

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra aplikované kybernetiky

Obor: 23-40-8, automatizované systémy řízení ve strojírenství

Zaměření: automatizace inženýrských prací

Automatizovaný systém pro vyhodnocování velikosti zbytkových napětí v povrchových vrstvách

Automated system for plotting size of residual stress in surface layers

KKY

Marek Gazda

Vedoucí práce: Ing. Slavomír Němeček, TUL-FS-KKY

Konzultanti: Ing. Jan Matuský, TUL-FS-KOM

Počet stran: 76

Počet tabulek: 9

Počet obrázků: 27

Počet příloh: 2

Datum 28.5. 1999

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení Marek G a z d a

obor 23-40-8 Automatizované systémy řízení
 ve strojírenství

zaměření automatizace inženýrských prací

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

**Automatizovaný systém pro vyhodnocování velikostí
zbytkových napětí v povrchových vrstvách**

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody
pro vypracování)

1. Prostudujte dostupné poznatky v metodě elektrolytického odleptávání pro zjišťování velikosti zbytkových napětí v povrchových vrstvách.
2. Analyzujte současný stav pracoviště elektrolytického odleptávání a navrhnete automatizovaný systém pro vyhodnocování velikosti zbytkových napětí v povrchových vrstvách.
3. Vytvořte potřebný software na PC pro měření a vyhodnocování velikosti napětí v povrchových vrstvách plochých vzorků.
4. Ověřte funkčnost a spolehlivost navrženého automatizovaného systému pomocí experimentů a vyhodnoťte dosažené výsledky měření.

ANOTACE

Označení DP:

Řešitel: Marek Gazda

AUTOMATIZOVANÝ SYSTÉM PRO VYHODNOCOVÁNÍ VELIKOSTI ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ V POVRCHOVÝCH VRSTVÁCH

Diplomová práce řeší problematiku automatizace měření zbytkových napětí v povrchových vrstvách po válečkování s následným zpracováním dat počítačem s vloženou měřicí kartou. Ze vstupních dat je pomocí programu, zpracovaném v jazyku "C", vypočítáno zbytkové napětí v závislosti na hloubce pod povrchem. Výstup je možný v tabulkové nebo grafické formě.

Řešení bylo ověřeno experimentálně a porovnáno s výsledky jiných autorů.

Zpracovatel: TU v Liberci, KKY

Dokončeno: 1999

Počet stran: 76

Počet příloh: 2

Počet obrázků: 27

Počet tabulek: 9

Počet diagramů: -

Datum: 28.5. 1999

ANNOTATION

Description DP:

Solver: Marek Gazda

AUTOMATED SYSTEM FOR PLOTTING SIZE OF RESIDUAL STRESS IN SURFACE LAYERS

The MSc. Thesis solves problems of the automatization of metering residual stress in surface layers after a roller burnishing operation with resulting data processing by computer with measures card. From enter data is by means of programme, worked in tongue "C", enumerate residual stress in relation on depth below surface. Output is possible in tabular or graphic forms.

Solving was verificate experimental and comparised with record of other authors.

Elaborator: TU Liberec, KKY

Accomplished: 1999

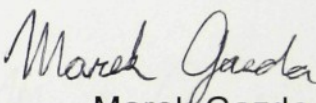
Number of pages:	76
Number of appendixes:	2
Number of pictures:	27
Number of tables:	9
Number of diagrams:	-

Date: 28.5. 1999

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury pod vedením vedoucího a konzultantů.

V Liberci, dne 28.5. 1999

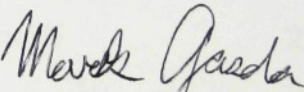

Marek Gazda

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Slavomíru Němečkovi a konzultantovi Ing. Janu Matuskému za odborné vedení.

Děkuji Ing. Tomáši Vovčíčkovi za spolupráci při experimentálním ověřování měřicího systému.

V Liberci, dne 28.5. 1999


Marek Gazda

OBSAH

Titulní list	
Zadání DP	
Anotace	
Annotation	
Místopřísežné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	7
Seznam symbolů	10
1. Úvod	12
1.1. Význam zadání pro strojírenskou výrobu	12
2. Zbytková napětí a způsoby jejich měření	17
2.1. Definice zbytkových napětí a jejich charakteristika	17
2.1.1. Definice zbytkových napětí	17
2.1.2. Charakteristika zbytkových napětí	17
2.1.3. Mechanismus vzniku zbytkových napětí při obrábění	18
2.2. Způsoby měření zbytkových napětí	21
2.2.1. Základní způsoby stanovování zbytkových napětí	21
2.2.1.1. Analyticko - výpočtové metody	21
2.2.1.2. Experimentální metody - přehled	22
2.3. Shrnutí	24
2.4. Formulace problému a cíle diplomové práce	25
3. Rozbor původního stavu pracoviště elektrolytického odleptávání	27
3.1. Umístění měřicího stanoviště v univerzální buňce	27
3.2. Měřicí zařízení	27
3.3. Popis použitých přístrojů	29
4. Návrh a rekonstrukce zařízení na automatizovaný systém	32
4.1. Požadované vlastnosti navrhovaného zařízení	32

4.2. Rekonstrukce měřicího zařízení	32
4.3. Nahrazení souřadnicového zapisovače osobním počítačem s měřicí kartou	33
4.4. Souhrn použitých prostředků	34
4.4.1. Výpočetní technika	34
4.4.2. Stejnosměrný zdroj elektrického proudu se stabilizací	34
4.4.3. Měřicí aparatura Mikrotechna M 1000	35
4.4.4. Neupravovaná zařízení	35
4.5. Výsledné sestavení pracoviště	35
4.6. Výpočet zbytkových pnutí pro prizmatický vzorek	36
5. Návrh a tvorba software pro měření, zpracování a vyhodnocování dat	41
5.1. Výběr vhodného programovacího jazyka	41
5.2. Požadavky na vytvářený software	41
5.3. Základní možnosti hardware podmiňující vytváření software	42
5.4. Tvorba vlastního programového vybavení	42
5.5. Popis použití vytvořené aplikace	45
6. Ověření funkčnosti automatizovaného systému provedením experimentů	47
6.1. Technologická příprava vzorků	47
6.1.1. Volba materiálu na výrobu vzorků	47
6.1.2. Výroba vzorků	48
6.1.3. Tváření povrchové vrstvy vzorků	50
6.1.3.1. Válečkovací nástroj	51
6.1.3.2. Měření tvářecích sil při válečkování	51
6.2. Měření zbytkových napětí	53
6.2.1. Příprava měření	53
6.2.2. Postup měření	54
6.2.3. Zpracování získaných dat	56
6.3. Vyhodnocení naměřených veličin	56

7. Shrnutí a diskuse dosažených výsledků	70
7.1. Souhrn výsledků	70
7.2. Zhodnocení a diskuse výsledků	70
8. Závěry a náměty	73
8.1. Závěry	73
8.2. Náměty	73
Seznam použité literatury	75
Přílohy	

Seznam symbolů:

a [mm]	-vzdálenost konce leptané plochy od roviny snímání deformace
A [%]	-tažnost
b [mm]	-šířka vzorku
d [mm]	-vnitřní průměr
D [mm]	-vnější průměr
E [MPa]	-Youngův modul pružnosti
f [Hz]	-frekvence
F [N]	-vnější síla
F_a [N]	-axiální složka tvářecí síly
F_r [N]	-radiální složka tvářecí síly
F_t [N]	-tangenciální složka tvářecí síly
ΔG [mg]	-váhový úbytek
h_o [mm]	-tloušťka vzorku před válečkováním
h [mm]	-tloušťka vzorku po válečkování
h_n [mm]	-tloušťka vzorku po odstranění n -té vrstvy
ΔH [mm]	-odleptaná vrstva
ΔH_n [mm]	-tloušťka odleptané n -té vrstvy
$HV_{0,2}$	-tvrdost podle Vickerse při zatížení 0,2 kg
$HV_{0,2 \times}$	-tvrdost podle Vickerse při zatížení 0,2 kg - střední hodnota
$HV_{0,2 R}$	-tvrdost podle Vickerse při zatížení 0,2 kg - rozpětí
I [mm ⁴]	-průřezový modul setrvačnosti
l [mm]	-odleptaná délka povrchu
L [mm]	-délka vzorku
M_0 [N.mm ⁻¹]	-ohybový moment
p [MPa]	-tlak
r [mm]	-poloměr válečku
R_a [μm]	-střední aritmetická úchylka profilu
R_e [MPa]	-smluvní mez kluzu
R_m [MPa]	-smluvní mez pevnosti
$R_{p0,2}$ [MPa]	-smluvní mez kluzu při deformaci 0,2%

R_t [μm]	-největší hloubka drsnosti
R_z [μm]	-výška nerovnosti profilu
t [s]	-čas
y [mm]	-měřená hodnota deformace
y' [mm]	-průhyb nosníku
y'' [mm]	-pootočení měřicího třmenu
Z [%]	-kontrakce
δ [mm]	-rozdíl tloušťky průřezu před válečkováním a po válečkování
φ [°]	-úhel pootočení průřezu
σ [MPa]	-zbytkové napětí (+ tah, -tlak)
σ_s [MPa]	-skutečné napětí

1. Úvod

Než přistoupím k vlastnímu úvodu, dovolím si poznamenat, že tato práce zpracovává téma z oblasti výzkumu realizovaného na Katedře obrábění a montáže (KOM) Technické univerzity Liberec (TUL) a její řešení tedy odpovídá požadavkům, ale také možnostem tohoto pracoviště.

KOM na základě předchozí úspěšné spolupráce s Katedrou aplikované kybernetiky (KKY) přišla s požadavkem na automatizaci měření zbytkových napětí v povrchových vrstvách obrobku po jeho opracování. Dosavadní experimentální metodika byla již dostatečně ověřena opakovanými měřeními, jejichž vyhodnocování „ručně“ s minimální podporou výpočetní techniky bylo zbytečně zdlouhavé a namáhavé. Tato metodika tedy mohla být s menšími úpravami využita v automatizovaném systému.

1.1. Význam zadání pro strojírenskou výrobu

Současná strojírenská výroba je orientována na dosahování vysoké kvality při vzrůstající produkci. Firmy, které nedisponují příslušnými certifikáty kvality podle mezinárodních norem ISO 9000 a navazujících, nemají dnes šanci se na nadnárodním trhu uchytit a udržet. Ke dříve běžným požadavkům na přesnost rozměrů a tvarů, drsnost povrchu a vzájemnou polohu ploch dnes přistupují nároky na stabilitu vlastností materiálu obrobku a jeho tepelného zpracování, ale zejména na stav povrchové vrstvy obrobku (do určité, nutné hloubky) po obrábění.

Provozní zkušenosti a rozbor lomů dynamicky namáhaných součástí poskytují poznatky, že na povrchu nebo v malé hloubce pod ním obvykle vzniká únavový lom. Z toho vyplývá, že zde existuje určitý vztah mezi funkcí součásti a jakostí povrchu obrobené plochy, která byla vyrobena určitým technologickým procesem. Tento vztah je možno hodnotit ze dvou hledisek [12]:

1. - podle prostorového uspořádání (textury, morfologie) povrchu, což bývá vyjadřováno především jeho drsností;
2. - podle fyzikálních a chemických vlastností povrchové vrstvy součásti.

Pojmem integrita povrchu lze pak vyjádřit ovlivnění těchto hledisek metodami výroby ve vztahu k funkci součástky. Integrita povrchu tak v sobě zahrnuje podmínky, za kterých funkční povrch vzniká, účinky technologických metod a jejich vliv na vlastnosti nově vytvořené plochy a dává je do vztahu s funkčními požadavky na výrobek.

Lze říci, že vlastně vzniká nová vědecko-výzkumná disciplína, která se komplexně zabývá problematikou činných povrchů a jejich vazbou na funkci součásti ve stroji. Na jedné straně zapadá do oblasti tribologie a na druhé straně úzce souvisí s procesem obrábění, jímž se činný povrch vytváří. Bývá většinou součástí materiálového inženýrství a označuje se jako „povrchové inženýrství“ (surface engineering).

