnotám překračujícím více než čtyřnásobně odhad experimentální chyby (188 MPa). Charakter napětí je u měřených vzorků stejný. Na konci obrábění (místa *6k*, *11k*) jsou tahová zbytková napětí výrazně větší než na jeho začátku (místa *1z*, *6z*).

Zbytková napětí zjištěná v *oblasti C* jsou tlaková a velmi nehomogenní – u vzorku 5 se pohybují v rozpětí – 47 až – 435 MPa, u vzorku 6 je tento interval (– 69, – 428) MPa. Jejich průměrné hodnoty se u obou vzorků prakticky neliší (tab. 7.23 a 7.24). Na základě provedené difrakční analýzy není pozorována tendence změny naměřených hodnot napětí v průběhu obrábění.

Oblasti E vykazují výrazná tahová napětí v absolutní hodnotě srovnatelná s tlaky v *oblasti C*. Ani zde se vliv obráběcího nástroje neprojevuje nad rámec chyby měření.

Z tabulek 7.23 a 7.24 je patrné, že hodnoty šířky *W* difrakční linie $\{211\}$ jsou u jednotlivých vzorků shodné pro *oblasti A* a *E*, zatímco *oblast C* je charakterizována veličinou *W* větší o cca 0,3 až 0,5 °, tj. o šesti – až osminásobek odhadu experimentální chyby jejího stanovení. Nárůst hodnoty míry plastické deformace je (na rozdíl od vzorků 1 a 2 i 3 a 4, kde nárůst šířky difrakční linie činil pouze 0,2 °) statisticky významný. Tato skutečnost byla již vysvětlena (nulová řezná rychlost v ose nástroje). Dalším faktorem, který přispívá k navýšení míry plastické deformace je pravděpodobně korekce posuvu nástroje, která je řízena programem *NC Speed* a proto není konstantní (tab. 7.18).

Difrakční analýza prokázala kvalitativní odlišnost charakteristik naměřených v *oblastech A*, *C* a *E* obrobeného povrchu. Tyto rozdíly svědčí o tom, že průběh procesu řezání a jím způsobené nerovnoměrné plastické deformace vedoucí ke vzniku zbytkových makroskopických deformací v povrchové vrstvě obrobku, se v *oblastech A*, *C*, *E* navzájem liší. Pozorované rozdíly zjištěných difrakčních charakteristik odrážejí skutečnost, že povrch *C* (dno drážky) vzniká obráběním čelem nástroje, zatímco *oblasti A* a *E* jeho bokem. V případě *oblasti A* (levý bok drážky) se strategie obrábění blíží nesouslednému frézování zatímco v *oblasti E* (pravý bok drážky) se strategie obrábění naopak blíží souslednému frézování.

Při respektování experimentální chyby nebyl v rámci provedených měření pozorován vliv obráběcího nástroje (monolitní a osazený *VBD*) na hodnoty zbytkových makroskopických napětí.

Typ použité frézy neovlivnil významně ani hodnoty šířky *W* analyzované difrakční linie $\{211\}$ zjištěné na odpovídajících místech obou vzorků. Uvedená difrakční charakteristika *W* závisí na úrovni mikroskopických zbytkových napětí a velikosti krystalitů v povrchové vrstvě a je možné ji interpretovat jako míru plastické deformace.

- Porovnání vzorků 1 a 3:

Cílem tohoto srovnání je diskuse a formulace hlavních závěrů ohledně vlivu strategie obrábění malých rádiusů monolitní frézou. Na základě měření uvedených v tab. 7.19 a 7.21 (obr. 7.42, 7.43, 7.46 a 7.47) lze učinit následující diskusi týkající se vlivu strategie obrábění malých rádiusů monolitní frézou:

Změna strategie obrábění (rádiusy drážek byly nejdříve vybrány frézou *D12* a pak dokončeny monolitním nástrojem *D10*) u vzorku 3 vedla ke kvalitativní změně charakteru povrchové zbytkové napjatosti. Zatímco povrch vzorku 1 obrobený pouze monolitní frézou *D10* vykazuje jak tahová tak tlaková zbytková napětí (obr. 7.42), u vzorku 3 byla zjištěna pouze napětí tlaková (obr. 7.46).

Zbytková napětí *oblastí A a E* vzorku 1 (viz obr. 7.42) jsou významně odlišná. Tento vliv nesousledného (*oblast A*) a sousledného (*oblast E*) frézování nebyl u vzorku 3 (viz obr. 7.46) pozorován.

Šířky W difrakční linie $\{211\}$ naměřených u obou diskutovaných vzorků (obr. 7.43 a 7.47) se neliší významně, což svědčí o analogické úrovni plastické deformace obou studovaných povrchových vrstev.

- Porovnání vzorků 1, 3 a 5:

Cílem tohoto srovnání je diskuse a formulace hlavních závěrů ohledně vlivu strategie obrábění malých rádiusů (vzorek 1 – obroben frézou $D10$; vzorek 3 – obroben frézou $D12$ a pak $D10$) a korekce posuvu (vzorek 5 – fréza $D10$ a software *NC Speed*); vždy při použití monolitní frézy.

Porovnáním experimentálních hodnot uvedených v tab. 7.19, 7.21 a 7.23 a na obr. 7.42, 7.46 a 7.50 lze dospět k následující diskusi:

Změna strategie obrábění (použitím nejdříve frézu $D12$ a pak $D10$) vedla ke kvalitativní změně charakteru povrchové zbytkové napjatosti – zatímco povrch vzorků 1 a 5 vykazuje jak tahy, tak tlaky, u vzorku 3 byla zjištěna pouze napětí tlaková (viz obr. 7.54).

Zbytková napětí *oblastí A a E* vzorků 1 (obr. 7.42) a 5 (obr. 7.50) jsou významně odlišná. Tento vliv nesousledného (*oblast A*) a sousledného (*oblast E*) frézování nebyl u vzorku 3 (obr. 7.46) pozorován.

Zatímco šířky W difrakční linie $\{211\}$ naměřených u vzorků 1 (obr. 7.43) a 3 (obr. 7.47) se neliší významně, u vzorku 5 (obr. 7.51) je tato veličina výrazně větší, což svědčí o vyšší úrovni plastické deformace vzorku 5 v porovnání se studovanými povrchovými vrstvami vzorků 1 a 3.

- Porovnání vzorků 2 a 4:

Cílem tohoto srovnání je diskuse ohledně vlivu strategie obrábění malých rádiusů frézou osazenou *VBD*. Vzorek 2 byl obroben frézou $D10$ a u vzorku 4 byla nejdříve aplikována fréza $D12$ a následně byl povrch dokončen nástrojem $D10$ (viz tab. 7.18). Na základě měření uvedených v tab. 7.20 a 7.22 (obr. 7.44, 7.45, 7.48 a 7.49) lze učinit následující diskusi týkající se vlivu strategie obrábění malých rádiusů frézou osazenou *VBD*:

Změna strategie obrábění (použití frézy $D12$ a pak $D10$) vedla ke kvalitativní změně charakteru povrchové zbytkové napjatosti – zatímco povrch vzorku 2 (obr. 7.44) vykazuje jak tahy tak tlaky, u vzorku 4 (obr. 7.48) byla zjištěna pouze napětí tlaková.

Zbytková napětí *oblastí A a E* vzorku 2 (obr. 7.44) jsou významně odlišná. Tento vliv nesousledného (*oblast A*) a sousledného (*oblast E*) frézování nebyl u vzorku 4 (obr. 7.48) pozorován.

Šířky W difrakční linie $\{211\}$ naměřených u obou diskutovaných vzorků (viz obr. 7.45 a 7.49) se neliší významně, což svědčí o analogické úrovni plastické deformace obou studovaných povrchových vrstev.

- Porovnání vzorků 2, 4 a 6:

Cílem tohoto srovnání je diskuse a formulace hlavních závěrů ohledně vlivu strategie obrábění malých rádiusů (vzorek 2 – obroben frézou $D10$; vzorek 4 – obroben frézou $D12$ a pak $D10$) a korekce posuvu (vzorek 6 – fréza $D10$ a software *NC Speed*); vždy při použití frézovací hlavy s *VBD*.

Porovnáním experimentálních hodnot uvedených v tab. 7.20, 7.22 a 7.24 a na obr. 7.44, 7.48 a 7.52 lze dospět k následující diskusi:

Změna strategie obrábění (použití frézy *D12* a pak *D10*) vedla ke kvalitativní změně charakteru povrchové zbytkové napjatosti – zatímco povrch vzorků 2 a 6 vykazuje jak tahy, tak tlaky, u vzorku 4 byla zjištěna pouze napětí tlaková (viz obr. 7.55).

Zbytková napětí *oblastí A* a *E* vzorků 2 (obr. 7.44) a 6 (obr. 7.52) jsou významně odlišná. Tento vliv nesousledného (*oblast A*) a sousledného (*oblast E*) frézování nebyl u vzorku 4 (obr. 7.48) pozorován.

Zatímco šířky *W* difrakční linie $\{211\}$ naměřených u vzorků 2 (obr. 7.45) a 4 (obr. 7.49) se neliší významně, u vzorku 6 (obr. 7.53) je tato veličina výrazně větší, což svědčí o vyšší úrovni plastické deformace vzorku 6 v porovnání se studovanými povrchovými vrstvami vzorků 2 a 4.

7.4 Vliv parametrů integrity povrchu na životnost dynamicky a kontaktně namáhaných strojních součástí

Níže popsany experiment byl proveden za účelem analýzy rozložení zbytkových napětí v ocelových lištách, které tvoří funkční část vedení obráběcích strojů. Ocelové lišty jsou nalepeny v horní části segmentu vedení, jak je zřejmé z obr. 7.56. Byly zkoumány vlastnosti kalených lišt, které byly čelně frézovány nástroji od různých dodavatelů. U vybraných vzorků bylo také provedeno porovnání z hlediska dalších parametrů integrity povrchu. Byla zkoumána velikost koeficientu tření, opotřebení, zpevnění či odpevnění a mikrogeometrie obrobeneho povrchu. Výsledky měření výše uvedených vybraných parametrů integrity povrchu byly poskytnuty pro potřeby této disertační práce Katedrou obrábění a montáže na Fakultě strojní, TU v Liberci a Výzkumným centrem Nové technologie, ZČU v Plzni.

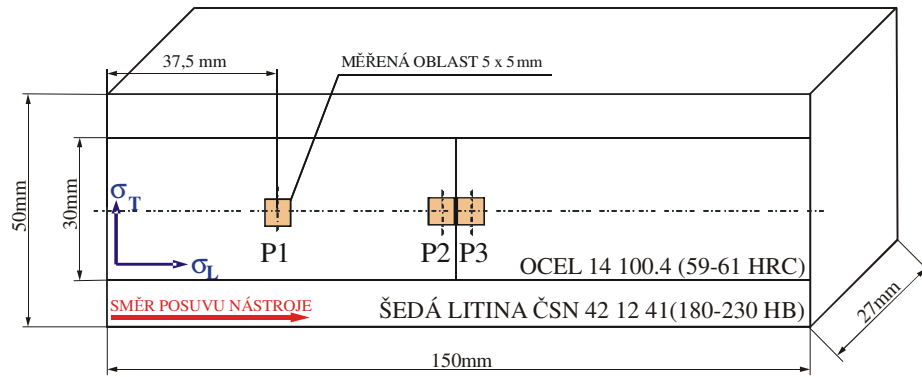
7.4.1 Zkoumané vzorky a použitá technologie

Vzorky o rozměrech 150×50×27 mm (obr. 7.57) byly vyříznuty ze segmentů vedení obráběcích strojů (obr. 7.56), které jsou kombinací litiny ČSN 42 12 41 (180 – 230 HB) a vlepených 30 mm ocelových lišt z materiálu 14 100.4 (0,95 – 1,05 % C, 0,35 – 0,60 % Mn, 0,17 – 0,37 % Si, 1,25 – 1,50 % Cr, max 0,035 % P, max 0,035 % S) o tvrdosti 59 – 61 HRC. Rozmístění vlepených ocelových lišt na loži obráběcího horizontálního centra je znázorněno na obr. 7.58 a 7.59.



Obr. 7.56 Segment z vedení obráběcího stroje z jehož horní části byl ve všech případech vyříznut zkušební vzorek (obr. 7.57)

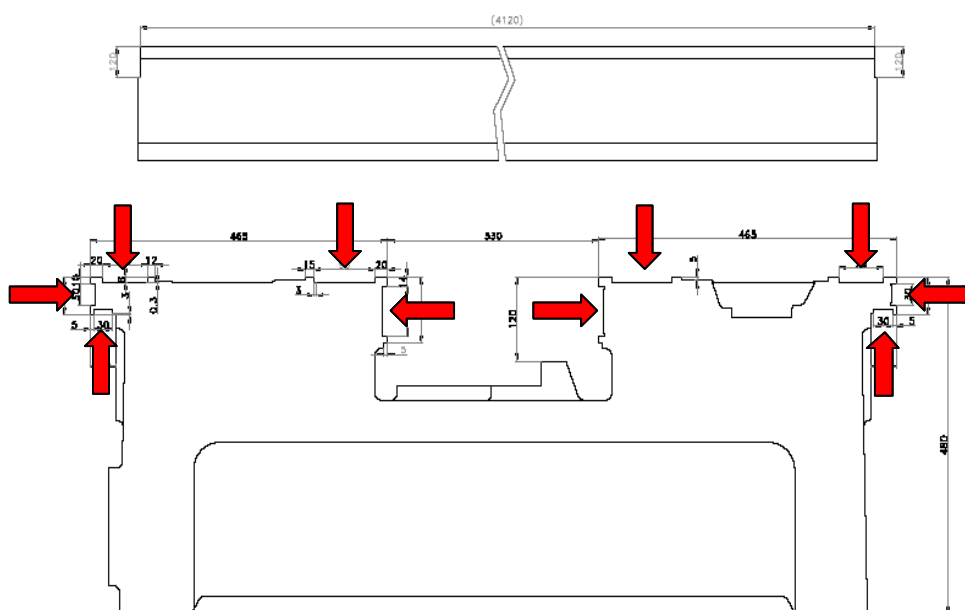
Čelní frézování bylo provedeno šesti typy obráběcích nástrojů a to nástroji *INGERSOLL (ING1, ING2)*, *SANDVIK (SA1, SA2, SA3)*, *SECO (SE1, SE2, SE3)*, *TUNGALOY (TST1, TST2)* a *WALTER (WA1, WA2, WA3)* vždy za použití odlišných hloubek řezu a různých řezných podmínek, jak je naznačeno v tabulkách 7.25 a 7.26.