Během výroby mohou být výrobním procesem vyvolány v obrobeném povrchu tyto změny:

- povrch je plasticky deformován mechanickým a tepelným účinkem
- dochází k rekrytalizaci, případně fázovým transformacím
- mění se tvrdost povrchové vrstvy
- vznikají mikro- i makrotrhliny
- vytvářejí se zbytková napětí v povrchové vrstvě
- proběhly změny vlastností povrchové vrstvy v důsledku chemické absorpce
- dochází k dalším, zde blíže nespecifikovaným změnám.

Všechny výše vyjmenované změny vznikají nejen při běžných hrubovacích, ale i při dokončovacích operacích a bývají častými příčinami poruch, které snižují funkční spolehlivost strojních součástek.

Tento soubor charakteristik, které popisují vliv povrchové vrstvy, může být různě široký podle použité výrobní technologie, způsobu zatížení součástky v provozu, ale také podle technických možností, ekonomických a organizačních aspektů kontroly.

Takový soubor vlastností povrchu se dnes označuje pojmem „integrita povrchu“ (surface integrity). Tento výraz nemá přesně definované fyzikální ani technologické pozadí. Jde o soustavu vlastností povrchové vrstvy

vytvořených a ovlivněných technologickými procesy, které mohou působit na změnu funkčních vlastností součástí.

U vysoce namáhaných součástí, kde havárie zařízení nebo stroje neohrožuje okolí, zpravidla postačuje tzv. základní soubor údajů [2]:

1. topografie povrchu – zahrnuje *

- * drsnost povrchu

- ** kontrolu existence trhlinek

- *** kontrolu řádkovací mikroskopii

2. metalurgická kontrola povrchu – obsahuje

- * mikrostrukturní změny

- ** mikrotrhlíky

- *** vměstky

- **** mezikrystalickou korozi a oxidaci

- ***** průběh mikrotvrdosti

U součástí, které mají velmi nízkou životnost, špatně plní svou funkci a nebo svým porušením mohou způsobit havárii dopravních prostředků (např. letadla, lodi, vlaku, automobilu, ...) nebo energetických zařízení (např. jaderná elektrárna) s mimořádnými důsledky, se doporučuje posoudit integritu povrchu podle tzv. úplného souboru údajů [2], který zahrnuje:

A – základní soubor údajů

B – velikost a průběh zbytkových pnutí

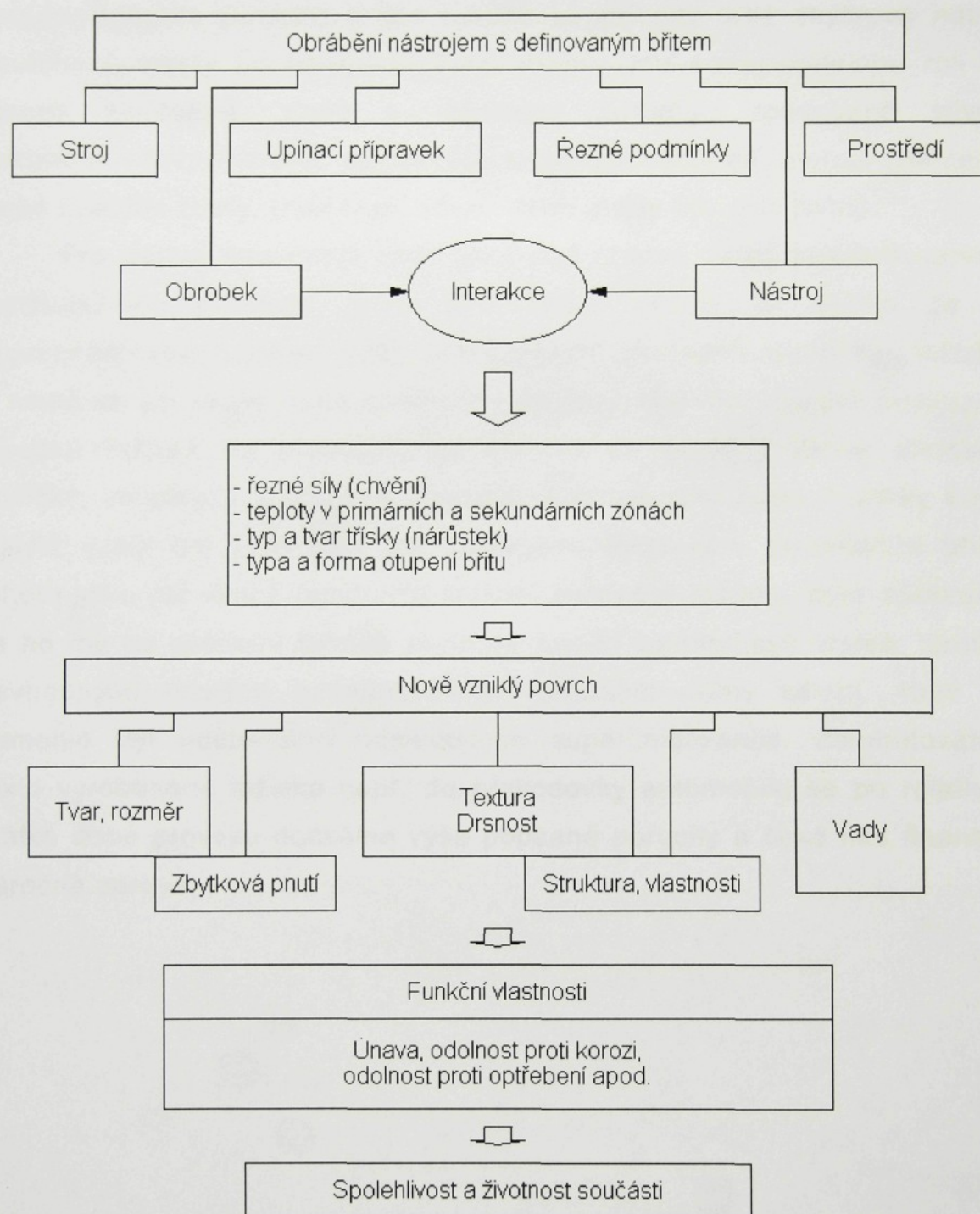
C – hodnotu vysokocyklové únavy při souměrném střídavém ohybu

D – sklon ke korozi pod napětím (podle potřeby)

Hierarchii postupu vytváření nového povrchu součástky při obrábění se zahrnutím vlivů na tento proces přehledně vyjadřuje postupové schéma na obr. 1.:

Obr. 1 Postupové schéma tvorby nového povrchu při obrábění

Ze souboru uvedených skutečností požadují vlivy a procesy vplyva, jak důležitou položkou současně strojnické výroby se staly. Vlivy vplyva vytvářených součástí pro funkce a spolehlivé pracovní stroje. Je třeba, že vlivy a významnou pozici v celkovém pojetí kvality



Obr. 1. Postupové schéma tvorby nového povrchu při obrábění

Ze souhrnu uvedených skutečností, požadavků, vlivů a procesů vyplývá, jak důležitou položkou současné strojírenské výroby se staly otázky kvality vyráběných součástí pro dokonale a spolehlivě pracující stroje. Je zřejmé, že nutnou a významnou pozici v celkovém pojetí kvality

zaujala integrita povrchu a pro mnohé strojní díly také zbytková napětí povrchové vrstvy po obrábění. Tato veličina má nezastupitelnou roli při výrobě součástek, které v důsledku poruchy, způsobené vlivem nekontrolovaného vzrůstu zbytkových napětí při obrábění, mohou znamenat velké finanční ztráty, poškození zdraví nebo ztráty lidských životů.

Pro oblast finančních ztrát lze uvést příklad velmi frekventovaného konstrukčního elementu, jakým jsou valivá ložiska. Je známo, že při provozním nasazení jsou velké rozdíly v jejich životnosti. Našla se i ložiska, u nichž se po určité době chodu při zatížení objevilo výrazné poškození kroužků ložisek na plochách, po kterých se odvalují valivé elementy (kuličky, válečky, ...). Z jejich povrchu se odlupovaly tenké šupinky kovu, jejichž vznik byl způsoben tzv. pittingem. Vědeckým zkoumáním příčin tohoto jevu, jež vedl k rapidnímu snížení životnosti ložiska, bylo dokázáno, že ho má na svědomí tahové zbytkové napětí v povrchové vrstvě. Vzniklo nevhodnými řeznými podmínkami při broušení dráhy valení, které už nemohlo být odstraněno následujícím superfinišováním. Zamontováním takto vyrobeného ložiska např. do převodovky automobilu se po relativně krátké době provozu dočkáme výše popsané poruchy a čeká nás finančně náročná oprava.

2. ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ A ZPŮSOBY JEJICH MĚŘENÍ

Při obrábění kovových součástek vznikají pod povrchem zbytková napětí, která dosahují značných hodnot. Zachovávají se v obrobených dílech, i když už vnější zatížení nepůsobí. Na tomto místě je třeba připomenout, že zbytková napětí vznikají také při jiných technologických operacích, spojených s intenzivní plastickou deformací a nebo tepelným zatížením povrchu (např. lisování za studena, rovnání obrobků, ...).

2.1. Definice zbytkových napětí a jejich charakteristika

2.1.1. Definice zbytkových napětí

Ve většině literárních pramenů, které jsem měl k problematice zbytkových napětí k dispozici, se neuvádí jejich jednoznačná definice. Pouze KOMENDA [4] uvádí její použitelné vyjádření:

Vnitřní napětí, která zůstávají v obrobku i po odstranění příčin, jež je vyvolaly, se považují za ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ.

V uzavřených systémech se mohou vyskytovat napětí, která lze roztřídit podle různých hledisek a tím je klasifikovat.

2.1.2. Charakteristika zbytkových napětí [2]

V současnosti používaná klasifikace bere v úvahu:

- A) - příčinu vzniku napětí => Aa) - vložená, Ab) - vnitřní
 - B) - dobu působení napětí => Ba) - okamžitá, Bb) - trvalá = zbytková
 - C) - objem, kde je dosaženo rovnováhy => Ca) - I. druhu
 - Cb) - II. druhu
 - Cc) - III. druhu.
- Aa) Vložená napětí vznikají, působí-li na soustavu vnější síly nebo momenty.
- Ab) Vnitřní napětí působí v systému, i když ten není z vnějšku zatěžován. Tento typ napětí musí být v uzavřené soustavě v rovnováze. Poruší-li se celistvost soustavy (obrobku, vzorku), pak se přestavují vnitřní síly a momenty. To se projeví její deformací.

- Ba) Okamžitá napětí zanikají po odstranění příčin, jimiž byla vyvolána a nepřesáhla mez kluzu. Mohou vzniknout rozdílem teplot v různých místech obrobku a zaniknout s vyrovnáním teplot, ale také při upnutí součástky. Přesto, že vymizí, mohou způsobit i výrazné nepřesnosti tvarové, např. při rovinném broušení magneticky upnuté součástky.
- Bb) Trvalá = zbytková napětí zůstávají v součásti i po odstranění příčin jejich vzniku, kdy vyvolaná napětí přesáhnou mez kluzu.
- Ca) Zbytková napětí I. druhu zasahují celý objem součástky, případně jeho značnou část a tím nabývají rovnováhy v makroobjemu obrobku, tj. jejich velikost je stálá v makroskopických rozměrech. Dojde-li k porušení silové nebo momentové rovnováhy třeba rozříznutím vzorku, dojde zde vždy ke změně rozměrů, případně tvaru tělesa.
- Cb) Zbytková napětí II. druhu lze považovat za místní krystalická napětí a týkají se jednoho nebo několika zrn dílu. Jsou podmíněna anisotropií zrna a u polykrystalických kovů je lze považovat za víceméně homogenní.
- Cc) Zbytková napětí III. druhu působí na objem několika krystalických buněk zrna, což odpovídá několika atomovým vzdálenostem. Jsou nehomogenní v těch nejmenších oblastech a rovnováhy dosahují teprve v určité přiměřeně velké části zrna. Makroskopické změny tělesa nenastanou po porušení této rovnováhy.

Závěrem k této charakteristice je nutno dodat, že se zpravidla vyskytují současně zbytková napětí všech tří druhů, ale v technické praxi se tento pojem zavedl jen pro napětí **I. druhu**. Z pohledu jejich měření se označují jako měřitelná nebo také makronapětí. Podle toho, jak vznikla, se pro ně také vžil pojem technologická pnutí.