Obr. 7.57 Schématické znázornění zkušební vzorku a zvolené sítě analyzovaných oblastí podrobených rtg difrakční tenzometrické analýze



Obr. 7.58 Horizontální vyvrtávačka, pro jejíž vedení byla prováděna analýza parametrů integrity povrchu



Obr. 7.59 Schématické znázornění umístění vedení na loži horizontální vyvrtávačky

Tab. 7.25 Řezné podmínky použité při frézování I

SECO			SANDVIK			INGERSOLL		Výrobce nástroje
SE3	SE2	SE1	SA3	SA2	SA1	ING2	ING1	Označení vzorků
1. až 7. tříška 0,3 mm <i>zleva doprava</i>	1. až 3. tříška 0,5 mm <i>zleva doprava</i>	1. až 3. tříška 0,5 mm <i>zprava doleva</i>	1. až 7. tříška 0,3 mm <i>zleva doprava</i>	1. až 4. tříška 0,5 mm <i>zleva doprava</i>	1. až 4. tř. = 0,5 mm <i>zprava doleva</i>	1. a 2. tříška 0,2 mm 3. a 4. tříška 0,7 mm	7x tříška 0,25 mm	Hloubka záběru (a_p)
$v_f = 1050 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ $n = 1768 \text{ min}^{-1}$			$v_f = 570 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ $n = 950 \text{ min}^{-1}$			$v_f = 540 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ $n = 180 \text{ min}^{-1}$	$v_f = 580 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ $n = 160 \text{ min}^{-1}$	Posuvová rychlost (v_f) Otáčky (n)
$v_c = 350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,1 \text{ mm}$			$v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,1 \text{ mm}$			$v_c = 90 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,3 \text{ mm}$	$v_c = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,25 \text{ mm}$	Řezná rychlost (v_c) Posuv na zub (f_z)
$\varnothing = 63 \text{ mm}$ $z = 6$			$\varnothing = 100 \text{ mm}$ $z = 6$			$\varnothing = 160 \text{ mm}$ $z = 12$		\varnothing Frézy Počet zubů (z)

Tab. 7.26 Řezné podmínky použité při frézování II

WALTER			TUNGALOY		Výrobce nástroje
WA3	WA2	WA1	TST II	TST I	Označení vzorků
1. až 7 tříška 0,3 mm	1. až 3 tříška 0,5 mm	1. tříška 0,3 mm 2 tříška 0,7 mm	1. až 5. tříška 0,4 mm	1. až 3.tř. = 0,1 mm 4.tř. = 0,2 mm 5.tř. = 0,3 mm 6.tř. = 0,4 mm 7.tř. = 0,6 mm 8.tř. = 0,8 mm 9.tř. = 0,05 mm 10.tř. = 0,1 mm 11.tř. = 0,05 mm	Hloubka záběru (a_p)
$v_f = 500 \text{ mm. min}^{-1}$ $n = 120 \text{ min}^{-1}$		$v_f = 400 \text{ mm. min}^{-1}$ $n = 120 \text{ min}^{-1}$	$v_f = 708 - 1711 \text{ mm. min}^{-1}$ $n = 1630 \text{ min}^{-1}$	$v_f = 443 \text{ mm. min}^{-1}$ $n = 1266 \text{ min}^{-1}$	Posuvová rychlost (v_f) Otáčky (n)
$v_c = 60 \text{ m. min}^{-1}$ $f_z = 0,17 \text{ mm}$			$v_c = 350 - 450 \text{ m.min}^{-1}$ $f_z = 0,08-0,15 \text{ mm}$	$v_c = 350 \text{ m. min}^{-1}$ $f_z = 0,05 \text{ mm}$	Řezná rychlost (v_c) Posuv na zub (f_z)
$\varnothing = 160 \text{ mm}$ $z = 24$			$\varnothing = 100 \text{ mm (88) mm}$ $z = 7$		\varnothing Frézy Počet zubů (z)

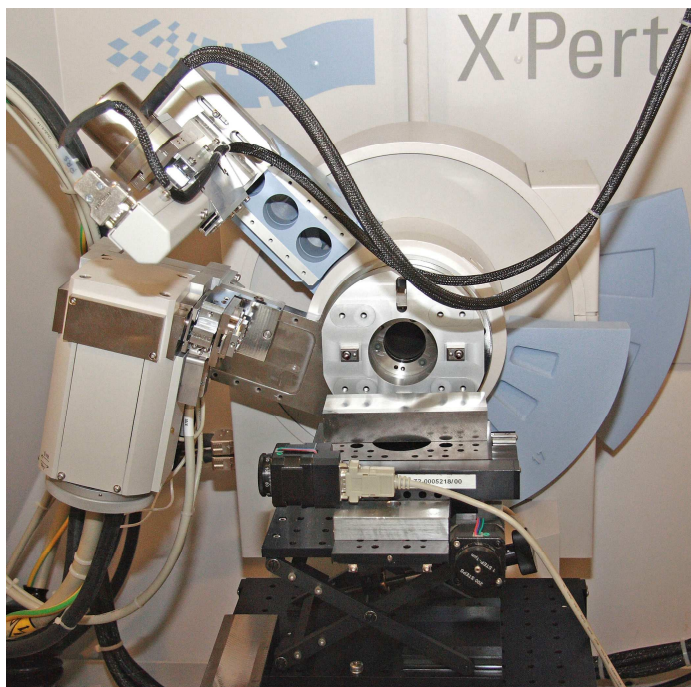
7.4.2 Použité analytické metody

Pro studium výsledné integrity povrchu a životnosti nově vzniklých vodících ploch byly použity následující metody měření: (1) Zbytkové napětí – *rentgenografická tenzometrická metoda “ $\sin^2\psi$ ”*, (2) Drsnost povrchu – *dotyková metoda*, (3) Mikrotvrdost povrchu – *metoda HV 0,2* a (4) Tribologická měření – *metoda Pin-on-disc*

(1) RENTGENOGRAFICKÁ TENZOMETRICKÁ METODA “ $\sin^2\psi$ ”

Měření zbytkového napětí bylo prováděno na θ/θ – goniometru *X'Pert PRO* se zářením rentgenky s chromovou anodou (viz obr. 7.60). Byla analyzovaná difrakční linie $\{211\}$ α -Fe. Hodnoty mřížkových deformací byly transformovány na napětí z experimentálně stanovených průběhů difrakčního úhlu $2\theta^{211}(\sin^2\psi)$ za předpokladu dvojosého stavu zbytkové napjatosti, kde ψ je úhel mezi povrchem vzorku a difraktujícími atomovými mřížkovými rovinami. Závislosti $2\theta^{211}(\sin^2\psi)$ byly měřeny ve dvou azimutech σ_T a σ_L [MPa]. K výpočtu makroskopických napětí byly použity rentgenografické elastické konstanty $\frac{1}{2}s_2 = 5,76 \cdot 10^{-6}$ [MPa⁻¹], $s_1 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ [MPa⁻¹]. Uvedenou experimentální chybu jednotlivých naměřených hodnot představuje směrodatná odchylka výpočtu zbytkových napětí metodou “ $\sin^2\psi$ ” [48].

Mikrodeformace ε_{micro} byly stanoveny pomocí analýzy profilů difrakční linie $\{211\}$. Pro korekci instrumentálního rozšíření a určení mikrodeformací a velikostí částic byla aplikována metoda jedné linie [65].

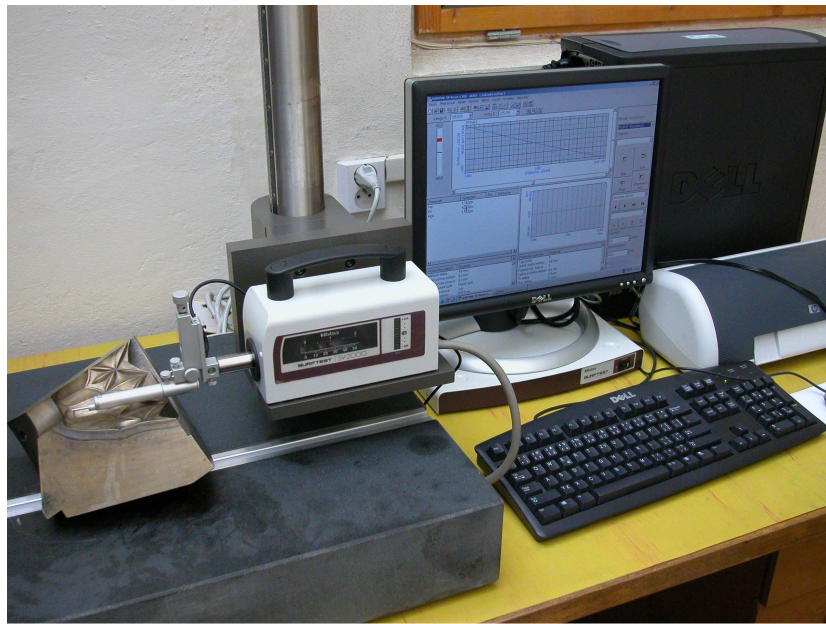


Obr. 7.60 Rentgenový difraktometr *X'Pert PRO PANalytical*

(2) DRSNOST POVRCHU [Ra]

Měření drsnosti povrchu bylo provedeno dotykovou metodou pomocí laboratorního drsnoměru *Mitutoyo Surftest SV-2000* (viz obr. 7.61). Pro měření kalených lišt byl vybrán standardní snímač č. *12AAB403* s rádiusem $5\mu\text{m}$ a vrcholovým úhlem 90° . Délka dráhy snímače byla 4,0 mm a mezní vlnová délka cut – off 0,8 mm. Hodnoty průměrné aritmetické

úchytky posuzovaného profilu Ra byly statisticky zpracovány. Každá dále uváděná výsledná hodnota představuje střední hodnotu získanou z pěti měření, která byla provedena opakovaně na každém hodnoceném místě.



Obr. 7.61 Laboratorní drsnoměr *Mitutoyo Surftest SV-2000*

Kvalita povrchu strojních dílů je důležitým parametrem zajišťujícím funkčnost a často i estetickou hodnotu vyrobené součásti. Jedním ze základních parametrů definujících kvalitu povrchu je jeho drsnost. Drsnost je souhrn nerovností povrchu s relativní malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem (každá metoda obrábění zanechává na povrchu charakteristické stopy). Nejvýznamnějšími prvky tohoto vlivu jsou řezná rychlost, posuv, tvar nástroje, opotřebení nástroje apod. Do drsnosti se nepočítají vady povrchu, tj. náhodné nepravidelné nerovnosti, které se vyskytují jen ojediněle (rysky, trhlinky, důlky apod.) a které vznikají vadami materiálu, poškozením apod.

K měření struktury povrchu se používají speciální jednoúčelové měřicí přístroje, profilometry, které umožňují snímání profilu proměřovaného povrchu. Nasnímaná data se musí samozřejmě vyhodnotit a to buď přímo přístrojem, což přináší pouze omezené možnosti, nebo připojeným počítačem, jenž umožňuje po získání dat z měřicího zařízení jejich zpracování pomocí softwaru k tomu určenému.

Drsnost povrchu je nutné měřit kolmo na směr nerovností, neboť jinak dochází ke zkreslení pohledu na povrch, který se při nesprávně zvoleném směru jeví lepším, než ve skutečnosti je. Toto platí u součástí vyrobených třískovým způsobem (soustružení, frézování, vrtání, broušení, hoblování...), kde nástroj vytváří na obrobeném povrchu vrypy a tento směr je tedy jasně zřetelný. Pokud je součást odlita nebo vykována a nástroj tedy působí na povrch součásti odlišným způsobem, tato zřetelnost se neprojevuje a pak na směr snímání nezáleží, ale je nutné ho v průběhu měření měnit.

Při samotném procesu zkoumání povrchu profiloměrem je důležité tento povrch vyrovnat, aby nedocházelo k přílišnému zešíkmení průběhu profilové křivky a tím ke zkreslení vlastního měření tím, že se snímací hrot nepohybuje kolmo k povrchu a neudává úplně správné výsledky. Tento proces není jednoduchý, neboť se velmi často pohybujeme v rozmezí několika mikrometrů. Další samozřejmou proceduru tvoří očištění a odmaštění součásti.

(3) MIKROTVRDOST POVRCHU [μHV]

Hodnoty mikrotvrdomosti byly získány na mikrotvrdoměru *Buehler MICROMET 2100* (viz obr. 7.62) při zatěžovací síle 200 g.