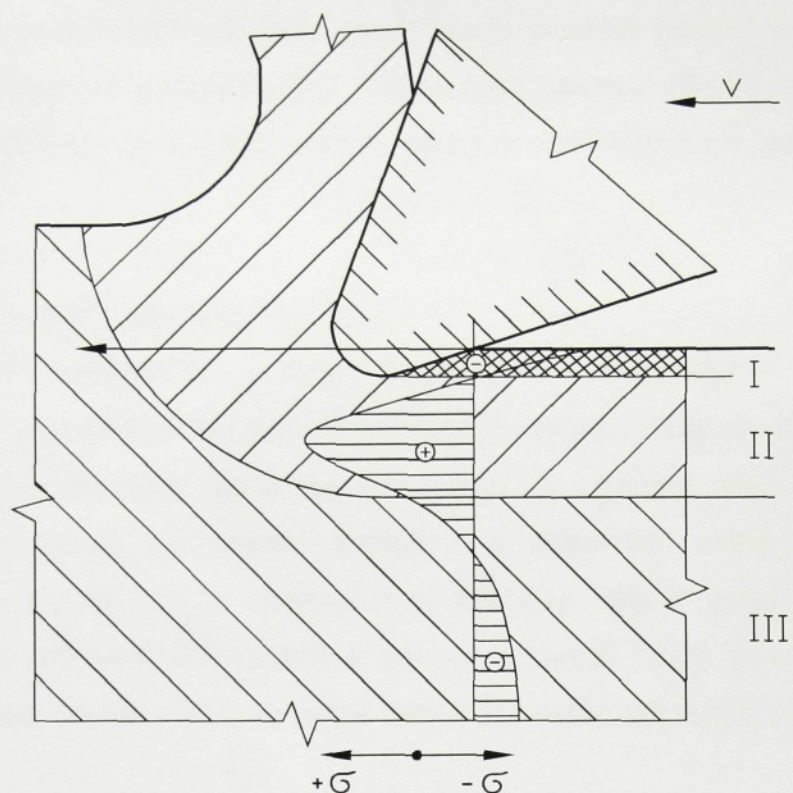
2.1.3. Mechanismus vzniku zbytkových napětí při obrábění [2]

Dojde-li k plastické deformaci v povrchové vrstvě obrobku, pak v ní mohou vzniknout zbytková napětí. Jejich smysl, tj. zda jde o tah (označováno symbolem +) nebo tlak (symbol –) má svůj původ ve způsobu,

jakým deformace vznikla. V souhrnu lze uvést následující příčiny, které ji způsobily:

- 1) - **mechanické síly** - v povrchové vrstvě vyvolaly nerovnoměrnou plastickou deformaci; za nerovnoměrnou je považována proto, že existují rozdíly mezi změnami, které byly vyvolány na povrchu a jádře obrobku; často se označuje za **silový účinek** dějů, které doprovázejí proces obrábění
- 2) - **tepelné zatížení** - v povrchové vrstvě způsobí vysokou plastičnost, která umožní plastickou deformaci účinkem tepelných napětí, daných rozdílem - nerovnoměrností - teplot na povrchu a v určité hloubce pod ním; ta se projeví jak při ohřevu, tak při ochlazování ohřátého povrchu; bývá také používán pojem **tepelný účinek** nebo **tepelné pnutí**
- 3) - **fázová transformace** nebo **vylučování nových strukturních složek** - tyto děje jsou vyvolány teplotou nebo deformací, což jsou faktory, které zpravidla společně doprovázejí každý proces obrábění; jejich podstatou je různý měrný objem jednotlivých typů struktur; hovoří se o **transformačním** nebo **strukturním účinku**
- 4) - **absorbce nových látek** (zejména plynů) do obrobeného povrchu, umožněná ohřevem povrchové vrstvy v průběhu obrábění; čistý, ohřátý a narušený povrch ochotně přijímá z okolního prostředí (vzduchu => kyslík, vodík, dusík a z řezné kapaliny její složky) vhodné prvky a komponenty, které způsobují oxidaci, sycení dusíkem ap. a ty pak zabírají určitý objem a neumožňují vyrovnání povrchového napětí.

Technologické příčiny vzniku zbytkových napětí názorně ukazuje obr. 2. [2]. Je na místě podotknout, že podle druhu operace obrábění vznikají tato pnutí působením některé z výše uvedených příčin, ale nejčastěji jejich superposicí.



Obr. 2. Schéma vzniku zbytkových napětí v povrchové vrstvě při obrábění plastických kovů [2]

- I - oblast tlakových zbytkových napětí, vyvolaných třením hřbetu o obrobenou plochu
- II - oblast tahových zbytkových napětí, která vznikají plastickým stlačením materiálu
- III - neovlivněná oblast, napětí je vyrovnáno v oblastech I a II

Při působení břitu řezného nástroje na povrch obráběného kovu vzniká v povrchových vrstvách plastická deformace, která způsobí zpevnění a změnu fyzikálně mechanických vlastností v této oblasti. Tím zde klesá hustota a zvětšuje se měrný objem. Toto zvýšení měrného objemu vyvolá v povrchové vrstvě tlakové napětí. Zvětšení měrného objemu se však omezuje jen na hloubku, do níž pronikla plastická deformace a nezabírá spodnější vrstvy kovu.

Ve II. oblasti se projeví výše uvedená plastická deformace tlakem na dosud nedeformovanou zónu, což v ní vyvolá pružnou deformaci. Po

skončení procesu řezání se této zóně snaží pružná deformace vyrovnat a působí tak tlakem na vnější vrstvy. Tím vzniká tlakové napětí.

Ve III. oblasti, spodnější vrstvě, se to projeví vznikem tahového napětí.

2.2. Způsoby měření zbytkových napětí

Určování velikosti, směru a smyslu zbytkových napětí není jednoduchou záležitostí na rozdíl od jiných materiálových vlastností. Lze říci, že téměř všechny způsoby, kterými se zjišťují tato napětí, jsou zdoluhavé, náročné na měřicí zařízení a techniku měření a někdy i nepřesné. Zpravidla jde o destruktivní metody, které např. při určování průběhu pnutí ve směru kolmém k povrchu téměř vždy nevratně poškodí součástku nebo vzorek. Tím se silně omezuje možnost jejich aplikace.

2.2.1. Základní způsoby stanovování zbytkových napětí

V podstatě lze zbytková napětí v obrobci stanovit těmito způsoby:

- A) - analyticko - výpočtově
- B) - experimentálně.

2.2.1.1. Analyticko - výpočtové metody

Analyticko - výpočtové metody lze rozdělit podle aplikovaného způsobu výpočtu v podstatě do dvou skupin na:

- AA) - pevnostně - pružnostní výpočty s aplikací teorie plasticity
- AB) - výpočty s aplikací metody konečných prvků.

Ještě některé nedávne publikace uváděly, že vzhledem k nadměrné náročnosti analyticko - výpočtových metod a jejich závislosti na nahodilosti některých parametrů, vstupujících do výpočtu, je jejich praktická použitelnost velmi omezená. S použitím počítačů se však tento nedostatek dosti významně snižuje.

Mnohem výrazněji to platí o metodě konečných prvků, která vykazuje podstatně lepší, tedy přesnější výsledky. Ty se dnes už značně blíží k

výsledkům, které se dosahují často náročnými experimentálními metodami [10].

2.2.1.2. Experimentální metody - přehled [11]

Ve vyšetřovaném obrobku umožňují experimentální metody stanovit zbytková napětí jak kvalitativně, tak i kvantitativně. Podle různých hledisek je jejich rozdělení možno provést např. takto:

BA) - dle porušení měřeného vzorku na:

BAa) - destruktivní metody

BAb) - polodestruktivní metody

BAc) - nedestruktivní metody;

BB) - dle principu na:

BBa) - mechanické metody

BBb) - fyzikální metody

BBc) - chemické metody;

BC) - dle charakteru měřené veličiny na:

BCa) - přímé metody

BCb) - nepřímé metody

BD) - dle napjatosti, kterou je možno měřením určit, na:

BDa) - jednoosá

BDb) - dvouosá

BDC) - trojosá

BE) - dle druhu napětí, která tato metoda dovoluje určit, na:

BEa) - napětí I. druhu

BEb) - napětí II. druhu

BEc) - napětí III. druhu

BF) - dle tloušťky vrstvy, ve které se stanovují zbytková napětí, na:

BFa) - v tenké povrchové vrstvě

BFb) - v celém průřezu obrobku

- BG) - dle tvaru součástky, pro který určitá metoda umožňuje stanovit zbytková napětí, pro:
- desky, trubky, válce, kroužky, disky, proužky, hranoly, ...

Pro výběr vhodné metody měření z výše uvedeného přehledu je rozhodující určení úrovně požadovaného výstupu získaných dat pro kvantitativní a kvalitativní popis zbytkových pnutí. Z historického vývoje experimentálních metod měření byla zbytková napětí určována [2]:

- i) *Mechanickými způsoby* (BBa), které jsou založeny na porušení rovnováhy vnitřních sil při odstranění části povrchového objemu nebo porušení celistvosti. Tím dojde k deformaci vzorku, která je úměrná pnutí, jež bylo v odebrané vrstvě. Přesnost výsledků je závislá na přesnosti změření deformace vzorku. Určuje se pouze průměrné napětí I. druhu (BEa) podle tvaru vzorku (BG) a to buď v jednoosé (BDa), dvojosé (BDb) nebo trojosé (BDc) napjatosti. Jde o metodu destruktivní (BAa), což je její nevýhoda. Je to měření přímé (BCa) pro povrchovou vrstvu (BFa).
- ii) *Ze zbytkové deformace kovové mřížky*, která se zjišťuje rentgenovou nebo neutronovou difrakcí. Patří do skupiny fyzikálních metod (BBb) a je nedestruktivní (BAc).

Při realizaci tzv. rentgenovou tenzometrií se stanovuje homogenní deformace mřížky různě orientovaných skupin zrn materiálu a tím se identifikují zbytková napětí I. a II. druhu (BEa, BEb) přímou cestou (BCa) v tenké povrchové vrstvě (BDa), kterou lze postihnout hloubkou proniknutí rtg. záření. Přes některé nevýhody má tyto přednosti: umožňuje lokální měření napětí, poskytuje informaci o jeho plošném rozdělení v různých směrech, stanovuje velikost zbytkového napětí u různých materiálů, fází, povlaků atd.

Neutronová tenzometrie je novou metodou, která analyzuje difraktované záření z náhodně orientovaných systémů meziatomových rovin. Za tímto účelem se využívá většinou svazek monochromatického záření tepelných neutronů, generovaných a modelovaných v jaderném reaktoru, někdy se též aplikuje pulzní polychromatické záření ze štěpného zdroje.

iii) Na základě *vybraných fyzikálních veličin*, např. zvukových nebo magnetických, které se mění vlivem účinku zbytkových napětí. Zatím se tyto metody používají jen v laboratorní podobě. Svůj význam mají především pro velmi rychlou diagnostiku geometricky podobných součástí a to z důvodu kalibrace. Umožňují odhad velikosti a smyslu povrchových napětí (BDa) a využívají se pro nedestruktivní kontrolu (BAc).

iii.a) Ultrazvukové metody [2] jsou založeny na vzájemné závislosti mezi mechanickým napětím, elastickými vlastnostmi a rychlostí nebo útlumem šíření elastických vln. Byl prokázán určitý značný stupeň shody mezi rychlostí šíření, útlumem ultrazvukové vlny a změnou mechanických vlastností materiálu.

iii.b) Akustická emise [6] představuje jednu z nejprogresivnějších metod zkoušení materiálů. Pod tímto pojmem se skrývá vznik a detekce tranzitní napěťové vlny, jako důsledku náhlého uvolnění energie v materiálu. U akustické emise hraje defekt aktivní úlohu, protože detekuje jen ty poruchy, které jsou během zatěžování nestabilní. Tím však jsou nebezpečné vzhledem k integritě sledovaného objektu.

iii.c) Magnetické metody [2] využívají závislosti tvaru magnetické hysterezní smyčky na vnitřním napětí ve vzorku. Pro praxi však nelze tuto metodu přímo použít, a proto se využívají některé magnetické veličiny z vratných i nevratných mikromagnetických procesů, jako jsou koercitivní síla, magnetický a akustický Barkhausenův šum, vratná permeabilita a dynamická magnetostrikce.