Obr. 7.62 Mikrotvrdoměr *Buehler MICROMET 2100*

Zkouška mikrotvrdomosti spočívá ve vtláčování indentoru daného tvaru do zkušebního tělesa při zkušebním zatížení působícím v kolmém směru po stanovenou dobu. Následně je změřen rozměr vtisku, který zůstane na povrchu hodnoceného vzorku po odlehčení zatížení.

Měření se obvykle provádí na mikrotvrdoměrech, které mají různý rozsah zatížení indentoru a které jsou spojeny s optickým mikroskopem pro změření velikosti vytvořeného vtisku. Měření mikrotvrdomosti je jednoduchá a rozšířená metoda, která poskytuje informace o elastických a plastických vlastnostech pevných látek v lokálních objemech. Interpretace výsledků však naráží na některé problémy, protože naměřené hodnoty mikrotvrdomosti nemají fyzikální význam a jsou ovlivňovány řadou činitelů (tvar a vlastnosti indentoru, dynamika procesu tvorby vtisku a doba působení indentoru, vnitřní vibrace přístroje, vnější vibrace, lidský faktor při vytváření a měření vtisku). Tyto jevy mají nezanedbatelný vliv zvláště v oblasti nízkých hodnot zatěžovací síly, kde způsobují závislost naměřené hodnoty mikrotvrdomosti na velikosti zatížení indentoru.

Při snižování zatížení roste rovněž vliv drsnosti povrchu, tření a odlišných vlastností povrchových vrstev materiálu. Při nízkých zatíženích ovlivňují naměřené hodnoty také dislokační struktury a mechanismy, hranice zrn a jejich orientace, nehomogenita deformace a další faktory.

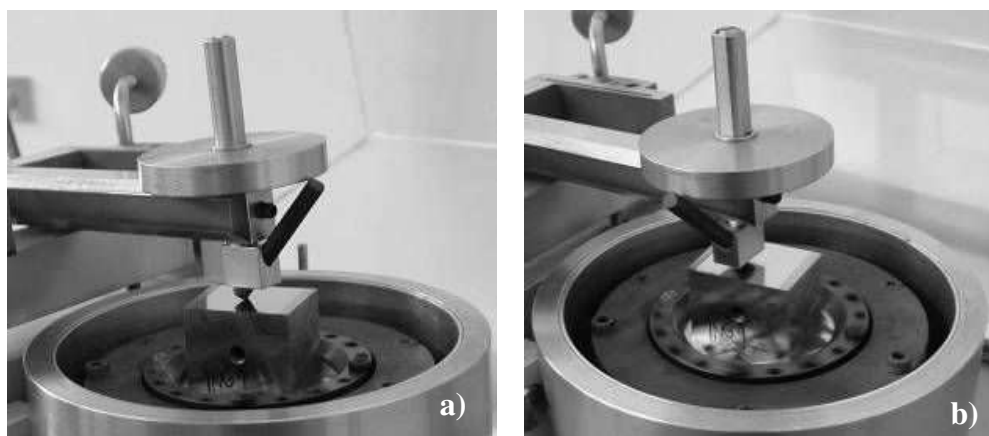
Dále uváděné hodnoty mikrotvrdomosti povrchu představují střední hodnotu získanou z osmnácti měření provedených opakovaně na každém hodnoceném místě povrchu vzorku.

(4) TRIBOLOGICKÁ MĚŘENÍ

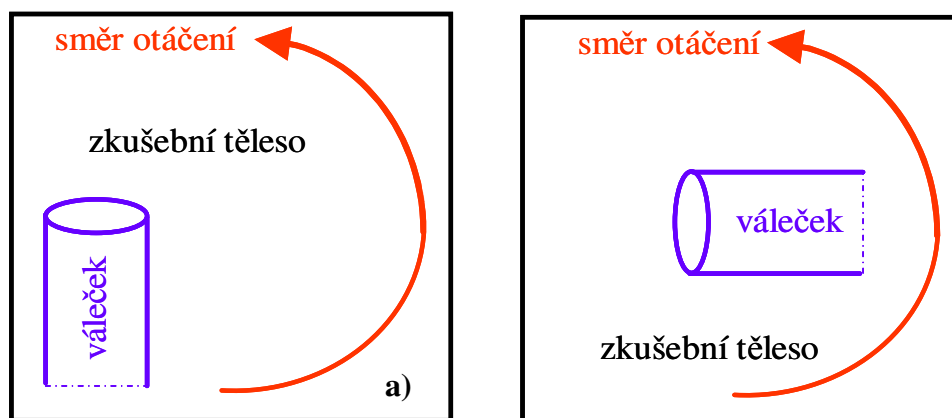
Základem tribologických měření je testování metodou *Pin-on-disc*. Měření spočívá ve vtláčování pevně uchyceného zkušebního tělíska („PIN“) ve tvaru kuličky ze zvoleného materiálu předem definovanou silou do disku (*zkušebního vzorku*). Nejdůležitější částí zařízení je elastické rameno ve kterém je uchycen přípravek do kterého se vkládá „PIN“

tělíska. Nezbytnou součástí je i třecí snímač. Koeficient tření mezi tělískem a diskem je určován během testu měřením odchylky elastického ramene. Disk se vkládá do „sklíčidla“, které se otáčí námi zvolenou rychlostí v rozmezí od 10 do 500 otáček za minutu. Rameno je možné zatížit silou 1 – 10 N.

Koeficient tření byl stanoven použitím tribometru od firmy CSM. Povrch vzorku po *Pin-on-disc* testu byl pozorován optickým a elektronovým mikroskopem. Test byl prováděn při dvou experimentálních uspořádáních (viz obr. 7.63 a 7.64) za použití válečku z polymerního materiálu o průměru 5,5 mm, při konstantním zatížení 2 N a při pokojové teplotě. Při prvním experimentálním uspořádání (obr. 7.63a a 7.64a) je tzv. hrana polymerního válečku orientována ve směru otáčení zkušební tělesa. Při druhém experimentálním uspořádání (obr. 7.63b a 7.64b) je tzv. hrana polymerního válečku orientována kolmo na směr otáčení zkušební tělesa.



Obr. 7.63 a) Experimentální uspořádání 1 a b) experimentální uspořádání 2 při *Pin-on-disc* testu



Obr. 7.64 Schématické znázornění a) experimentálního uspořádání 1 a b) experimentálního uspořádání 2 při *Pin-on-disc* testu

7.4.3 Metodika měření zbytkových napětí na obrobeném povrchu

Rentgenografická tenzometrická analýza byla provedena na třech vybraných místech, označených *P1*, *P2* a *P3* (viz obr. 7.57). Analyzovaná oblast měla tvar čtverce o straně 5x5 mm a byla měřena jak ve směru posuvu nástroje σ_L [MPa] tak i ve směru kolmém tj. σ_T [MPa].

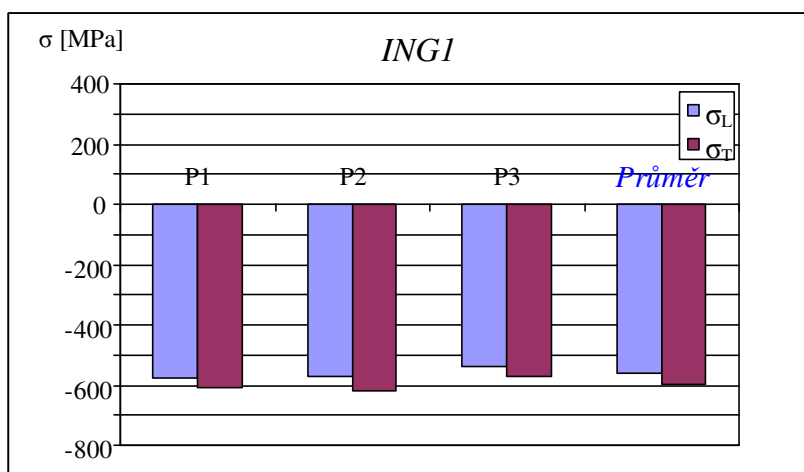
7.4.4 Výsledky měření zbytkových napětí na obrobeném povrchu

V následujících tabulkách 7.27 až 7.38 jsou uvedeny hodnoty makroskopických zbytkových napětí z jednotlivých oblastí $P1$, $P2$, $P3$ a jejich průměrné hodnoty získané rtg difrakční metodou „ $\sin^2\psi$ “ a to jak ve směru posuvu nástroje σ_L [MPa], tak i ve směru kolmém tj. σ_T [MPa]. Na obr. 7.65 až 7.77 jsou získané výsledky makroskopických zbytkových napětí znázorněny graficky ve formě sloupcových grafů. Chyba jednotlivých naměřených hodnot činí cca 15 – 20 MPa.

Zbytková napětí naměřená na povrchu vzorků obráběných nástroji *INGERSOLL (ING1 a ING2)*

Tab. 7.27 Hodnoty zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa] u vzorku *ING1*

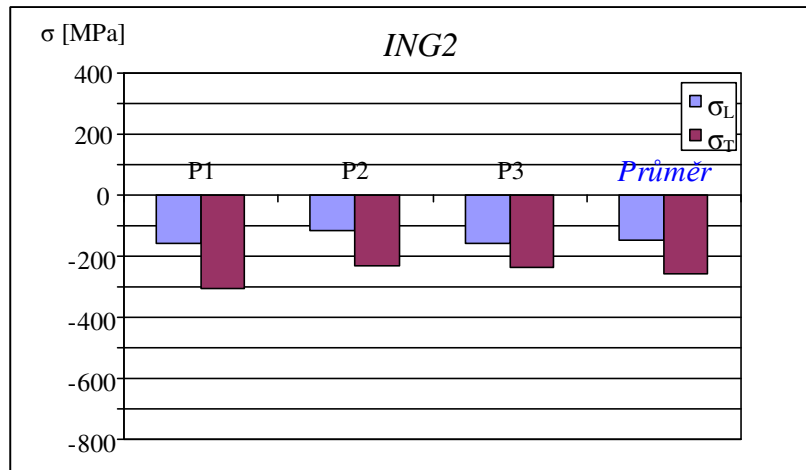
Oblast	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]
<i>P1</i>	-576	-606
<i>P2</i>	-570	-618
<i>P3</i>	-537	-568
<i>Průměr</i>	-561	-597



Obr. 7.65 Makroskopická zbytková napětí σ_L , σ_T [MPa] na povrchu vzorku *ING1*

Tab. 7.28 Hodnoty zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa] u vzorku *ING2*

Oblast	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]
<i>P1</i>	-158	-303
<i>P2</i>	-118	-230
<i>P3</i>	-160	-236
<i>Průměr</i>	-145	-256

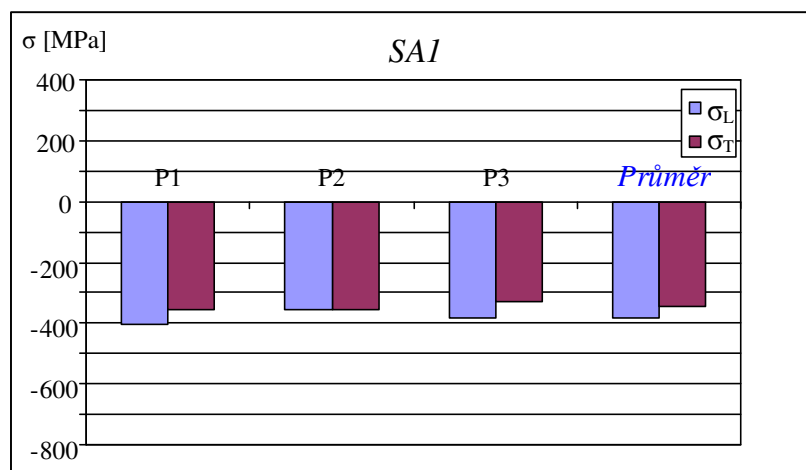


Obr. 7.66 Makroskopická zbytková napětí σ_L , σ_T [MPa] na povrchu vzorku ING2

Zbytková napětí naměřená na povrchu vzorků obráběných nástroji SANDVIK (SA1, SA2 a SA3)

Tab. 7.29 Hodnoty zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa] u vzorku SA1

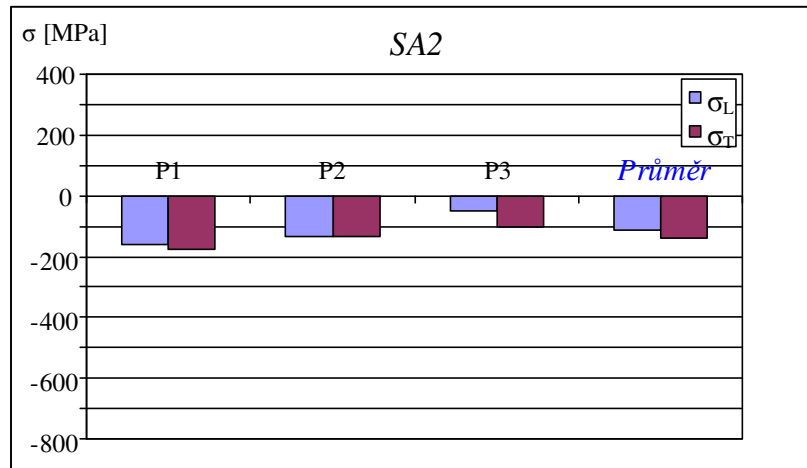
Oblast	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]
P1	-406	-355
P2	-355	-354
P3	-382	-331
Průměr	-381	-347