2.3. Shrnutí

Ze souhrnu výše uvedených poznatků vyplývá, že v současné době patří mechanické metody k nejrozšířenějším způsobům měření zbytkových napětí. K nejznámějším metodám patří především postup s průběžným elektrochemickým odleptáváním povrchových vrstev, a pak zajímavá polodestruktivní metoda jemného vrtání malého otvoru nebo mezikruží do hodnoceného povrchu. Její podstata tkví v relaxaci napětí v blízkosti vzniklého otvoru. Toto uvolnění vyvolá změnu místních povrchových

deformací, které se snímají třemi tenzometry, nalepenými těsně kolem otvoru. Důležité je přesné ustavení vrtáku jednak do středu tenzometrické růžice a jednak kolmo ke zkoumanému povrchu. Přes některé výhody (polodestruktivnost, rychlost a poměrně dobrou přesnost) je její nevýhodou značná finanční náročnost (jednorázové použití drahé tenzometrické růžice).

Na přední místo tedy patří metoda měření velikosti, gradientu a smyslu zbytkových napětí po obrábění, založená na plynulém elektrolytickém rozpouštění sledovaného povrchu vzorku, spojená s registrací vznikajících deformací. Tato metoda je zavedena na KOM a bude v dalších částech blíže popsána, protože její automatizace se stala zadáním této předložené práce.

2.4. Formulace problému a cíle diplomové práce

Po prostudování základních literárních pramenů o způsobech stanovování zbytkových napětí vyplývá, že zejména otázky měření této veličiny v závislosti na určitých způsobech obrábění jsou složitou záležitostí. Dále bylo třeba vzít v úvahu určité omezující podmínky, dané pracovištěm a jeho technickým a počítačovým vybavením. Seznámení s těmito podmínkami na KOM byla také věnována náležitá pozornost.

Další studium bylo věnováno otázkám výběru vhodného programového vybavení pro daný hardware v laboratoři zbytkových napětí a v návaznosti na to také problematice programování.

Na těchto základech bylo možné přistoupit k formulaci problému, která v návaznosti na zadaný úkol je předložena v této podobě:

* Na KOM je pro zjišťování zbytkových napětí po obrábění zaveden mechanický způsob měření, pracující s elektrolytickým odleptáváním plasticky deformovaných vrstev vzorků. Jejich deformace se snímala indukčními snímači a přes Wheatstonův můstek se zpracovávala na proměnná napětí, která se registrovala xy zapisovačem. Naměřená křivka se pak ručně proměřovala a byla vlastně podkladem pro výpočet zbytkových napětí v závislosti na hloubce pod povrchem.

**** Z toho vyplývá následující formulace problému:**

Zmodernizovat stávající měřicí systém tak, aby odpovídal současným možnostem výpočetní techniky (HW i SW) na KOM. To znamená, že naměřené parametry budou ukládány do paměti, následně statisticky zpracovány, získaná data budou vstupními údaji pro výpočet zbytkových napětí v závislosti na tloušťce odleptané vrstvy, aby mohl být vykreslen graf průběhu funkce $\sigma = f(\Delta H)$.

***** Vyřešením těchto problémů bude celý systém převeden do automatického režimu, což je cílem této diplomové práce.**

3. Rozbor původního stavu pracoviště elektrolytického odleptávání

3.1. Umístění měřicího stanoviště v univerzální buňce

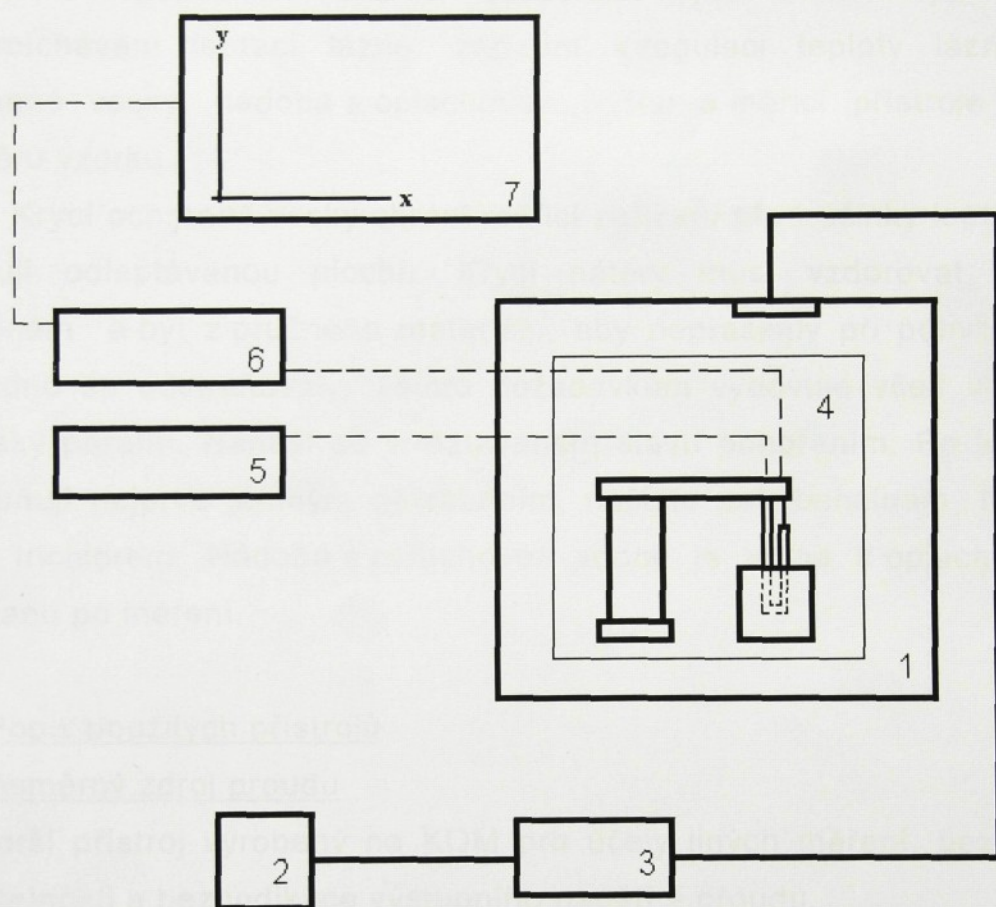
Pracoviště elektrolytického odleptávání bylo původně navrženo jako univerzální buňka vhodná pro více typů měření, která by se dala přemísťovat podle potřeby k zařízením, na kterých se bude měření provádět a zároveň bude oddělovat měřicí aparaturu od rušivých a destruktivních vlivů prostředí strojírenské dílny.

Toto řešení ovšem přináší i jisté potíže s nedostatkem prostoru uvnitř buňky. Ten je v tomto případě ještě zmenšen nutností oddělení části, kde se odehrává vlastní leptání od části, kde jsou umístěny měřicí přístroje. Většinu prostoru v části určené k leptání zabírá digestoř, nutná k odsávání výparů z elektrolytu, a tak na přípravu vzorků pro vlastní měření zbývá jen velmi málo místa. Je tedy nevhodné v tak malém prostoru připravovat větší série vzorků.

Druhá část buňky umožňuje jen velmi problematické umístění vlastní měřicí aparatury a přímo nutí, aby se veškeré, byť i jen přípravné činnosti týkající se měření, odehrávaly jinde a tedy bez přímého kontaktu s měřením.

3.2. Měřicí zařízení

Vlastní měřicí zařízení se sestává ze dvou částí. První z nich je tvořena stativem, který nese vzorek, elektrodu a indukční snímače, nádobou na elektrolyt, digestoří, prostředky pro přípravu vzorku pro leptání a jeho ošetření po vyjmutí z elektrolytu a prostředky pro udržení stability leptací lázně. Tato část je pečlivě oddělena od části druhé, která obsahuje zdroj stejnosměrného proudu, měřicí můstek a souřadnicový zapisovač. Spojení mezi oběma částmi měřicího zařízení je zajištěno pětipramenným společně stíněným kabelem používaným běžně v nízkofrekvenční technice, pomocí kterého je realizováno zapojení indukčních čidel do můstku a dvěma silovými nestíněnými vodiči pro napájení leptací lázně.



1 digestoř

2 ventilátor

3 odlučovač

4 vlastní měřicí zařízení

5 zdroj stejnosměrného proudu

6 měřicí můstek M 1000

7 souřadnicový zapisovač

Obr. 3. Blokové schéma pracoviště

Princip měření spočívá v kontinuálním zjišťování polohy měřicí tyčinky spojené s volným koncem odleptávaného vzorku. K vlastnímu vyhodnocení se využívá změny indukčnosti dvou diferenciálně zapojených indukčních snímačů. Indukční snímače jsou zapojeny v měřicím můstku,

Ustanovení zkušební metody
který slouží jako zdroj signálu pro měřicí souřadnicový zapisovač. K urychlení a stabilizaci leptání slouží zdroj stejnosměrného proudu. K dalšímu vybavení měřicího pracoviště patří elektrolyt, zařízení k promíchávání leptací lázně, zařízení k regulaci teploty lázně, krycí ochranné vosky, nádoba s oplachovou vodou a měřicí přístroje k určení rozměru vzorku.

Krycí ochranné vosky chrání měřicí zařízení před účinky leptací lázně a určují odleptávanou plochu. Krycí nátěry musí vzdorovat použitým kyselinám a být z pružného materiálu, aby nepraskaly při pohybu vzorku a snadno se odstraňovaly. Těmto požadavkům vyhovuje včelí vosk nebo lékařský parafín. Nanáší se v roztaveném stavu ponořením. Po leptání se odstraňují nejprve jemným oškrabáním, načisto pak benzínem, toluenem, nebo trichlorem. Nádoba s oplachovou vodou je nutná k oplachu vzorku a stojanu po měření.

3.3. Popis použitých přístrojů

stejnosměrný zdroj proudu

Je starší přístroj vyrobený na KOM pro účely jiných měření, bez uvedení zatížitelnosti a bez indikace výstupního napětí a proudu.

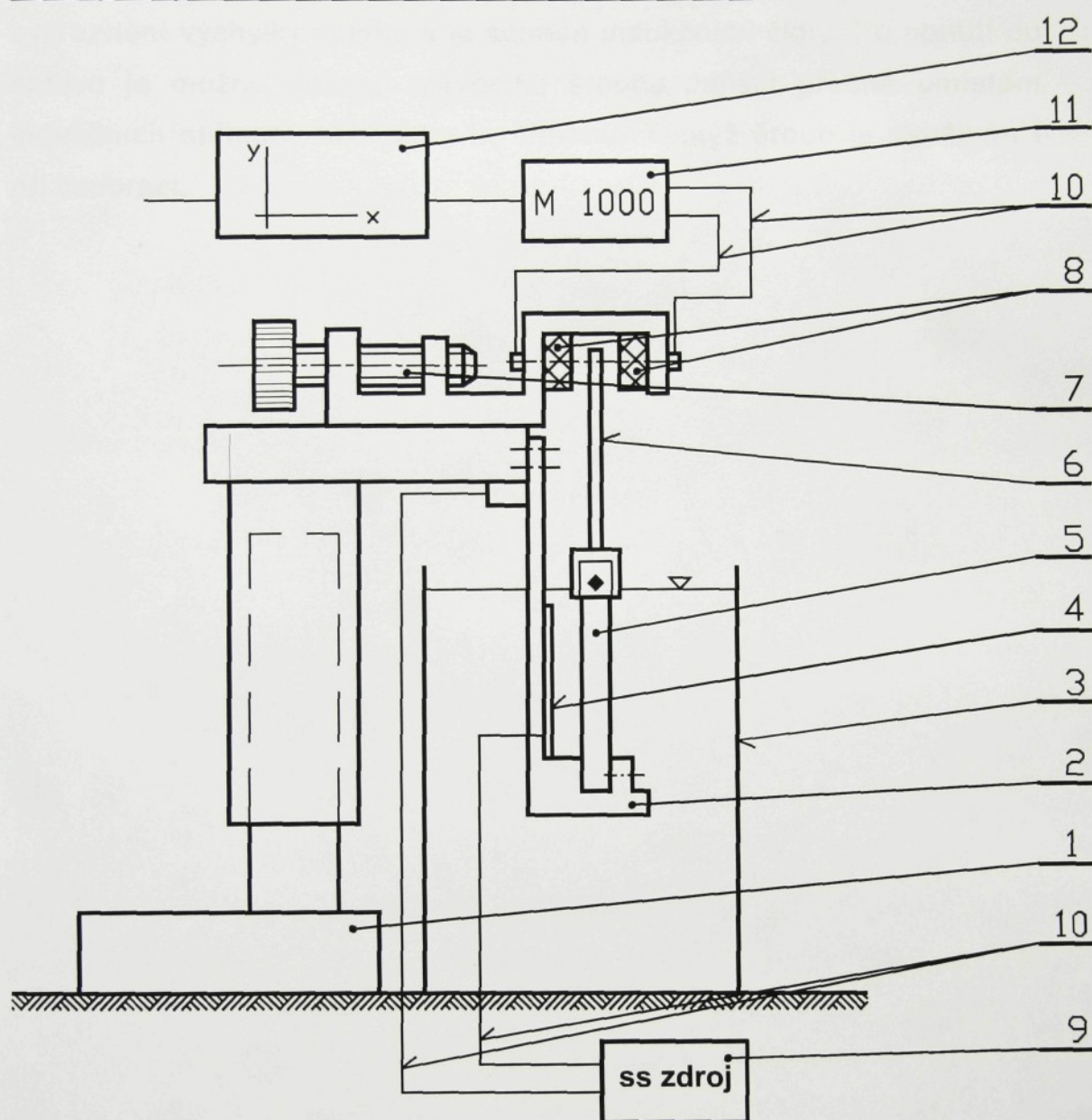
měřicí aparatura Mikrotechna M 1000

Měřicí aparatura M 1000 je modulový měřicí systém pro měření neelektrických veličin odporovými nebo induktivními snímači.

souřadnicový zapisovač

Je starší zařízení, používané na KOM pro registraci změn napětí v závislosti na čase. Má vstupní rozsah od -5 V do $+5\text{ V}$. Pro toto měření se osvědčil, protože díky poměrně velké setrvačnosti odfiltroval rychlejší změny vstupního napětí vyvolané výkyvy v napájení leptací lázně. Jeho nevýhodou byl dosti hrubý výstup, který při vyhodnocování umožňoval získat jen nepříliš přesné hodnoty a výsledek tak hlavně hovořil o směru napětí v povrchových vrstvách vzorku, než o jejich absolutní velikosti.

stativ pro upnutí vzorku a umístění indukčních čidel



- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| 1 stojan | 7 stavěcí šroub |
| 2 upínací třmen | 8 indukční snímače |
| 3 nádoba s elektrolytem | 9 stejnosměrný zdroj |
| 4 katoda | 10 vodiče |
| 5 zkušební vzorek (anoda) | 11 měřicí můstek M1000 |
| 6 měřicí třmen | 12 souřadnicový zapisovač |

Obr. 4. Stativ se vzorkem a indukčními snímači

Na zkušební vzorek je připevněn měřicí třmen, který zajišťuje zvýraznění výchylky vzorku a je snímán indukčními čidly. Po upnutí do stativu je možno pomocí stavěcího šroubu zajistit přesné umístění indukčních snímačů vzhledem ke třmenu. Tentýž šroub je využíván i při kalibraci.

4.2. Rekonstrukce měřené soustavy

První měření napětí bylo provedeno v měřící soustavě, která byla sestavena z měřícího přístroje, který byl připojen k měřícímu systému. Vzhledem k tomu, že měření bylo provedeno v měřící soustavě, která byla sestavena z měřícího přístroje, který byl připojen k měřícímu systému, bylo provedeno měření napětí. Vzhledem k tomu, že měření bylo provedeno v měřící soustavě, která byla sestavena z měřícího přístroje, který byl připojen k měřícímu systému, bylo provedeno měření napětí. Vzhledem k tomu, že měření bylo provedeno v měřící soustavě, která byla sestavena z měřícího přístroje, který byl připojen k měřícímu systému, bylo provedeno měření napětí.

Měřící soustava byla sestavena z měřícího přístroje, který byl připojen k měřícímu systému. Vzhledem k tomu, že měření bylo provedeno v měřící soustavě, která byla sestavena z měřícího přístroje, který byl připojen k měřícímu systému, bylo provedeno měření napětí.

4. Návrh a rekonstrukce zařízení na automatizovaný systém

4.1. Požadované vlastnosti navrhovaného zařízení

Na základě měření prováděných na výše popsaném zařízení byly konstatovány některé nedostatky v měřicím zařízení. Bylo tedy potřeba odstranit rušení, které vznikalo nevhodně zvoleným spojovacím kabelem mezi můstkem a indukčními snímači. Dále bylo nutno zlepšit stabilitu leptacího procesu a odstranit odpozorované zkreslení měření, vznikající v prvních několika desítkách vteřin po zapojení napájení leptací lázně.

Nejdůležitějším požadavkem na změnu v měřicím zařízení bylo nahrazení souřadnicového zapisovače počítačem s měřicí kartou a jeho vybavení softwarem tak, aby zůstala zachována metoda vyhodnocování naměřených hodnot, ale aby také bylo odstraněno zdoluhavé ruční zpracování grafického záznamu ze zapisovače. Zachována měla být vizuální kontrola měření zobrazením celého průběhu výchylky zjišťované na leptaném vzorku. Další důležitou vlastností měla být možnost archivace, zobrazení a tisk naměřených i vypočtených hodnot a jejich průběhů zobrazených v grafu.

4.2. Rekonstrukce měřicího zařízení

Prvním, nejlépe viditelným a nejsnáze odstranitelným nedostatkem měřicího zařízení, bylo rušení zapojení indukčních snímačů do můstku. Vzhledem k nutnosti oddělení části zařízení, kde se provádí leptání, od části, kde se měření zpracovává, je délka spojovacích kabelů téměř 5 metrů. Vzhledem k této vzdálenosti a frekvenci použitého napětí se jednotlivé větve zapojení navzájem ovlivňovaly a k tomu ještě přistupovalo rušení od napájení leptací lázně. Tento problém byl odstraněn použitím dvojité stíněného kabelu (oplet a folie) používaného ve vysokofrekvenční technice a dále odstraněním možnosti vzniku zemních smyček svedením všech zemnicích a stínících vodičů do jednoho bodu.

Dalším problémem byla značná nestabilita leptacího procesu, která se prakticky nezlepšovala ani použitím malých proudů a tím i prodloužením procesu leptání. Měřením bylo zjištěno, že tento nedostatek způsobuje

použitý, nedostatečně stabilní zdroj proudu. Byl proto nahrazen jiným, s podstatně lepšími parametry, jak co se týče stability, tak i regulace.

Další snahou byla eliminace zkreslení měření v jeho počátku. Vzhledem k tomu, že je leptání stabilizováno a urychlováno elektrolyticky, dochází po zapojení napájení leptací lázně, kde je jednou z elektrod samotný vzorek, ke vzniku magnetického pole, které má vliv na indukční snímače a způsobí tak odchylku, která v době, kdy se leptací proces rozbíhá, roste, pak však zůstává po celou dobu měření konstantní. Čas, kdy tato odchylka zůstane konstantní, se dá určit z okamžiku, kdy se stabilizuje napětí na zdroji proudu. Jedná se přibližně o prvních 50 sekund měření. Tento nedostatek vyplývá ze samotného principu měření a vzhledem k tomu, že měření trvá řádově desítky minut a za uvedených 50 sekund prakticky nedojde k zásadnímu porušení povrchové vrstvy vzorku a odstranění vlivu magnetického pole bez zásadní změny techniky měření je prakticky nemožné, je nutno tuto část měření z výpočtu vypustit.

4.3. Nahrazení souřadnicového zapisovače osobním počítačem s měřicí kartou

Základním kritériem pro výběr měřicí karty byl požadavek na její dostatečnou rozlišovací schopnost. Naopak nebyla nutná vysoká rychlost (vysoká frekvence vzorkování), protože proces leptání je přes elektrolytické urychlení poměrně pomalý (desítky minut). Vzhledem k použití, na dnešní dobu málo výkonného počítače (486 DX, 33 Mhz, 8 MB RAM), byl preferován výběr karty s vyrovnávací pamětí pro naměřená data a vlastním časovačem. Dalším kritériem byl napěťový výstup z měřicího můstku. Jeho rozsah od -2 V do +2 V umožňoval použít kartu bez přídavných vstupních dílů. Konečně poslední podmínkou bylo použití již existujícího přístrojového vybavení katedry KOM a výběr byl tak zúžen na několik měřicích karet, z nichž výše uvedeným požadavkům vyhovovala karta PCA 1608A.

4.4. Souhrn použitých prostředků

4.4.1. Výpočetní technika

Při měření zbytkových pnutí byl použit počítač PC 486 DX 33 MHz s 8 MB RAM a vestavěnou přídatnou kartou PCA 1608 A. Tato karta slouží jako 8 kanálový A/D převodník s rozlišením 16 nebo 22 bitů. Každý vstupní kanál je vybaven vlastním A/D převodníkem. Protože komunikace s osmi převodníky klade vysoké nároky na rychlost a časování přenosu, je PCA 1608 A osazena vlastním řídicím procesorem a vyrovnávací pamětí typu FIFO 1 kB

Přídavná měřicí karta PCA 1608 A	
Výrobce	TEDIA s.r.o. Plzeň
Kanály – analogové	8 diferenciálních
Kanály – číslicové	8 vstupů, 8 výstupů
Rozlišení	16/22 bitů
Vstupní rozsah	$\pm 2,5$ V
Vzorkovací frekvence	125 / 2000 Hz
Rozměry:	10x 185 mm

Tab. 1. Vybrané charakteristiky měřicí karty

4.4.2. Stejnosměrný zdroj elektrického proudu se stabilizací

Stejnosměrný zdroj elektrického proudu	
Rozsah proudu I [A]	$1 \cdot 10^{-3}$ / 10
Rozsah napětí U [V]	1 / 50

Tab. 2. Rozsahy nastavení zdroje el. proudu

4.4.3. Měřicí aparatura Mikrotechna M 1000

Měřicí aparatura M 1000 je modulový měřicí systém pro měření neelektrických veličin odporovými nebo induktivními snímači. Obsahuje měřicí zesilovače, dolnofrekvenční propusti, výkonové zesilovače a indikační zdrojové jednotky, které lze instalovat v libovolných kombinacích do zástavbových skříní.

Maximální výstupní napětí [V]	-2 / +2
Citlivost [mV/V]	0,1/ 0,2/ 0,5/ 1/ 2/ 5/ 10 /20 /50
Filtrace [Hz]	40/ 80/ 160

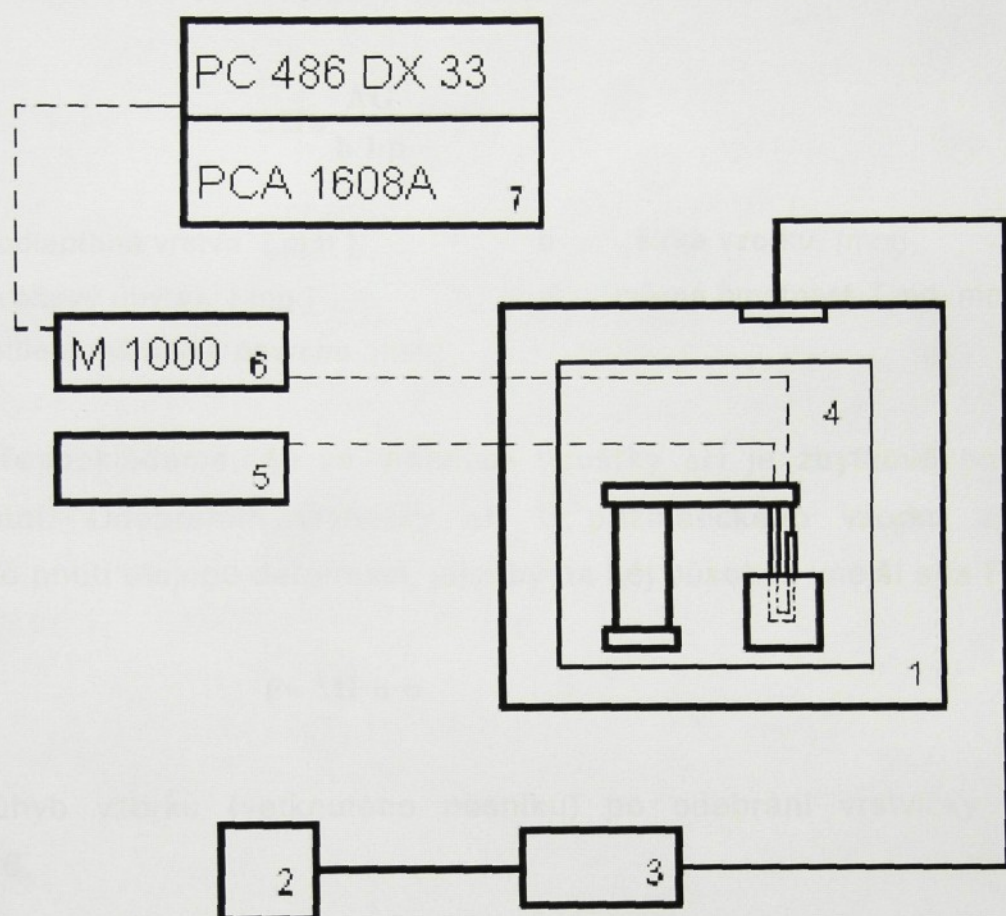
Tab. 3. Rozsahy nastavení měřicí aparatury M1000

4.4.4. Neupravovaná zařízení

Z původního zařízení byla převzata celá část, účastníci se přímo leptání. To je stativ s indukčními snímači, prostředky pro odvětrání a promíchávací elektrolytu. Dále byl převzat měřicí můstek.