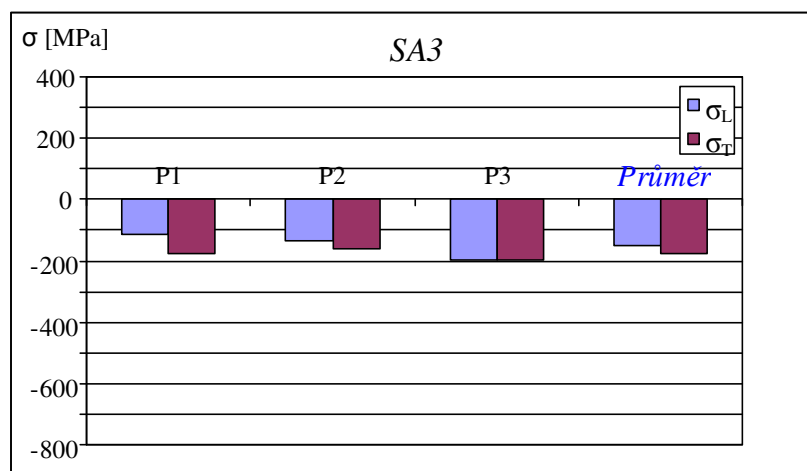
Obr. 7.67 Makroskopická zbytková napětí σ_L , σ_T [MPa] na povrchu vzorku SA1

Tab. 7.30 Hodnoty zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa] u vzorku SA2

Oblast	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]
P1	-159	-174
P2	-132	-136
P3	-47	-101
<i>Průměr</i>	<i>-113</i>	<i>-137</i>

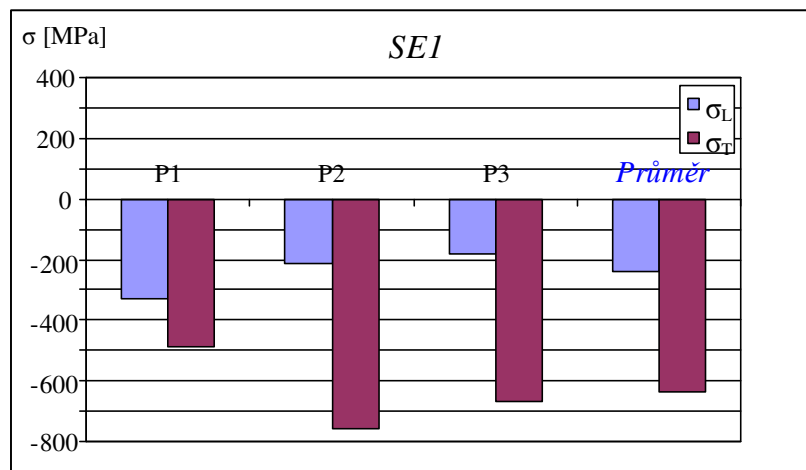
Obr. 7.68 Makroskopická zbytková napětí σ_L , σ_T [MPa] na povrchu vzorku SA2Tab. 7.31 Hodnoty zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa] u vzorku SA3

Oblast	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]
P1	-114	-175
P2	-137	-163
P3	-198	-199
<i>Průměr</i>	<i>-150</i>	<i>-179</i>

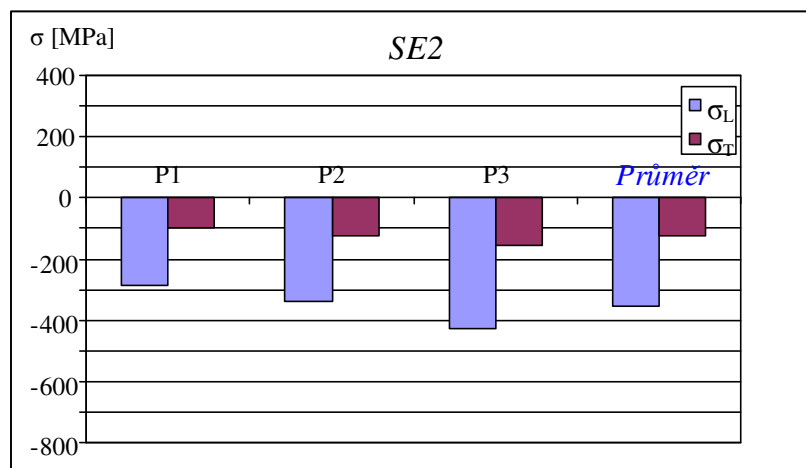
Obr. 7.69 Makroskopická zbytková napětí σ_L , σ_T [MPa] na povrchu vzorku SA3

Zbytková napětí naměřená na povrchu vzorků obráběných nástroji SECO (SE1, SE2 a SE3)Tab. 7.32 Hodnoty zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa] u vzorku SE1

Oblast	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]
P1	-327	-486
P2	-215	-757
P3	-182	-668
<i>Průměr</i>	<i>-241</i>	<i>-637</i>

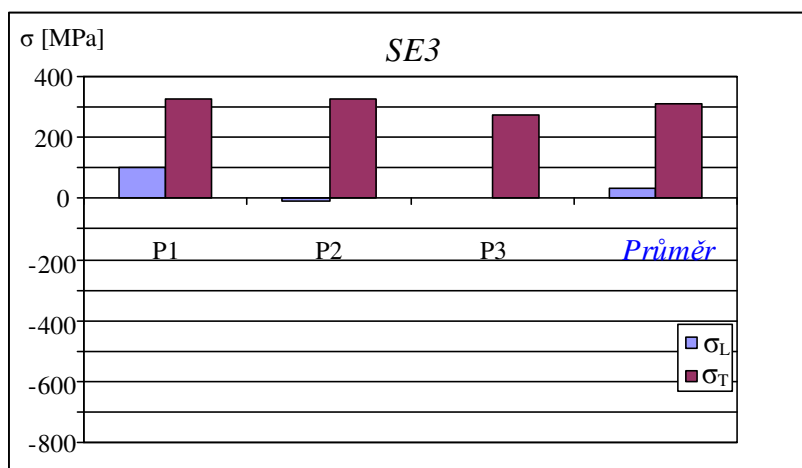
Obr. 7.70 Makroskopická zbytková napětí σ_L , σ_T [MPa] na povrchu vzorku SE1Tab. 7.33 Hodnoty zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa] u vzorku SE2

Oblast	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]
P1	-289	-98
P2	-341	-124
P3	-430	-154
<i>Průměr</i>	<i>-353</i>	<i>-125</i>

Obr. 7.71 Makroskopická zbytková napětí σ_L , σ_T [MPa] na povrchu vzorku SE2

Tab. 7.34 Hodnoty zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa] u vzorku *SE3*

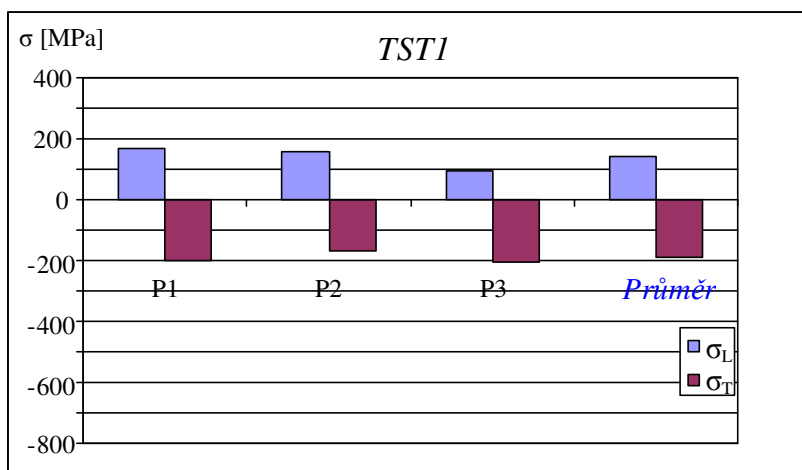
Oblast	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]
<i>P1</i>	103	329
<i>P2</i>	-11	329
<i>P3</i>	1	274
<i>Průměr</i>	31	311

Obr. 7.72 Makroskopická zbytková napětí σ_L , σ_T [MPa] na povrchu vzorku *SE3*

Zbytková napětí naměřená na povrchu vzorků obráběných nástroji *TUNGALOY* (*TST1* a *TST2*)

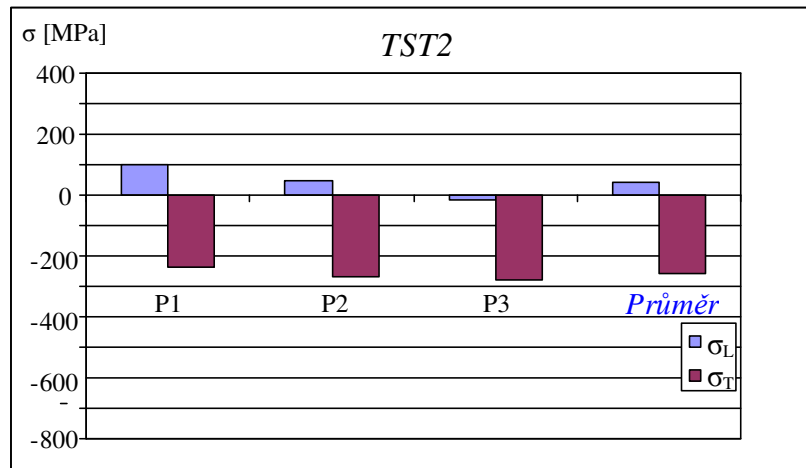
Tab. 7.35 Hodnoty zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa] u vzorku *TST1*

Oblast	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]
<i>P1</i>	169	-201
<i>P2</i>	156	-168
<i>P3</i>	95	-203
<i>Průměr</i>	140	-191

Obr. 7.73 Makroskopická zbytková napětí σ_L , σ_T [MPa] na povrchu vzorku *TST1*

Tab. 7.36 Hodnoty zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa] u vzorku TST2

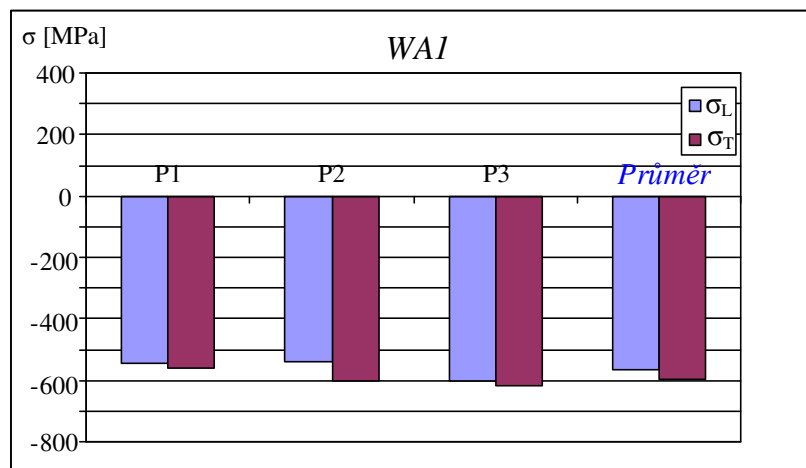
Oblast	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]
P1	99	-237
P2	46	-267
P3	-15	-277
<i>Průměr</i>	<i>43</i>	<i>-260</i>

Obr. 7.74 Makroskopická zbytková napětí σ_L , σ_T [MPa] na povrchu vzorku TST2

Zbytková napětí naměřená na povrchu vzorků obráběných nástroji WALTER (WA1, WA2 a WA3)

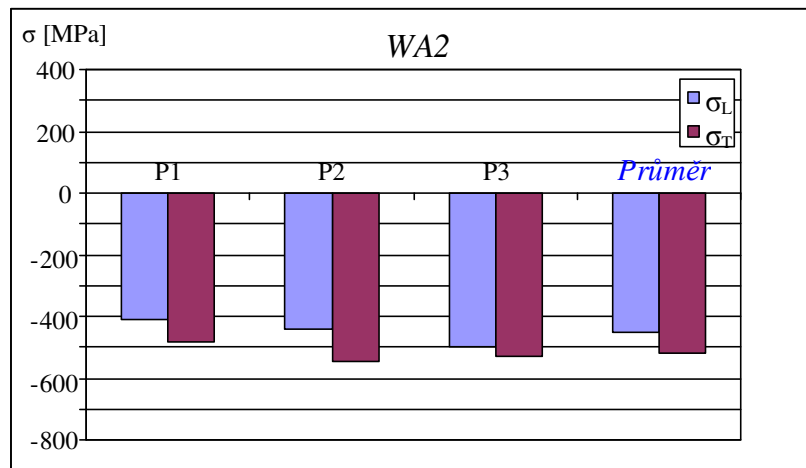
Tab. 7.77 Hodnoty zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa] u vzorku WA1

Oblast	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]
P1	-544	-561
P2	-541	-602
P3	-604	-619
<i>Průměr</i>	<i>-563</i>	<i>-594</i>

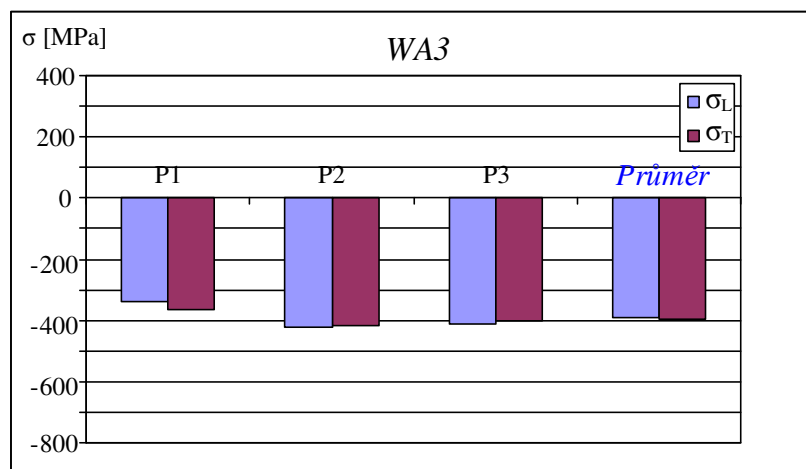
Obr. 7.75 Makroskopická zbytková napětí σ_L , σ_T [MPa] na povrchu vzorku WA1

Tab. 7.38 Hodnoty zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa] u vzorku WA2

Oblast	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]
P1	-408	-483
P2	-443	-545
P3	-501	-532
<i>Průměr</i>	<i>-451</i>	<i>-520</i>

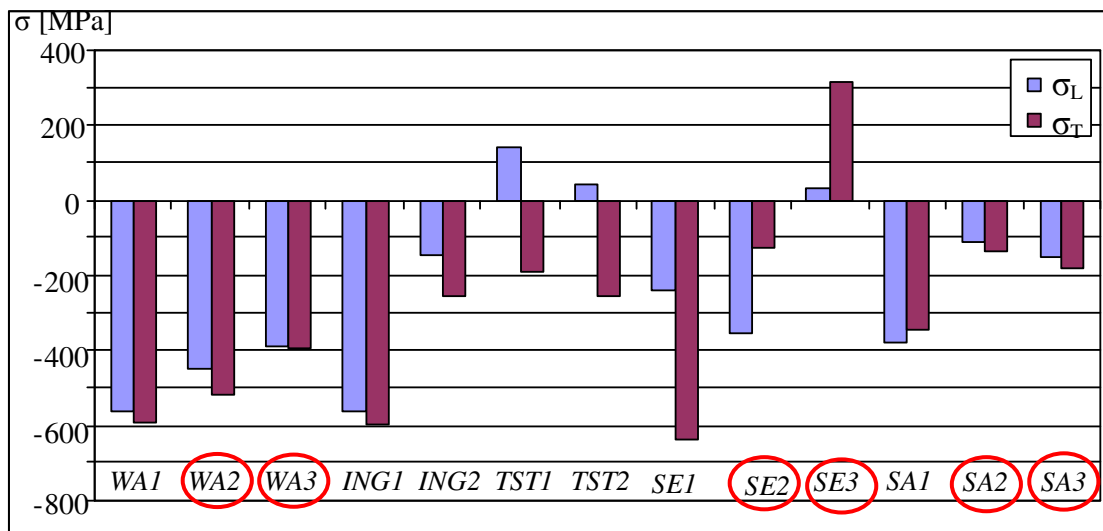
Obr. 7.76 Makroskopická zbytková napětí σ_L , σ_T [MPa] na povrchu vzorku WA2Tab. 7.39 Hodnoty zbytkových napětí σ_L a σ_T [MPa] u vzorku WA3

Oblast	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]
P1	-340	-363
P2	-421	-420
P3	-410	-401
<i>Průměr</i>	<i>-390</i>	<i>-395</i>

Obr. 7.77 Makroskopická zbytková napětí σ_L , σ_T [MPa] na povrchu vzorku WA3

7.4.5 Souhrn výsledků zbytkových napětí

Na následujícím obr. 7.78 jsou ve formě sloupcového grafu vyneseny průměrné hodnoty makroskopických zbytkových napětí z oblastí *P1*, *P2* a *P3* získané rtg difrakční metodou $\sin^2\psi$. A to jak ve směru posuvu nástroje σ_L [MPa], tak i ve směru kolmém tj. σ_T [MPa]. Vzorky *WA2*, *WA3*, *SE2*, *SE3*, *SA2* a *SA3*, které jsou značeny červeně byly vybrány k analýze dalších parametrů integrity povrchu, viz další kapitola 7.4.7.

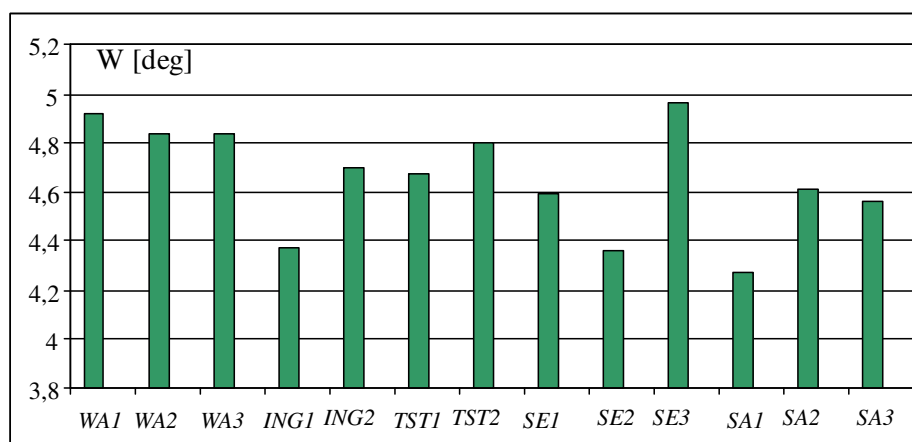


Obr. 7.78 Průměrné hodnoty zbytkových napětí σ_L , σ_T [MPa] naměřené na povrchu analyzovaných vzorků

V následující tabulce 7.40 jsou znázorněny průměrné hodnoty šířky difrakční linie $\{211\}$ α -Fe z oblasti *P1*, *P2* a *P3* získané rtg difrakční metodou $\sin^2\psi$ při $\psi = 0$ a na obr. 7.79 jsou hodnoty vyneseny ve formě sloupcového grafu.

Tab. 7.40 Průměrné hodnoty šířky difrakční linie $\{211\}$ α -Fe *W* [deg] naměřené na povrchu analyzovaných vzorků

	WA1	WA2	WA3	ING1	ING2	TST1	TST2	SE1	SE2	SE3	SA1	SA2	SA3
<i>W</i> , [deg]	4,92	4,84	4,84	4,37	4,70	4,67	4,80	4,59	4,36	4,96	4,27	4,61	4,56



Obr. 7.79 Průměrné hodnoty šířky difrakční linie $\{211\}$ α -Fe *W* [deg] naměřené na povrchu analyzovaných vzorků

7.4.6 Diskuse výsledků rentgenografické tenzometrické analýzy

Za účelem zjištění místních nehomogenit difrakčních charakteristik byly na každém tělese zkoumány 3 oblasti ($P1$, $P2$ a $P3$) opracovaného povrchu, na nichž bylo zbytkové napětí měřeno ve dvou navzájem kolmých azimutech – ve směru obrábění σ_L [MPa] a kolmo k němu σ_T [MPa].

Na všech vzorcích obrobených nástroji *INGERSOLL* (obr. 7.65 a 7.66), *SANDVIK* (obr. 7.67, 7.68 a 7.69) a *WALTER* (obr. 7.75, 7.76 a 7.77) byla naměřená příznivá tlaková napětí, a to v obou zkoumaných směrech. Závislost zbytkových napětí na směru měření je u těchto vzorků nevýrazná s výjimkou vzorku obrobený nástrojem *ING2* (viz obr. 7.66).

Vzorek obrobený nástrojem *SE3* (obr. 7.72) jako jediný vykazuje tahová napětí v obou vyšetřovaných směrech. Přitom je zde pozorována významná směrová závislost a platí, že $\sigma_T = 10 \sigma_L$. Tento efekt je pravděpodobně způsoben malým průměrem nástroje, což způsobuje redistribuci řezných sil při samotném obráběcím procesu. Řezné síly u nástroje *SECO* byly pravděpodobně znatelně odlišné vůči ostatním nástrojům.

Zatímco u vzorků obrobených nástrojem *INGERSOLL* a *SANDVIK* zbytkové tlaky klesají se zvětšující se hloubkou záběru, povrchy obrobené nástroji *WALTER* vykazují opačnou tendenci (viz obr. 7.78). Tento efekt může být zapříčiněn více faktory, např. způsobem odvodu tepla z místa řezu při změně hloubky záběru nebo tvarem a geometrií vyměnitelných břitových destiček. Také je nutné uvažovat o soustavě stroj – nástroj – obrobek, kdy za určitých podmínek může docházet k nestabilitě řezu i k tvorbě nárůstu.

Značný rozdíl hloubky záběru u vzorků obrobených nástrojem *TST1* (obr. 7.73) a *TST2* (obr. 7.74) nevyvolal očekávanou výraznou změnu napětí na obrobených plochách. Tento efekt může být důsledkem velkého nárůstu posuvu nástroje při téměř stejné řezné rychlosti (viz tab. 7.26).

Charakteristickou vlastností projevující se pouze u nástroje *SECO* je velká citlivost zbytkových napětí na hloubce záběru. S klesající hloubkou záběru z 0,5 mm (*SE1* – obr. 7.70) a (*SE2* – obr. 7.71) na 0,3 mm (*SE3* – obr. 7.72) se mění tlakové zbytkové napětí na tahové zbytkové napětí (viz obr. 7.78) a to jak ve směru posuvu nástroje σ_L [MPa] tak ve směru kolmém σ_T [MPa].

Vliv strategie obrábění (přejezd nástroje zleva doprava a obráceně) na zbytkových napětích při konstantních ostatních podmínkách je patrný jak pro vzorky obrobené nástrojem *SANDVIK*, tak i pro vzorky obrobené nástrojem *SECO*. Zatímco nástroj *SANDVIK* ovlivňuje stejně obě měřené složky napětí σ_L a σ_T [MPa], v případě nástroje *SECO* se navíc jejich poměr mění.

7.4.7 Drsnost povrchu, mikrotvrdość a tribologie vybraného souboru vzorků

K tomuto experimentálnímu zkoumání bylo vybráno šest vzorků (viz obr. 7.78) s označením *SA2*, *SA3* (vzorky frézovány nástroji *SANDVIK*), *SE2*, *SE3* (vzorky frézovány nástroji *SECO*), *WA2* a *WA3* (vzorky frézovány nástroji *WALTER*). V následující tabulce 7.41 jsou pro přehlednost znovu uvedeny základní parametry procesů při jejich opracování.

Čelní frézování bylo provedeno třemi typy obráběcích nástrojů, a to nástroji *SECO* (*SE2* a *SE3*), *SANDVIK* (*SA2* a *SA3*) a *WALTER* (*WA2* a *WA3*) vždy za použití dvou odlišných hloubek řezu a odlišných pracovních podmínek, jak je naznačeno v tabulce 7.41.

Tab. 7.41 Použité řezné podmínky při obrábění vzorků

vzorek	a_p [mm]	z [-]	d [mm]	v_f [mm·min ⁻¹]	v_c [m·min ⁻¹]	f_z [mm]
<i>SE2</i>	0,5	3	63	1050	350	0,10
<i>SE3</i>	0,3	7				
<i>SA2</i>	0,5	4	100	570	300	0,10
<i>SA3</i>	0,3	7				
<i>WA2</i>	0,5	3	160	500	60	0,17
<i>WA3</i>	0,3	7				

Tab. 7.42 Vybrané parametry integrity povrchu získané z obrobených ploch zkoumaných vzorků

vzorek	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]	$\varepsilon_{micro} \times 10^4$	Ra [μm]	$HV 0,2$
<i>SE2</i>	- 353	- 125	24,7	0,09	762
<i>SE3</i>	+ 31	+ 311	30,4	0,14	758
<i>SA2</i>	- 113	- 137	29,7	0,23	769
<i>SA3</i>	- 150	- 179	28,4	0,22	762
<i>WA2</i>	- 451	- 520	35,9	0,75	835
<i>WA3</i>	- 390	- 395	36,7	0,71	818

Získané experimentální výsledky vybraných charakteristik integrity povrchu jsou shrnuty v tabulce 7.42, přičemž výsledky získané rentgenovou diffrakcí, tj. makroskopická zbytková napětí σ_L , σ_T [MPa], mikrodeformace ε_{micro} a dále potom parametr drsnosti povrchu Ra [μm] jsou průměrnou hodnotou z oblastí *P1*, *P2* a *P3*. Mikrotvrdost $HV 0,2$ je střední hodnotou z 18 míst v rámci analyzovaného povrchu.

Experimentální chyba měření makroskopického zbytkového napětí $\Delta\sigma$ nepřesahuje 20 MPa, $\Delta\varepsilon_{micro} < 3 \cdot 10^{-4}$ a hodnota $HV 0,2$ je udávána s 95 % intervalem spolehlivosti, který je menší než 1 % z uváděných hodnot.