4.5. Výsledné sestavení pracoviště

Po provedení výše uvedených úprav bylo celé pracoviště instalováno v původní universální buňce na KOM jako laboratoř zbytkových napětí. Blokové schéma celého automatizovaného měřicího systému představuje obr. 5.



- | | |
|---------------------------|------------------------------------|
| 1 digestoř | 5 zdroj stejnosměrného proudu |
| 2 ventilátor | 6 měřicí můstek M 1000 |
| 3 odlučovač | 7 počítač s vloženou měřicí kartou |
| 4 vlastní měřicí zařízení | |

Obr. 5. Blokové schéma zrekonstruovaného pracoviště

4.6. Výpočet zbytkových pnutí pro prizmatický vzorek

Při postupném odstraňování vrstev materiálu, kontinuálním snímání a registraci vznikajících deformací, získáváme průběh deformace v závislosti na čase, který lze převést na závislost deformace - hloubka pod

povrchem. Podle Faradayových zákonů elektrolýzy lze odleptanou hloubku určit z váhového úbytku a její závislost na čase považovat za lineární:

$$\Delta H = \frac{\Delta G}{b \cdot l \cdot \rho} \quad (1)$$

ΔH . . . odleptaná vrstva [mm]

b . . . šířka vzorku [mm]

ΔG . . . váhový úbytek [mg]

ρ . . . měrná hmotnost [mg. mm⁻³]

l . . . odleptaná délka povrchu [mm]

Předpokládáme, že ve vrstvičce tloušťky ΔH je zbytkové pnutí σ konstantní. Odebráním vrstvičky ΔH u prizmatického vzorku způsobí zbytkové pnutí stejnou deformaci, jako by na něj působila vnější síla F .

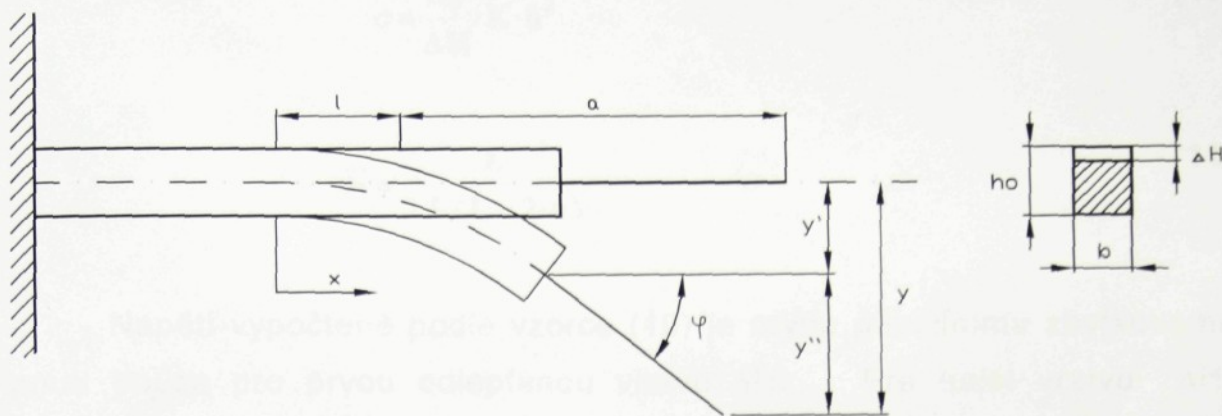
$$F = \Delta H \cdot b \cdot \sigma \quad (2)$$

Průhyb vzorku (vetknutého nosníku) po odebrání vrstvičky ΔH je na obr. 6.

$$\Delta y = \Delta y' + \Delta y'' \quad (3)$$

$$\Delta y' = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \int_0^l M_0 \cdot x \, dx = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \frac{M_0 \cdot l^2}{2} \quad (4)$$

$$\Delta y'' = a \cdot \Delta \varphi = \frac{a}{E \cdot I} \cdot \int_0^l M_0 \, dx = \frac{1}{E \cdot I} \cdot M_0 \cdot l \cdot a \quad (5)$$



- | | |
|---|---|
| l - délka leptané plochy | y' - průhyb nosníku |
| a - vzdálenost konce leptané plochy od roviny snímání deformace | y'' - pootočení měřicího třmenu v rovině měření |
| φ - úhel pootočení koncového průřezu | b - šířka průřezu |
| y - měřená hodnota deformace | h_0 - tloušťka průřezu |

Obr. 6. Průhyb vzorku po odebrání vrstvičky ΔH

$$M_0 = \sigma \cdot b \cdot \Delta H \cdot \frac{h}{2} \quad (6)$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (7)$$

Po dosazení rovnic (4),(5) a (6) do rovnice (3) dostaneme

$$\Delta y = \frac{M_0 \cdot l}{E \cdot I} \cdot \left(\frac{1}{2} + a \right) = \frac{\sigma \cdot b \cdot \Delta H \cdot h \cdot l}{4 \cdot E \cdot I} \cdot (1 + 2 \cdot a) \quad (8)$$

Vyjádřením napětí σ z rovnice (8) a dosazením rovnice (7) dostaneme

$$\sigma = \frac{\Delta y}{\Delta H} \cdot \frac{4 \cdot E \cdot b \cdot h^3}{12 \cdot b \cdot l \cdot h \cdot (1 + 2 \cdot a)} \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{\Delta y}{\Delta H} \cdot K \cdot h^2 \quad (10)$$

$$K = \frac{E}{3 \cdot l \cdot (1 + 2 \cdot a)} \quad (11)$$

Napětí vypočtené podle vzorce (10) je rovno původnímu zbytkovému pnutí pouze pro prvou odleptanou vrstvu ΔH_1 . Pro další vrstvu ΔH_2 musíme napětí korigovat, neboť odleptání předchozí vrstvy způsobilo namáhání celého průřezu vzorku na tah silou F a na ohyb momentem M :

$$F = \sigma_1 \cdot b \cdot \Delta H_1 \quad (12)$$

$$M = \sigma_1 \cdot b \cdot \Delta H_1 \cdot \frac{h - \Delta H_1}{2} \quad (13)$$

Napětí vzniklé ve vrstvě ΔH_2 je tedy

$$\sigma_{2t} = \frac{F}{S} = \frac{\sigma_1 \cdot b \cdot \Delta H_1}{b \cdot (h - \Delta H_1)} = \frac{\sigma_1 \cdot H_1}{h - \Delta H_1} \quad (14)$$

$$\sigma_{20} = \frac{M}{W_0} = \frac{\sigma_1 \cdot b \cdot \Delta H_1 \cdot (h - \Delta H_1)}{2 \cdot \frac{1}{6} \cdot b \cdot (h - \Delta H_1)^2} = \frac{3\sigma_1 \cdot \Delta H_1}{(h - \Delta H_1)} \quad (15)$$

Celkové působení vrstvy 1 na vrstvu 2

$$\sigma_{2t} + \sigma_{20} = \frac{4 \cdot \sigma_1 \cdot \Delta H_1}{h - \Delta H_1} \quad (16)$$

Korekce (16) se budou pro jednotlivé vrstvy sčítat, takže obecný tvar rovnice (10) bude

$$\sigma_n = \frac{\Delta y_n}{\Delta H_n} \cdot K \cdot (h_n)^2 - \sum_{k=1}^{n-1} \sigma_k \cdot \frac{4 \cdot \Delta H_k}{h_k} \quad (17)$$

σ_n . . . zbytkové pnutí ve vrstvě n

h_n . . . tloušťka vzorku po odstranění vrstvy n

σ_k . . . skutečné zbytkové napětí v předchozích vrstvách

Δy_n . . . deformace vzniklá odleptáním vrstvy n

ΔH_n . . . tloušťka n -té odebrané vrstvy

$$h_n = h - \sum_{k=1}^n \Delta H_k \quad (18)$$

Při malém počtu odebraných vrstev, tj. když se tloušťka vzorku příliš nezmění a když napětí σ_n mají malou velikost, je rozdíl mezi rovnicí (10) a rovnicí (17) zanedbatelný. Uvedené vztahy platí pro prizmatický nosník.

Ze záznamu časového průběhu deformací a naměřených geometrických veličin je možno vypočítat odpovídající zbytkové pnutí pro jednotlivé vrstvy materiálu pod sledovaným povrchem.

Jestliže je t celková doba leptání a ΔH tloušťka odleptané vrstvy pak vrstvě $\Delta H=0,01$ mm tedy odpovídá čas:

$$\Delta t_{0,01} = \frac{t}{100 \cdot \Delta H} \quad (19)$$

Za čas Δt_n došlo k přírůstku deformace Δy_n příslušející vrstvě ΔH_n . Napětí úměrné síle, která by vyvolala stejnou deformaci Δy_n , se vypočítá ze vztahu (10).

Na stejné úvaze je založen i výpočet průběhu zbytkových pnutí pro vzorky kruhové. Vychází se přitom z teorie křivých prutů.

5. Návrh a tvorba software pro měření, zpracování a vyhodnocování dat

5.1. Výběr vhodného programovacího jazyka

Programovací jazyk byl volen tak, aby bylo možno vyvinout aplikaci jak pro prostředí MS-DOS, tak pro prostředí MS-Windows. Vzhledem k použití málo výkonného počítače (viz. kap. 4.4.), který neumožňuje pro grafický výstup využít možností Windows 95 a vyšších verzí, byla nutnost vyvíjet aplikaci jako 16-bitovou pro Windows 3.11. Takto vyvinutá aplikace je pak použitelná i na vyšších verzích Windows, které ale vyžadují výkonnější hardware počítače.

Zkušenosti s použitím několika programovacích jazyků a jejich vývojových prostředí vedly nakonec k použití Microsoft C++ v.1.52 z roku 1993. Jako jediný bez problémů umožňuje použít části zdrojového programu pro MS-DOS přímo v aplikaci vytvořené pro Windows a díky vývojovému prostředí AppStudio umožňuje použití objektů Microsoft Foundation Classes a vytvořit tak standardní aplikaci pro Windows.

Další výhodou je, že tato verze jazyka C je dnes již volně dostupná.

5.2. Požadavky na vytvářený software

Prvním požadavkem bylo vypracování specializovaného SW tak, aby obsluha byla co nejjednodušší, protože univerzální SW klade vyšší nároky na obsluhu a je stejně nutné přizpůsobovat ho pro dané měření. Také takový SW bývá náročnější na použitý hardware.

Druhým požadavkem bylo vypočítávat výsledná napětí podle stejného modelu výpočtu, jaký byl použit v původním řešení.

Třetím požadavkem byla možnost vizuální kontroly měření, tak jak tomu bylo v případě využití souřadnicového zapisovače.