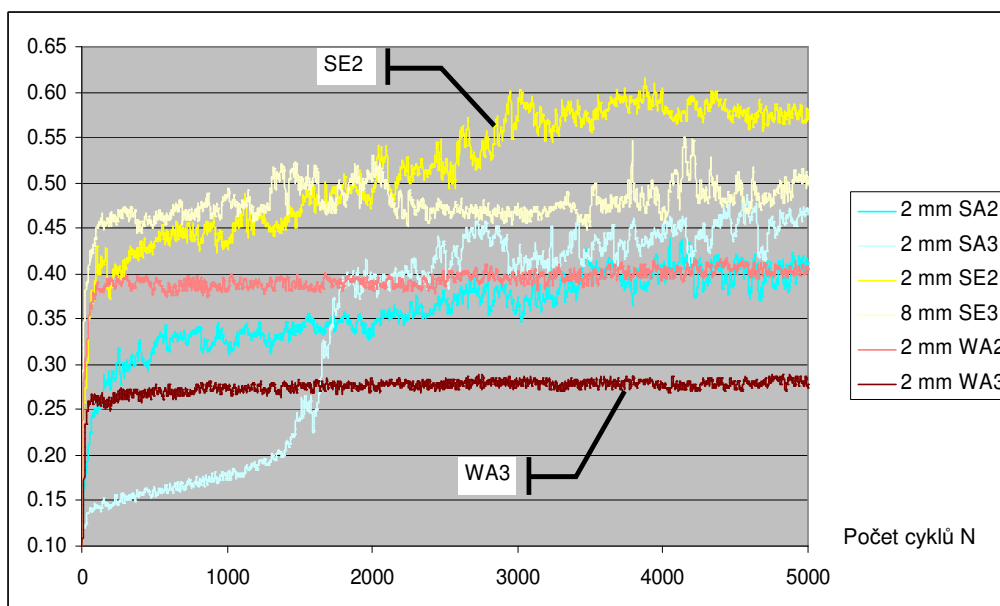
V tabulce 7.43 jsou shrnuty výsledky stanoveného koeficientu tření na površích experimentálních vzorků. Měření bylo realizováno při experimentálním uspořádání 1 (obr. 7.63a a 7.64a) i při experimentálním uspořádání 2 (obr. 7.63b a 7.64b). Z naměřených výsledků je patrný markantní vliv drsnosti povrchu, který při tzv. reálném kontaktu kluzného tření (viz kap. 6.1.1.1) má zásadní vliv na velikost koeficientu tření, oproti způsobu pohybu (exp. uspořádání 1 a 2) při zachování konstantních ostatních proměnných, tj. typ materiálové dvojice, přítomnost lubrikantu, teplota či časové stádium vzájemného pohybu.

Tab. 7.43 Vynesené hodnoty koeficientu tření a jejich standardní odchylky pro všechny analyzované povrchy pro experimentální uspořádání 1 i 2 (viz obr 7.63 a 7.64)

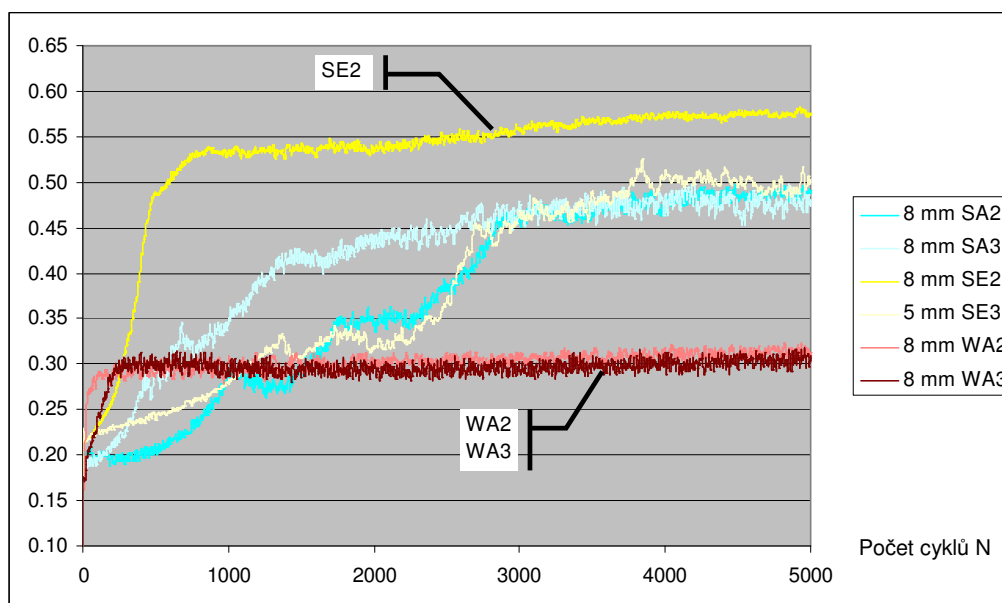
vzorek	Koeficient tření	
	<i>experimentální uspořádání 1</i>	<i>experimentální uspořádání 2</i>
SE2	0,516 ± 0,067	0,528 ± 0,079
	0,512 ± 0,067	0,483 ± 0,035
SE3	0,478 ± 0,024	0,389 ± 0,045
	-----	0,385 ± 0,100
SA2	0,360 ± 0,043	0,374 ± 0,105
	0,447 ± 0,076	0,374 ± 0,101
SA3	0,344 ± 0,120	0,416 ± 0,081
	0,446 ± 0,075	0,423 ± 0,062
WA2	0,394 ± 0,015	0,303 ± 0,019
	0,397 ± 0,014	0,310 ± 0,022
WA3	0,275 ± 0,021	0,295 ± 0,021
	0,290 ± 0,015	0,309 ± 0,019

Na následujících obr. 7.80 a 7.81 jsou znázorněny časové průběhy změny koeficientu tření. Z obr. 7.80 vzorek SA3 (exp. uspořádání 1) a z obr. 7.81 vzorky SA2, SA3 a SE 3 (exp. uspořádání 2), lze dle teorie popsané v kap. 6.1.1.1 předpokládat tzv. první stádium tření, které je charakteristické tím, že dominantní je mechanismus rýhování povrchu ostrými nerovnostmi. Také se uplatňuje mechanismus postupné deformace povrchových nerovností. Adhezní mechanismus neovlivňuje výrazně koeficient tření, protože povrch materiálu bývá kontaminován cizími částicemi. Koeficient tření není v této fázi závislý na podmínkách tření ani na materiálu kluzné dvojice.

Z časových průběhů koeficientu tření je u vzorku SA3 (exp. upořádání 1) a vzorků SA2, SA3 a SE3 (exp. uspořádání 2) viditelné tzv. druhém stádium. V němž dochází vlivem rostoucích adhezních sil k mírnému nárůstu koeficientu tření a může docházet ke vzniku adhezních spojů. Další nárůst koeficientu tření znázorňuje třetí stádium.



Obr. 7.80 Průběhy koeficientu tření získané při experimentálním uspořádání 1

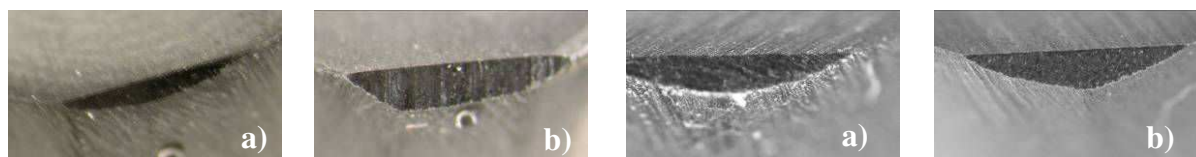


Obr. 7.81 Průběhy koeficientu tření získané při experimentálním uspořádání 2

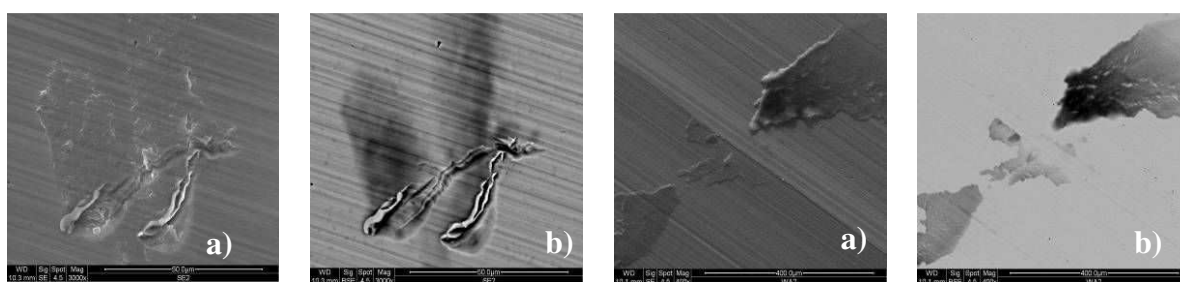
Z časových průběhů koeficientu tření u vzorků *SA2*, *SE2*, *SE3*, *WA2* a *WA3* u exp. uspořádání 1 a vzorků *SE2*, *WA2* a *WA3* u exp. uspořádání 2 není první a druhé stádium viditelné a časový průběh koeficientů tření začíná rovnou stádiem tři. V tomto stádiu dochází vlivem přibývání částic uchycených v místě styku k nárůstu koeficientu tření. Dochází také ke zvětšování aktivované plochy povrchu podléhající adheznímu tření. Při srovnatelné tvrdosti obou materiálů dosahuje mechanismus rýhování maxima.

Ve čtvrtém stádiu vykazuje koeficient tření konstantní úroveň. Množství částic, deformace a míra adhezního tření jsou také konstantní.

Na následujících obr.7.82 a 7.83 jsou znázorněny vybrané fotografie opotřebení kluzné hrany kontaktního polymerního tělíska (válečku) a kluzné plochy vzorků po *Pin-on-disc* testu, pořízené na elektronovém mikroskopu.



Obr. 7.82 Opotřebení válečku z polymerního materiálu užívaného na kluzná spojení obráběcích strojů po *Pin-on-disc* testu na vzorku SE2 (vlevo) a na vzorku WA2 (vpravo).
Uspořádání 1 (a), 2 (b)



Obr. 7.83 Opotřebení povrchu vzorku SE2 (vlevo) a povrchu vzorku WA2 (vpravo), zobrazené pomocí sekundárních (a) a zpětně odražených (b) elektronů

7.4.7.1 Diskuse experimentálního výzkumu vybraného souboru vzorků

V případě čelního frézování je mikrorelief řezné plochy výsledkem mechanické interakce nástroje s materiálem (rotační pohyb + posuv nástroje). Z tab. 7. 41 a 7.42 je jasně vidět, že parametr Ra [μm] je nejvíce ovlivněn průměrem nástroje, posuvem a samozřejmě řeznou rychlostí a také geometrií *VBD* destiček. Oproti teoretickým předpokladům bylo zjištěno, že při zvětšujícím se průměru a snižujícím se posuvu a řezné rychlosti se hodnota parametru Ra [μm] zvětšovala.

Změna hloubky záběru z 0,3 na 0,5 mm nemá významný vliv na změnu velikosti parametru Ra [μm]. Dále pak lze konstatovat, že povrchy obrobené nástrojem *WALTER* vykazují hodnoty drsnosti povrchu (viz tab. 7.42) nepřijatelné z hlediska požadavku náhrady technologie broušení technologií frézování.

Při optimálním tepelném zpracování materiálu 14 100 má být výsledná mikrotvrdość v intervalu 770 až 860 *HV* 0,2. Tato hodnota nebyla prakticky překročena i po aplikaci dokončovacího obrábění technologií frézování (tab. 7.42), kdy při oddělování třísky dochází v oblasti zóny řezání k intenzivní plastické deformaci. Ta zasahuje i pod obrobený povrch, protože břit nástroje není ideálně ostrý a část nastavené hloubky záběru se neoddělí. Jak bylo již zmíněno, se vzrůstem řezné rychlosti stoupá také teplota v místě řezu, a tím dochází také k poklesu mikrotvrdości a tedy odpeňování technologicky ovlivněné vrstvy. Hloubka záběru

má také vliv na výslednou velikost hodnot $HV_{0,2}$ (viz tab. 7.41 a 7.42), kdy se změnou hloubky záběru z 0,3 na 0,5 mm klesá hodnota $HV_{0,2}$. Ta se však pohybuje v rámci experimentální přesnosti měření.

Při tribologických testech opotřebení byla použita vyšší přítláčná síla než při reálném zatížení v průmyslové praxi. I přes tuto skutečnost nevykazovaly segmenty vedení žádné viditelné poškození. Materiál z kontaktního tělíska vykazoval opotřebení (obr. 7.82) a byl tzv. rozetřen (transformovan) na povrchu ocelového vedení u všech šesti zkoumaných vzorků, jak je vidět z vybraných snímků pořízených pomocí elektronového mikroskopu (viz obr. 7.83).

Průběhy koeficientu tření při jednotlivých testech a dvou různých experimentálních uspořádáních jsou znázorněny na obr. 7.80 a 7.81. Z výsledků získaných pomocí uspořádání 2 (obr. 7.81), je pozorovatelný nižší rozptyl hodnot koeficientu tření než při uspořádání 1 (obr. 7.80).

Vzorky WA2 a WA3 obrobené nástrojem WALTER vykazují nejvyšší drsnost povrchu, a to více než $0,7 \mu\text{m}$ (viz tab. 7.42). Navzdory tomuto faktu vzorek WA3 vykazuje nejnižší koeficient tření, který není závislý na experimentálním uspořádání při samotném *Pin-on-disc* testu. Největší koeficient tření byl změřen naopak u vzorků SE2 (*nástroj SECO*) s nejnižší drsností povrchu, která má zásadní vliv oproti ostatním parametrům při tzv. reálném kontaktu kluzného tření (viz kap. 6.1.1.1).

8. ZÁVĚRY

Předkládaná disertační práce se věnuje třem tématům, které spolu velmi úzce souvisí a ve své podstatě sledují cestu strojní součásti od její výroby přes testování až po její funkční provoz. *První téma* představuje samotný proces obrábění, tj. zejména jeho technologické a materiálové parametry. *Druhým nosným tématem* je stav zbytkové napjatosti ve strojních součástech, respektive analýza vlivu technologických a materiálových parametrů obrábění na výsledný stav povrchové zbytkové napjatosti a hloubkového průběhu zbytkových napětí. Vzhledem k existujícímu množství metod určujících zbytkové napětí, je také provedeno srovnání a diskuse výsledků, které tyto metody poskytují. *Třetí téma* tvoří užité vlastnosti namáhaných strojních součástí posuzované z hlediska tribologie.

Těžiště této disertační práce spočívá ve druhém tématu, konkrétněji v experimentální tenzometrické analýze nově vzniklých funkčních povrchů laboratorních vzorků i speciálně připravených segmentů reálných strojních komponent. Výsledky těchto analýz jsou diskutovány z hlediska technologického i metodického v závislosti na proměnných parametrech opracování.

Disertační práce je rozdělena do dvou hlavních částí, a sice do teoretické a experimentální. Úvodní teoretická část obsahující čtyři kapitoly čerpá z rozsáhlého fondu tuzemské i zahraniční literatury.

První kapitola se zabývá vymezením pojmu integrity povrchu jako souboru charakteristik povrchu definujících jeho stav a kvalitu. Dále se kapitola věnuje zejména změnám strukturních a mechanických charakteristik integrity povrchu v souvislosti s obráběcími procesy při výrobě funkčních strojních komponent. V druhé pasáži teoretické části je proveden rozbor vlivu parametrů dokončovacího obrábění (plastická deformace a teplota v místě řezu) a materiálových vlastností na vznik a rozložení zbytkových napětí. V předposlední kapitole teoretické části této disertační práce byl proveden nejprve stručný přehled tenzometrických metod pro studium zbytkových napětí a následně byly rozebrány teoretické základy metod použitých v experimentální části této práce. Teoretickou část disertační práce uzavírá popis aktuální problematiky vztahu užitečných vlastností nově vzniklého povrchu a jeho tribologických vlastností.

Experimentální část je tvořena čtyřmi kapitolami, z nichž každá představuje dílčí výsledky konkrétního výzkumu realizovaného v rámci spolupráce s jinými vysokoškolskými pracovišti, laboratořemi či průmyslovými partnery.

V části práce zaměřené na experimenty byly nejprve zhodnoceny vybrané tenzometrické metody studia gradientů zbytkových napětí na segmentech reálných strojních komponent z ocele ČSN 11 375.0 používaných v průmyslové praxi. Stav zbytkové napjatosti byl zkoumán (1) odvrtávací metodou, (2) metodou postupného elektrolytického rozpouštění povrchových vrstev, (3) rentgenografickou metodou *jedné expozice bez referenční látky* a (4) rentgenografickou tenzometrickou metodou „ $\sin^2\psi$ “. Součástí výzkumu bylo také mapování homogenity povrchu broušených, frézovaných a zaškrabávaných tvarových vodicích lišt.

Ve druhé experimentální části byly analyzovány jednotlivé účinky a jevy způsobené aplikacemi různých řezných prostředí při frézování. Při zachování identických řezných podmínek s výjimkou odvodu tepla byly frézovány laboratorní vzorky z ocele ČSN 12050.9, jako řezné prostředí byla použita emulze, aerosol, chlazený vzduch, mražený vzduch a neupravený vzduch.

Třetí kapitola experimentální části se zabývá problematikou vycházející z průmyslové praxe, kdy byla provedena difrakční analýza za účelem zjistit, zda je pro dosažení požadované

kvality výrobku z legované nástrojové ocele ČSN 19552.0 nutné obrábět vnitřní rádiusy nástrojem s výrazně menším poloměrem než je výsledný poloměr profilu obrobku; jako další parametr byl dále sledován vliv typu nástroje, vliv způsobu frézování, příp. byl hodnocen vliv korekce posuvu.

Poslední kapitolu tvoří problematika zabývající se vlivem parametrů integrity povrchu na životnost dynamicky a kontaktně namáhaných strojních součástí. V rámci požadavků spolupracujícího průmyslového podniku byl navržen soubor experimentů na segmentech z vedení obráběcích strojů. Kalené ocelové lišty vedení byly frézovány nástroji od různých dodavatelů. Bylo provedeno porovnání vybraných vzorků vyrobených z materiálu ČSN 14100.4 z hlediska parametrů integrity povrchu. Experimenty zahrnovaly analýzu rozložení zbytkových napětí, určování koeficientu tření, opotřebení, zpevnění či opevnění a mikrogeometrie obrobeného povrchu ocelových lišt.

Každá oblast řešená v experimentální části disertační práce vedla k závěrům s dosahy v průmyslové praxi. V následujících bodech jsou shrnuty ty nejzásadnější:

Porovnání experimentálních metod studia zbytkové napjatosti

- Žádná tenzometrická metoda neurčuje přímo zbytkové napětí, ale hodnotí deformaci či jinou napěťově závislou veličinu. Interpretace a porovnání výsledků jednotlivých metod musí být provedena s ohledem na dané fyzikální fundamenty příslušného přístupu určování zbytkového napětí.
- Srovnávací studium potvrdilo skutečnost, že difrakční analýza zbytkových napětí patří k metodám nejlépe propracovaným, přestože klade vyšší nároky na provedení experimentu a interpretaci výsledků měření. Jako jediná podává informace o experimentální chybě měření. V kombinaci s elektrolytickým leštěním je navíc rtg difrakce vhodná ke studiu gradientů zbytkových napětí v povrchových vrstvách.
- Metoda postupného elektrolytického rozpouštění vrstev poskytuje hloubkové profily zbytkových napětí ve shodě s rtg difrakcí pouze v případě dvojosého izotropního stavu zbytkové napjatosti.
- Omezením praktické použitelnosti odvrtačové metody je vznik plastické deformace v okolí otvoru při jeho hloubení. Pro použití je tato metoda určena pro hloubky od cca 50 až 100 μm , což značně omezuje její aplikaci na studium povrchových vrstev po finálním obrobení.
- V principu neexistuje žádná univerzální metoda, která by byla použitelná pro každý případ, ale vhodné kombinování tenzometrických metod může být zodpovědným přístupem k řešení problémů ve výzkumné a průmyslové praxi.

Vliv technologických a materiálových parametrů obrábění na zbytkovou napjatost

Porovnání frézování, broušení a zaškrabávání

- Každý ze studovaných povrchů je charakterizován odlišným zbytkovým napětím a jeho hloubkovým profilem. Zatímco frézované vzorky vykazují tahová a zaškrabávané tlaková povrchová napětí ve směru obrábění a kolmo k němu, na broušeném povrchu byl zjištěn anizotropní stav zbytkové napjatosti s tahovými napětími ve směru

broušení a tlakovými ve směru k němu kolmém. Odpovídající hloubkové distribuce představují pokles/růst zbytkových napětí k úrovni nenapjatého materiálu.

- Na základě proměrování zvolené sítě míst lze soudit, že pole povrchových zbytkových napětí je u všech vzorků nehomogenní. Jako nejméně homogenní se jeví frézovaný povrch, rozdíly mezi maximálními a minimálními hodnotami napětí dosahují u σ_L cca 200 MPa, u σ_T cca 300 MPa. Nehomogenita zbytkových napětí naměřených na broušeném a zaškrabávaném povrchu má obdobný charakter a je nižší než u frézovaného vzorku.

Porovnání různých řezných prostředí při frézování

- Profily zbytkového napětí pro hloubky větší než 0,010 mm jsou analogické pro všechny zkoumané vzorky a neliší se podstatně s chladicími podmínkami.
- Zbytková napětí na povrchu a těsně pod povrchem obrobených strojních součástí se v závislosti na řezném prostředí odlišují; rozdíly se projevují v hloubkách menších než 0,010 mm.
- Stav zbytkového napětí v hloubkách větších než 0,010 mm je anizotropní. Napětí ve směru rovnoběžném se směrem pracovního posuvu nástroje σ_L je menší než ve směru kolmém σ_T , což je pravděpodobně následek asymetrie řezání (řezné dráhy nástroje).
- Průběh šířky difrakční linie $\{211\}$ α -Fe získané pro všechny zkoumané vzorky naznačuje, že tloušťka plasticky deformovaných vrstev je přibližně 0,15 – 0,20 mm. Tato zjištění odpovídají charakteru rozložení zbytkových napětí, kde hodnoty zbytkových napětí v hloubkách větších než 0,15 – 0,20 mm nejsou významné.
- U všech vzorků byly na povrchu naměřeny tahové hodnoty zbytkového napětí. U vzorků frézovaných bez chlazení a s emulzním chlazením je zbytkové napětí na povrchu anizotropní ($\sigma_L < \sigma_T$), zatímco u vzorků chlazených aerosolem, chlazeným a mraženým vzduchem vedly tyto chladicí podmínky k izotropnímu zbytkovému napětí ($\sigma_L \approx \sigma_T$).
- Vzorky chlazené aerosolem, chlazeným a mraženým vzduchem ukazují vyšší „anizotropii gradientů“ ve srovnání s ostatními třemi vzorky, tj. gradient ve směru rovnoběžném se směrem pracovního posuvu nástroje je více než dvakrát větší než gradient ve směru kolmém.

Porovnání vlivu typu nástroje a pracovních podmínek při frézování vnitřních radiusů

- Při stanovení stavu zbytkového napětí po obrábění radiusů monolitním nástrojem a nástrojem osazeným VBD je třeba uvažovat tři oblasti radiusu, první je obráběna sousledně, druhá obráběná nesousledně a třetí je obráběná čelem nástroje.
- Šířky analyzované difrakční linie $\{211\}$ α -Fe závislé na úrovni mikroskopických zbytkových napětí a velikosti krystalitů v povrchové vrstvě, a které je možné ji interpretovat jako míru plastické deformace, se liší pro oblast obráběnou čelem nástroje a oblastí obráběné jeho bokem. Šířky linie $\{211\}$ α -Fe jsou systematicky větší

u oblastí obráběných čelem nástroje ve srovnání s oblastmi obráběnými bokem nástroje. Není pozorován rozdíl v šířkách linie $\{211\}$ α -Fe pro sousledné a nesousledné obrábění bokem nástroje.

- Při porovnání vzorků obrobených monolitním nástrojem a nástrojem osazeným VBD vedou posuvy generované programem *NC Speed* k vyšší úrovni plastické deformace než u povrchových vrstev vzorků, u kterých byla zvolena konstantní posuvová rychlost $441 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.
- Homogenní zbytkové napětí na povrchu bylo zjištěno u hřebenů, jejichž tvar byl obráběn frézou *D12* a následně byl frézou *D10* obroben rádius. V tomto případě bylo v každém měřeném bodě na povrchu strojní součásti získáno tlakové napětí. Nejvyšší hodnoty zbytkového napětí byly zjištěny v oblastech obráběných čelem nástroje.

Parametry integrity povrchu frézovaného nástroji různých výrobců

- Analýzou jednotlivých charakteristik integrity povrchu ve vybraných oblastech povrchu segmentů z vedení obráběcích strojů nebyl zaznamenán rozdíl, který by překračoval chybu měření. Jednotlivé povrchy jsou tedy z hlediska těchto charakteristik homogenní.
- Snížení průměru řezného nástroje, a tím i zvýšení řezné rychlosti, vede ke vzrůstu teploty řezání během obráběcího procesu. Díky tomu dochází ke kvalitativním změnám stavu makroskopické zbytkové napjatosti, např. u vzorků obrobených nástrojem *WALTER* přecházejí vysoké izotropní tlaky v anizotropní tahové hodnoty (vzorek *SE3*).
- Se zvýšením řezné rychlosti roste i teplota v místě řezání a dochází k poklesu hodnot *HV 0,2*, tedy k odpevňování technologicky ovlivněné vrstvy.
- Vyšší drsnost povrchu (vzorky *WALTER*) vede ke snížení koeficientu tření.
- Ve všech tribologických testech se transformoval polymerní materiál na povrch kaleného vedení, které nevykazovalo žádné viditelné známky poškození.

8.1 Nové poznatky a přínosy pro teorii a praxi

Souboru charakteristik povrchové plochy a povrchové vrstvy, který se stále častěji i v průmyslové praxi označuje jako integrita povrchu, je věnováno neustále více pozornosti, neboť podává novou informaci o kvalitě strojních součástí. Povrch tvoří přechod mezi strojní součástí a jejím okolím a jeho kvalita je klíčová pro vznik a šíření trhlin, odolnost vůči korozi, oteruvzdornost a životnost. Předkládaná disertační práce se zevrubně věnuje zejména stavu zbytkové napjatosti jako jednomu z parametrů integrity povrchu. Na vcelku rozsáhlém souboru experimentů a experimentálních dat poskytuje cenné závěry pro výrobce namáhaných strojních součástí. Výše uvedený výběr nejvýznamnějších závěrů jednotlivých experimentálních projektů svědčí o jejich jasné vypovídající schopnosti.

Hlavní přínosy předkládané disertační práce jsou následující:

- Řešená disertační práce obsahuje měření velkého počtu strojních součástí a představuje rozsáhlou databázi výsledků analýzy povrchové a hloubkové distribuce zbytkových napětí po různých technologiích povrchového opracování vzorků. Získané poznatky umožňují analyzovat, hodnotit a řešit konkrétní technologické problémy.
- V rámci řešení práce byly aplikovány a diskutovány různé metody stanovení zbytkových napětí. Získané výsledky experimentů umožňují posoudit vhodnost použití jednotlivých experimentálních postupů při řešení konkrétních úkolů.
- Při obrábění součástí pomocí třískových technologií se významně uplatňuje vliv tepla vznikajícího v důsledku interakce nástroje s obráběným povrchem. Na základě experimentálně získaných výsledků bylo provedeno srovnání povrchové a hloubkové distribuce zbytkových napětí při obrábění za různých podmínek odvodu tepla z místa řezu, přičemž ostatní pracovní podmínky zůstaly konstantní.
- Bylo provedeno porovnání výsledků měření zbytkových napětí při použití monolitní frézy a frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami. Získané výsledky ukazují, že povrchová zbytková napětí jsou při použití obou typů nástrojů srovnatelná.
- Tribologické charakteristiky jsou významné faktory ovlivňující opotřebení a životnost strojních součástí. Byl zhodnocen vliv parametrů mechanického opracování na rozdělení zbytkových napětí na povrchu součástí, na drsnost a mikrotvrdost a rovněž na tření za konkrétních pracovních podmínek. Bylo zjištěno, že každá ze sledovaných charakteristik dává specifickou informaci o povrchu hodnocené strojní součásti.