Posledním požadavkem bylo zachování možnosti ručního označování bodů z grafu naměřených výchylek pro výpočet zbytkového napětí.

5.3. Základní možnosti hardware podmiňující vytváření software

Nejdůležitější pro vytváření SW byly vlastnosti měřicí karty PCA 1608A. Tato karta je vybavena vlastním řídicím procesorem a počítač tak nemusí přímo obsluhovat A/D převodníky. Řídicí procesor zajišťuje kromě obsluhy A/D převodníků i předzpracování a přenos dat do vyrovnávací paměti FIFO o velikosti 1 kB. Dále je karta vybavena vlastním oscilátorem, což umožňuje vzorkovat měření bez stálého hlídání počítačem, ale snižuje počet použitelných vzorkovacích frekvencí. V tomto případě je jich pět v rozsahu 125 Hz až 2000 Hz. Dále karta zabírá 8 adres z I/O prostoru počítače 200_H až 3F8_H a bázovou adresu je možno v tomto prostoru relokovat. Tak jsou dány adresy registrů karty. Pomocí těchto registrů jsou předávány řídicí povely a data kartě a přijímány signály a data z karty. Velmi výhodnou vlastností karty je, že umí vyvolávat přerušení v měřicím počítači na základě stavu naplnění vyrovnávací paměti.

Další možnosti hardware už lze považovat za omezující. Jedná se hlavně o malý výkon použitého PC viz. 5.1.

5.4. Tvorba vlastního programového vybavení

Tvorba vlastního SW probíhala ve třech fázích:

1. vytvoření jednoduchého programu pro MS-DOS, pomocí kterého se ověří funkčnost řetězce zařízení pro leptání, měřicí můstek, karta, PC
2. vytvoření větších modulů pro MS-DOS, které již budou mít všechny požadované funkce
3. vytvoření kompletního SW pro Windows 3.11

1. V průběhu vytváření tohoto programu byly zjišťovány vlastnosti aparatury jako celku i vlastnosti jednotlivých komponentů.

Zvláštní pozornost byla věnována využití vlastností měřicí karty. Byl vybrán režim karty, který umožňoval omezit množství naměřených hodnot, neboť vlastní proces leptání není příliš rychlý a tak i nejnižší vzorkovací frekvence 125 Hz je zbytečně vysoká. Zvolený režim sice provádí vzorkování frekvencí 250 Hz, ale do FIFO ukládá průměr vždy 5-ti po sobě

jdoucích hodnot. Dále byla ověřována funkčnost vyvolávání přerušení v PC. Protože použitá karta byla již v minulosti využívána pro jiná měření, došlo k jejímu značnému poškození. Po opravě u výrobce se však již nepodařilo funkci přerušení využít. Nebylo tedy možné přenášet data z karty pod přerušením a děje se tak v normálním režimu pouze na základě příznaků generovaných v registrech karty. Tento princip je použit ve všech dalších verzích SW, v komentářích zdrojového programu pak zůstaly neověřené funkce pro obsluhu přerušení.

V této části vývoje bylo ověřeno, že pro dané měření plně vyhovuje 16-ti bitové rozlišení měřených dat, přestože karta umožňuje využití i 22-ti bitového rozlišení.

Dále byla ověřena linearita měřicí soustavy v pracovní oblasti měření. Z toho bylo možno vyjít při tvorbě SW pro její kalibraci.

2. Prvním modulem, který byl vytvářen, byl program pro vlastní měření. Tento program si nejprve vyhradí místo v paměti pro zaznamenání 50 minut měření, pak provede inicializaci karty a čeká na stisk tlačítka pro začátek měření. Na základě příznaku FIFOHF (poloviční zaplnění FIFO) přenáší data z této paměti až do nastavení příznaku FIFOEF (prázdná FIFO). V době kdy k přenosu dat nedochází PC vykresluje z už získaných dat časový průběh změny vstupního napětí a čas od počátku měření v sekundách. Indikuje tak výchylku na měřeném vzorku. Po ukončení stiskem klávesy uloží naměřená data do souboru. Jsou uložena ve dvoubyteovém formátu celého čísla, bez znaménka. Číslo 0 přitom odpovídá hodnotě cca. **-2,5 V** a číslo 65535 hodnotě cca. **+2,5 V**. Tento interval je pokryt rovnoměrně. Přesné hodnoty se zjistí až na základě kalibrace.

Po ověření funkčnosti tohoto modulu byl vytvářen modul pro kalibraci, ve kterém byly využity a modifikovány části měřicího programu. Fyzicky se kalibrace provádí tak, že ke třmenu, který nese indukční čidla je přiložen číselníkový úchylkoměr a pohybem šroubu se nastavují jednotlivé polohy čidel vzhledem ke vzorku. V kalibračním programu se každá poloha

zaznamená, jak v podobě hodnoty vstupního napětí elektronicky na pokyn z klávesnice, tak také manuálním zápisem příslušné výchylky. Program pak provede výpočet kalibračních konstant pomocí lineární regrese a metody nejmenších čtverců [14].

Soubor naměřených hodnot z prvního modulu a kalibrační konstanty z druhého jsou použity jako vstupní údaje do modulu třetího spolu s parametry vzorku. Program vykreslí do grafu závislost výchylky vzorku na hloubce jeho odleptání. Posunováním svislé čáry po grafu při současném zobrazování hodnot hloubky a výchylky lze vybírat a označovat body grafu, které budou využity pro vlastní výpočet. Zde se pak provádí výpočet na základě metody popsané v kapitole 4.6. Výstupem je soubor obsahující v jednom sloupci hloubku pod povrchem a v druhém příslušné napětí. Tento soubor lze zpracovat tabulkovým procesorem.

3. Na základě měření prováděných s moduly pro MS-DOS, byla ověřena jejich správná funkce a bylo možno vytvářet SW pro Windows 3.11. K tomu sloužilo vývojové prostředí AppStudio uvedené v kapitole 5.1. S jeho pomocí lze snadno vytvořit okno aplikace pro Windows včetně roletových menu a odkazů. Do hlavního souboru takto připravené aplikace byly přidány výkonné části z ověřených modulů. Takto byly spojeny do jednoho programu s podstatně lepším ovládáním.

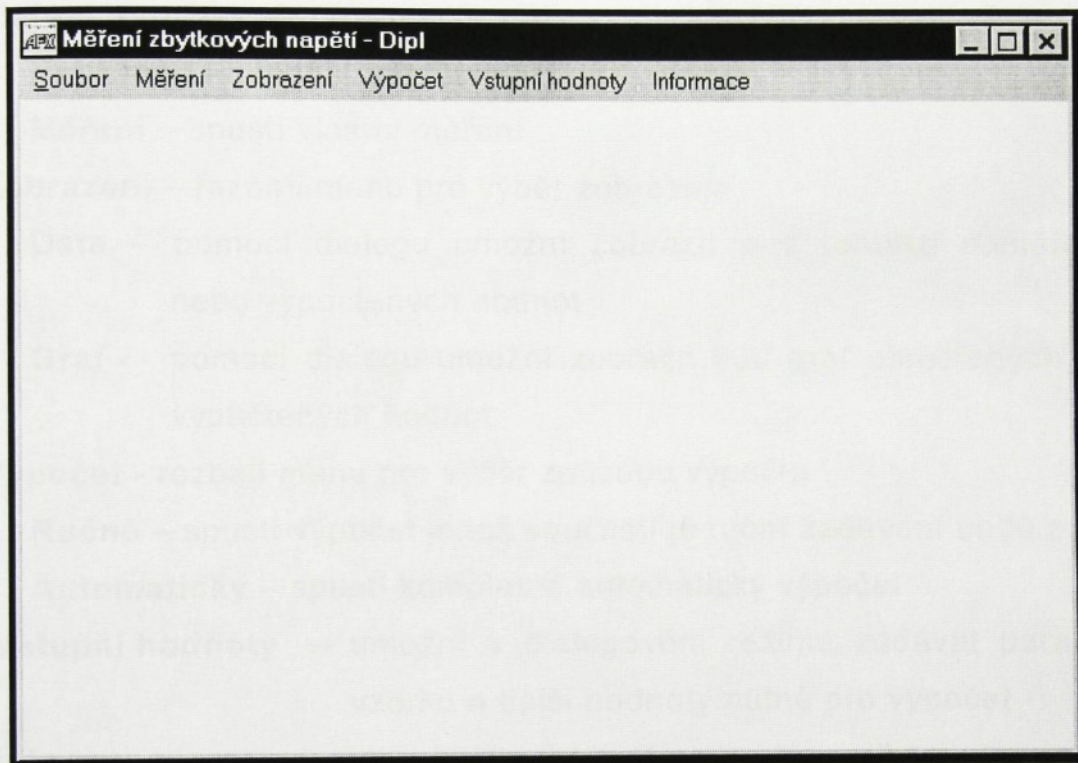
Dále byly přidány funkce pro automatický výpočet bez nutnosti vybírání bodů z grafu. Tento výpočet je umožněn tím, že pomocí polynomiální regrese a metody nejmenších čtverců [14] je proložena polynomiální funkce 5-tého řádu naměřenými hodnotami a s konstantním krokem v souřadnicích odleptané hloubky jsou určovány velikosti výchylky a tento soubor hodnot je pak použit do již ověřeného výpočtového modelu viz. 2.

Byl také přidán výstup v podobě spojnicového grafu hodnot zbytkového napětí v závislosti na odleptané hloubce a výpisu odpovídající tabulky hodnot. Oba tyto výstupy lze i tisknout.

Ostatní funkce modulů zůstaly zachovány.

5.5. Popis použití vytvořené aplikace

Po spuštění aplikace v prostředí Windows se na pracovní ploše objeví okno aplikace obr. 7. s hlavními položkami roletového menu.



Obr. 7. Okno aplikace

V tomto okně jsou prováděny veškeré operace týkající se zobrazování.

Funkce jednotlivých položek menu jsou:

1. Soubor - rozbalí menu s položkami pro práci se soubory, tisk a ukončení programu

Otevřít – načte starší, v této aplikaci vytvořený soubor a je možné s ním provést nový výpočet jinou metodou, nebo opravit vstupní hodnoty

Uložit - uloží soubor vytvořený v této aplikaci pod defaultním názvem nebo pod původním názvem

Uložit jako – uloží soubor pod zadaným názvem

Tisk - vytiskne na tiskárně stejné výstupy jako ve volba **Zobrazení** na obrazovku

Ukázka před tiskem - ukáže umístění tištěného výstupu na stránce

Konec – ukončí celý program

2. **Měření** – rozbalí menu s položkami pro vlastní měření a kalibraci

Kalibrace – umožní provést kalibraci

Měření – spustí vlastní měření

3. **Zobrazení** – rozbalí menu pro výběr zobrazení

Data – pomocí dialogu umožní zobrazit buď tabulku naměřených nebo vypočtených hodnot

Graf - pomocí dialogu umožní zobrazit buď graf naměřených nebo vypočtených hodnot

4. **Výpočet** - rozbalí menu pro výběr způsobu výpočtu

Ručně – spustí výpočet jehož součástí je ruční zadávání bodů z grafu

Automaticky – spustí kompletně automatický výpočet

5. **Vstupní hodnoty** – umožní v dialogovém režimu zadávat parametry vzorku a další hodnoty nutné pro výpočet

6. **Informace** – rozbalí menu s nabídkou informovat o aplikaci

O aplikaci – otevře okno s informacemi o programu

6. Ověření funkčnosti automatizovaného systému provedením experimentů

6.1. Technologická příprava vzorků [10]

Měření zbytkových napětí bylo provedeno mechanickou metodou při elektrolytickém odleptávání deformovaných vrstev vzorku tak, jak byla podrobně popsána v kapitolách 3 a 4.

6.1.1. Volba materiálu na výrobu vzorků

Pro názornost prokázání funkce automatizovaného systému a také s přihlédnutím k návaznosti na výzkumné práce KOM byla pro analýzu zbytkových napětí zvolena tvářená povrchová vrstva, provedená válečkováním. Jde o jednu z metod mechanických dokončovacích procesů, která upravuje povrch tvářením za studena. Díky dynamickému mechanickému účinku zajišťuje zpevnění povrchových vrstev, doprovázené příznivým tlakovým napětím a většinou i lepší drsností povrchu.