8.2 Doporučení směrů dalšího výzkumu studované problematiky***Problematika řešená v disertační práci by se mohla dále rozvíjet ve dvou směrech:***

1) Míru působení jednotlivých technologických parametrů (např. řezná rychlost, hloubka záběru atd.) na vznik výsledných zbytkových napětí by bylo vhodné analyzovat na základě detailního výzkumu. Zajímavé výsledky lze očekávat jednak při analyzování vlivu řezné rychlosti na distribuci řezných sil (s pomocí dynamometru), přičemž by bylo vhodné současně pozorovat změny plastických deformací v oblasti řezu (s pomocí rychlostní kamery) a s tím související teplotní procesy. Teplotní vlivy by bylo vhodné měřit v průběhu obráběcího procesu (termočlánky, jak na povrchu obrobku, tak i na nástroji doplněné např. termokamerou

– teplotní gradient) a na základě těchto dat simulovat 3D teplotní pole. Dále by bylo vhodné zaměřit se též na vliv dalších řezných podmínek (posuv, hloubka záběru, atd.) a případně i různých geometrií řezného nástroje (pro konstantní obráběný materiál a tepelné zpracování).

2) Přínosné výsledky by mohly být dosaženy též při pokračování výzkumu ve druhém směru, kdy by byl u modelových strojních součástí podrobně analyzován vliv zbytkových napětí na jejich dynamickou pevnost a kontaktní únavu.

Statisticky bylo prokázáno, že většina poruch strojních komponent za provozu byla způsobena právě únavou materiálu vyvolanou jeho cyklickým namáháním. Rozbor poruch reálných strojních součástí ukázal, že mezní stav závisí na úzce lokálních vlastnostech materiálu v nejnamáhanějších místech (povrchová vrstva) a tedy nikoli na průměrných vlastnostech celého průřezu, jak např. udává klasická tahová zkouška. Také citlivost únavové pevnosti je největší na povrchu (ohyb, krut). Opět rozhodují vlastnosti tenké povrchové vrstvy (např. velký gradient zbytkových napětí, dendritická bílá vrstva a trhliny), ve které je pravděpodobnost výskytu deformovaných zrn a vakancí největší.

Předložená disertační práce souvisí s řešením výzkumného projektu *MPO FT-TA4/105*.

9. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Schwach, D.W., Guo, Y.B.; A fundamental study on the impact of surface integrity by hard turning on rolling contact fatigue, *Int J Fatigue* 28 (2006), 1838–1844.
- [2] Field, M., Kahles, J.F.; Review of surface integrity of machined components, *Ann CIRP* 20 (1971), 107–108.
- [3] Huang Q., Ren, J.X.; Surface integrity and its effects on the fatigue life of the nickel-based superalloy GH33A, *Int J Fatigue* 13 (1991), 322–326.
- [4] Abrao, A., Aspinwall, D.; The surface integrity of turned and ground hardened bearing steel, *Wear* 196 (1996), 279–284.
- [5] Matsumoto, Y., Hashimoto F., Lahoti, G.; Surface integrity generated by precision hard turning, *Ann CIRP* 48 (1999), 59–62.
- [6] Sharman, A.R.C., Aspinwall, D., Dewes, R.C., Clifton D., Bowen, P.; The effects of machined workpiece surface integrity on the fatigue life of g-titanium aluminide, *Int J Mach Tool Manu* 41 (2001), 1681–1685.
- [7] Guo, Y.B., Schwach, D.W.; An experimental investigation of white layer on rolling contact fatigue using acoustic emission technique, *Int J Fatigue* 27 (2005), 1051–1061.
- [8] M'Saoubi, R., Outeiro, J. C., Changeux, B., Lebrun, J.L., Morão Dias, A.; Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels, *J Mat Proc Tech* 96 (1999), 225–233.
- [9] Axinte, D. A., Dewes, R. C.; Surface integrity of hot work tool steel after high speed milling-experimental data and empirical models, *J Mat Proc Tech* 127(2002), 325–335.
- [10] El-Wardany, T.I., Kishawy, H.A., Elbestawi, M.A.; Surface integrity of die material in high speed hard machining. Part 2: microhardness variations and residual stresses. *Trans. ASME, J. Manuf. Sci. Eng.* 122 11 (2000), 632–641.
- [11] Neckář, F., Kvasnička, I.; Vybrané statě z úběru materiálu, Praha 1991, ČVUT, Fakulta strojní.
- [12] Astakhov, V. P.; Metal cutting mechanics, CRC, 1. vydání, 1998.
- [13] Kocman, K., Prokop, J.; Technologie obrábění. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM Brno, s.r.o., prosinec 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [14] Reason, R. E.; Progress in the appraisal of surface topography during the first half-century of instrument development, *Wear*, 1979.
- [15] Linnik, W. A.; A simple interferometer for the investigation of optical systems, *CR Acad. Sci. URSS*, 1933.
- [16] ČSN EN ISO 4287; Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu, 1999.
- [17] Chakrabarty, J.; Theory of Plasticity, Butterworth-Heinemann, 3rd edition, 2006.
- [18] Chuna, B. K., Jinna, J. T., Lee, J. K.; Modeling the Bauschinger effect for sheet metals, *International Journal of Plasticity*, 18, 2002, 571–595.
- [19] Kolařík, K., Drahekoupil, J., Ganev, N.; Influence of White Layer and Phase Transformation on Distribution of Residual Stresses after EDM, *Proceedings of UNITECH'08 -International Scientific Conference*, 2008, 199 -204.
- [20] Kafka, J.; Výzkum vlivu technologických podmínek broušení do kulata na kvalitu povrchové vrstvy [Výzkumná zpráva], Praha 1970, ČVUT, Fakulta strojní, 130.

-
- [21] Sallman, R. E.; Moderní nauka o kovech, SNTL 1964.
- [22] Youtsos, A. G.; Residual stress and its effect on fracture and fatigue, Springer 2006.
- [23] Prevey, P. S.; X-ray diffraction residual stress techniques, ASM Handbook. Vol. 10. Materials Characterization. ASM International, USA, 1986. 380–392.
- [24] Soyama, H. et al.; Use of cavitating jet for introducing compressive residual stress, Journal of manufacturing science and engineering, 2000, vol. 122, no1, 83–89.
- [25] Bumbálek, B.; Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci.
- [26] Tönshoff, H.K., Arendt, C., Ben Amor, R.; Cutting of Hardened Steel, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 49 (2000) 547-566.
- [27] Hua, J., Shivpuri, R., Cheng, X., Bedekar, V., Matsumoto, Y., Hashimoto, F., Watkins, T. R.; Effect of feed rate, workpiece hardness and cutting edge on subsurface residual stress in the hard turning of bearing steel using chamfer+hone cutting edge geometry, Materials Science and Engineering A 394 (2005) 238–248.
- [28] Hwang J., Kompella S., Chandrasekar S., Farris T. N., Measurement of Temperature Field in Surface Grinding Using Infra-Red Imaging System, ASME, Journal of Tribology, vol. 125, 2003, 377 – 383.
- [29] Kohli S., Guo C., Malkin S., Energy Partition to the Workpiece for Grinding with Aluminium Oxide and CBN Abrasive Wheels, Trans. of ASME, vol. 117, 1995.
- [30] Jang, D.Y., Watkins, T.R., Kozaczek, K.J., Hubbard, CR., Cavin, O.B.; Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel, Wear 194 (1996) 168–173.
- [31] Gazda J.; Teorie obrábění (Průvodce tvorbou třísky), Technická univerzita v Liberci, 2009, ISBN 978–80–7372–498–6.
- [32] 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. 130.
- [33] Heymann, J., Lingener, A.; Experimentelle Festkörpermechanik. Leipzig:Fachbuchverlag, 1986. 468. ISBN 3–343–00119–8.
- [34] Lu, J. (ed.). Handbook of Measurement of Residual Stresses. Lilburn: The Fairmont Press, 1996. 238. ISBN: 0–132–55738–X.
- [35] 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.
- [36] Zhang, T. J., Chen, L. Q., Fu, R.; Measurement of Residual Stress in Thin Films Deposited on Silicon Wafers by Indentation Fracture. Acta materialia, 1999, vol 47, no.14, 3869-3878. ISSN 1359–6454.
- [37] Mat-Tec AG. Unterer Graben 27, CH-8401 Winterthur. *Eigenspannungen*. 2002. [cit. 17.prosince 2004].
Dostupné na WWW:<http://www.mat-tec.ch/2002/fs-eigspann.htm>.
- [38] Grant, P.V.; Lord, J.D.; Whitehead, P.S. The Measurement of Residual Stresses by the Incremental Hole Drilling Technique. Measurement Good Practice Guide 53. Teddington: National Physics Laboratory, 2002.
- [39] Kandil, F.A., Lord, J. D., Fry, A. T., Grant, P. V. A; Review of Residual Stress Measurement Methods – A Guide to Technique Selection: NPL Report MATC(A)04. Teddington: NPL Materials Centre, 2001. 42. ISSN 1473–2734.
- [40] Pisarev, V.S.; et al. Metrological justification of reflection hologram interferometry with respect to residual stresses determination by means of blind hole drilling. Optics and Lasers in Engineering, 2004, vol.41, no. 2, 353–410. ISSN 0143–8166.

-
- [41] Pisarev, V. S., Balalov, V. V., Bondarenko, M. M.; Classification of holographic fringe patterns inherent in through hole drilling in residual stress field. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, vol.42, no. 6, 673–702. ISSN 0143–8166.
- [42] Sanchez, L. A., Hornberger, L. E.; Monitoring of residual stresses in injectionmolded plastics with holographic interferometry. *Optics and Lasers in Engineering*, 2003, vol. 37, no. 1, 27–37. ISSN 0143–8166.
- [43] Nelson, D. V., Makino, A., Fuks, E. A.; The Holographic-hole Drilling Method for Residual Stress Determination. *Optics and Lasers in Engineering*, 1997, vol. 27, no. 1, 3-23. ISSN 0143-8166.
- [44] Cloud, G.L.; *Optical Methods of Engineering Analysis*. New York: Cambridge University Press, 1995. 503. ISBN 0–521–63642–6.
- [45] Kraus, I., Trofimov, V. V.; *Rentgenová tenzometrie*. Praha: Akademia, 1988. 247.
- [46] Kraus, I., Ganev, N.; *Difrakční analýza mechanických napětí*, Vydavatelství ČVUT, Praha 1995. 274. ISBN 80–01–01366–9.
- [47] Ya, M., Marquette, P., Belahcene, F., Lu, J.; Residual stresses in laser welded aluminum plate by use of ultrasonic and optical methods. *Materials Science and Engineering A*, 2004, vol.382, no.1–2, 257–264. ISSN 0921–5093.
- [48] Rajic, N., Wong, A. K., Lam, Y. C. A; Thermomechanical technique for measuring residual stress. In *Proceedings of the 1993 Sem “50th Anniversary” Spring Conference on Experimental Mechanics: 1943–1993, Dearborn, Michigan, 7. –9. března 1993*. Dearborn: Society for Experimental Mechanics, 1993, 492-501. ISBN: 0–912–05343–7.
- [49] Hauk, V. et al.; *Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods*, Elsevier Science B. V., 1997.
- [50] Snyder, R. L. et al.; *Defect and Microstructure Analysis by Diffraction*, Oxford Science Publications 1999.
- [51] Hutchings, M. T. et al.: *Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction*, Taylor & Francis Group 2005.
- [52] Tietz, H.; *Grundlagen der Eigenspannungen*, Deutscher Verlag für Gundeindustrie, Leipzig 1983.
- [53] Klaboč, L.; *Experimentální metody pružnosti a pevnosti*, skriptum, SNTL, Praha 1965.
- [54] Vlk, M. aj.; *Experimentální mechanika*, Vydavatelství VUT, Brno 2003.
- [55] Neslušán, M. aj.; *Experimentálne metody v triskovom obrábaní*, Vydavateľstvo ŽU 2007.
- [56] Kraus, I. Ganev, N.; *Technické aplikace difrakční analýzy*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2004.
- [57] Timoshenko, S.; et al. *Goodier: Theory of Elasticity*, second edition, McGraw – Hill 1951.
- [58] Doubrava, K.; Excentricita otvoru a její zohlednění při vyšetřování zbytkových napětí pomocí odvrťovací metody, disertační práce, FS ČVUT, Praha 2006.
- [59] Holmeg, K., Matthews, A.; *Coating tribology – properties, techniques and applications in surface engineering*, Amsterdam, Elsevier, 1998.
- [60] Burakowki, T., Wierzchoni, T.; *Surface engineering of metals*, New York, CRC Press LLC, 1999, ISBN 0–8493–8225–4.
- [61] Karas, V.; *Povrchy a jejich úpravy*, ZČU Plzeň, 2000.
- [62] Hodková, Š.; *Hodnocení mechanických vlastností žárových nástřiků*, [disertační práce], ZČU Plzeň, 2004.
- [63] Novotná, K.; *Tribologické vlastnosti žárově stříkaných povlaků*, [Diplomová práce], ZČU Plzeň, 2004.

- [64] Tichotová, P.; Hodnocení tenkých otěruvzdorných vrstev deponovaných metodou CVD, [Diplomová práce], ZČU Plzeň, 2004.
- [65] de Keijser, Th.H., Langford, J.I., Mittemeijer, E.J., Vogels, A.B.P., J. Appl. Cryst., 1982, 15, 308.