Válečkový materiál má značný vliv na všechny rozhodující podmínky technologie válečkování. Vhodnost oceli k válečkování lze posuzovat např. podle procenta obsahu uhlíku, neboť s jeho stoupajícím množstvím v oceli klesá její tvárnost a stoupá deformační odpor. Nepříznivý vliv na tvárnost mají také některé prvky jako např. křemík, mangan, síra, fosfor, chrom, aj. Z hlediska mechanických vlastností oceli jsou rozhodující především hodnoty meze kluzu R_e , pevnosti R_m , tažnosti A a kontrakce Z . Oceli, u nichž je poměr hodnoty $R_e / R_m \leq 0,65$ až $0,7$ tažnost $A \geq 15\%$ nebo kontrakce $Z \geq 60\%$, lze považovat za zvlášť vhodné k válečkování.

Na Katedře obrábění a montáže TU v Liberci byl již několikrát použit materiál 14220.3 při řešení diplomových prací na téma měření zbytkových napětí metodou elektrolytického odleptávání a jsou s ním tudíž zkušenosti např. při volbě elektrolytu, apod. Protože materiál - ocel 14220.3 - vyhovuje i výše uvedeným podmínkám, byl použit k výrobě vzorků pro potřeby této diplomové práce. Chemické složení použitého materiálu je uvedeno v tab.4.

Chemické složení v %		
Prvek	ocel 14220 dle normy	ocel 14220.3 rozbor použitého materiálu
C	0,14 - 0,19	0,131
Mn	1,10 - 1,40	1,343
Si	0,17 - 0,37	0,339
P	0,035	0,019
S	0,035	0,025
Cr	0,80 - 1,10	0,986
Ni	0,30	0,107
Cu	0,25	0,211

Tab. 4. Chemické složení materiálu

Charakteristika struktury použitého materiálu:

Struktura feriticko - perlitická, výrazně řádkovitá. Perlit je místy ještě lamelární, místy vykazuje stopy rozpadu a počátku sferoidizace. Podle obsahu uhlíku lze materiál zařadit do jakosti 14 220.2 (.3) - nedokonalé měkké žíhání. [13, 15]

I když chemické složení a stav materiálu v závislosti na tepelném zpracování neodpovídá příslušné jakosti, bylo nadále ponecháno označení 14220.3.

Mechanické vlastnosti použitého materiálu byly zjištěny ze zkoušky tahem.

6.1.2. Výroba vzorků

Pro experimentální měření byly na KOM vyrobeny z výše uvedených materiálů vzorky. Přestože zvolená technologie ovlivňování povrchové vrstvy zajistí při proběhnutí plastické deformace v dostatečné hloubce úplnou přestavbu zbytkových pnutí po předchozím obrábění, uvádím pro úplnost způsob výroby vzorků.

polotovár 4HR 80-100 ČSN 42 55 19

materiál 14220.3

Polotovár byl rozřezán na rozměr 80x80x10 na strojní pile KFD 250 a obroben čelním frézováním na vertikální frézce FA 4A-V na rozměr 80x80x7.

Stroj	FA 4A-V (TOS Kuřim)
Nástroj	NAREX 80805R-S45SE12F
Otáčky	$n=350 \text{ min}^{-1}$
Posuvová rychlost	$S_{ot}=80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Tab. 5. Řezné podmínky při frézování

Jednotlivé kusy byly rozřezány na strojní pile MS 160 na rozměr 11x7x80 a obrobena čelním frézováním na frézce FA 4A-V s přídavkem na broušení 0,1 mm na rozměr $h=9,3$ $b=7$ $L=80$.

Stroj	BPH 20 NA
Nástroj	A99B 46L 8V- ČSN 22 4510-200x20x51
Otáčky	$A=2500 \text{ min}^{-1}$
Posuvová rychlost	$S=12 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Hloubka třísky	$a_e=0,005 \text{ mm}$

Tab. 6. Řezné podmínky při broušení

Přesných rozměrů vzorku ze strany určené k válečkování bylo dosaženo broušením na rovinné brusce s magnetickým upínáním BPH 20 NA. Vzorky byly broušeny najednou ve třech sériích po devíti kusech. Přesné rozměry jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tab 9.

6.1.3. Tváření povrchové vrstvy vzorků

Pro ovlivnění povrchové vrstvy materiálu zkušebního vzorku byla použita technologie válečkování. Tato technologie je založena na schopnosti materiálu plasticky se deformovat. Její podstata spočívá v tom, že na povrch vzorku působí prostřednictvím tvrdého tvářecího prvku tlak, který v místě styku povrchů způsobuje plastickou deformaci. Vlivem toho dochází v povrchové vrstvě k řadě specifických změn. Jednou z hlavních změn, ke které dochází, je zpevnění povrchové vrstvy a vznik tlakových zbytkových pnutí.

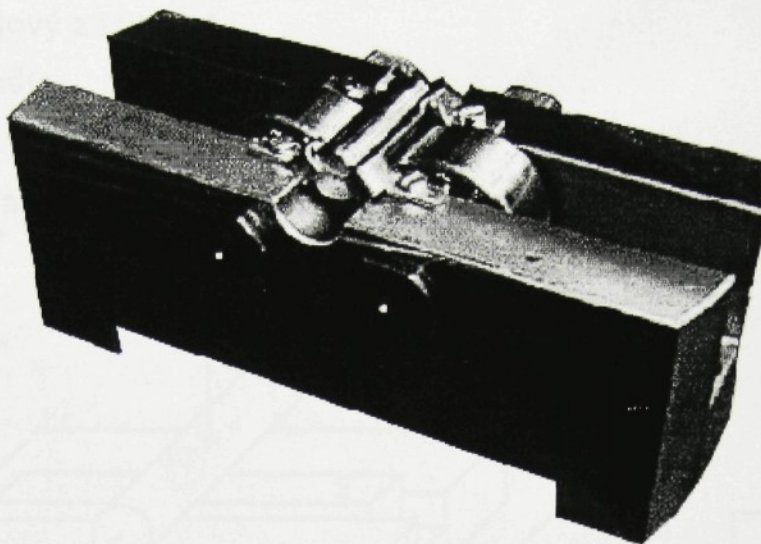
Ovlivnění povrchové vrstvy bylo provedeno na frézce FB 40-U. Ke stolu obráběcího stroje byl pomocí upínek připevněn dynamometr s upínacím přípravkem a do vřeteníku stroje byl upnut válečkovací nástroj. Relativní pohyb mezi nástrojem a tvářeným vzorkem zajišťuje podélný rychloposuv stolu obráběcího stroje. Vzájemný silový styk nástroje a tvářené plochy vzorku je vytvořen svislým posuvem pracovního stolu obráběcího stroje.

Druh stroje, typ	frézka univerzální, FB 40 - U
Výrobce, rok výroby, výrobní číslo	TOS Kuřim, 1969, 46 836
Celkový příkon	22 kW
Max. přípustné zatížení stolu	1200 kg
Elektromotor posuvů- otáčky, výkon	1420 ot/min, 3kW
Rychloposuv – podélný	3200 mm/min

Tab. 7. Vybrané parametry obráběcího stroje

6.1.3.1. Válečkovací nástroj

Pro potřeby této práce byl navržen a vyroben na KOM válečkovací nástroj.



Obr. 8. Nástroj pro statické válečkování

Jedná se o neodpružený válečkovací nástroj pro statické válečkování rovinných ploch s jedním tvářecím prvkem ve tvaru válečku. Váleček je přidržován pomocí plechové klece k tělesu nástroje a při válečkování se odvaluje po vnějším kroužku ložisek. Opěrná ložiska jsou uložena v tělese nástroje na čepech. Těleso nástroje je vyrobeno tak, aby umožňovalo upnutí do vřeteníku obráběcího stroje (frézka FB 40-U). Tvářecí prvek (váleček) byl použit z nástroje pro válečkování vnitřních rotačních ploch. Tvářecí prvek -váleček o rozměrech: poloměr $r=8$ mm, délka $L=45$ mm, tvrdost povrchu HV 840.

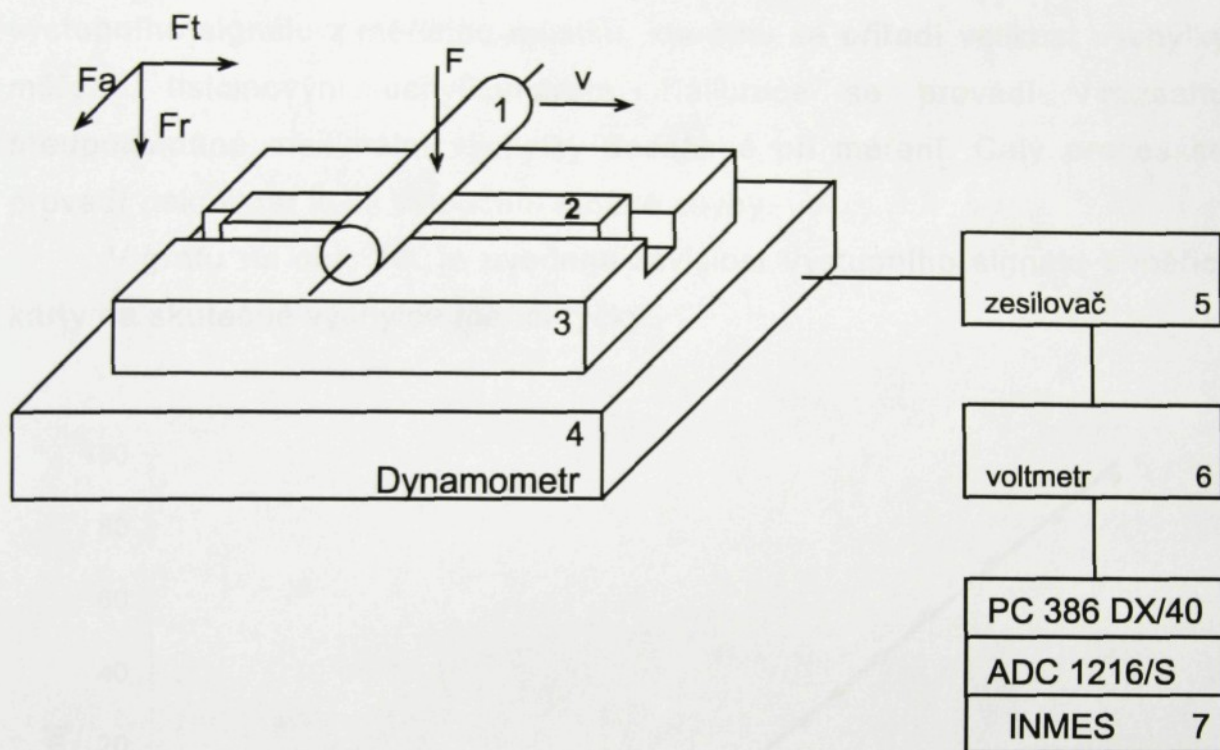
6.1.3.2. Měření tvářecích sil při válečkování

Pro výzkumné účely byl sledován vliv podmínek tváření na velikost tvářecích sil a na vznik zbytkových napětí po tváření, případně na další ukazatele integrity povrchu.

V průběhu válečkování byly měřicí aparaturou zaznamenávány tři na sebe kolmé složky tvářecí síly. Radiální složka F_r působící ve směru normály tvářené plochy, tangenciální složka F_t působící ve směru valivé rychlosti tvářecího prvku a složka axiální F_a .

Zařízení pro měření sil působících na vzorek při válečkování se skládá z částí:

- dynamometr s upínacím přípravkem
- nábojový zesilovač
- voltmetr
- PC s vloženou měřicí kartou
- programové vybavení INMES



1. Tvářecí prvek (váleček)
2. Tvářený vzorek
3. Upínací přípravek
4. Dynamometr KISTLER

5. Nábojový zesilovač KISTLER
6. Voltmetr
7. Počítač s vloženou měřicí kartou
a programovým vybavením

Obr. 9. Schéma měřicího zařízení

Na ověření vlivu technologie válečkování bylo provedeno měření tvrdosti a drsnosti povrchu. Získané výsledky jsou uvedeny a zhodnoceny v kap. 7.

Použité přístroje: měření tvrdosti - tvrdoměr Zwik

měření drsnosti - Hommel Tester T500

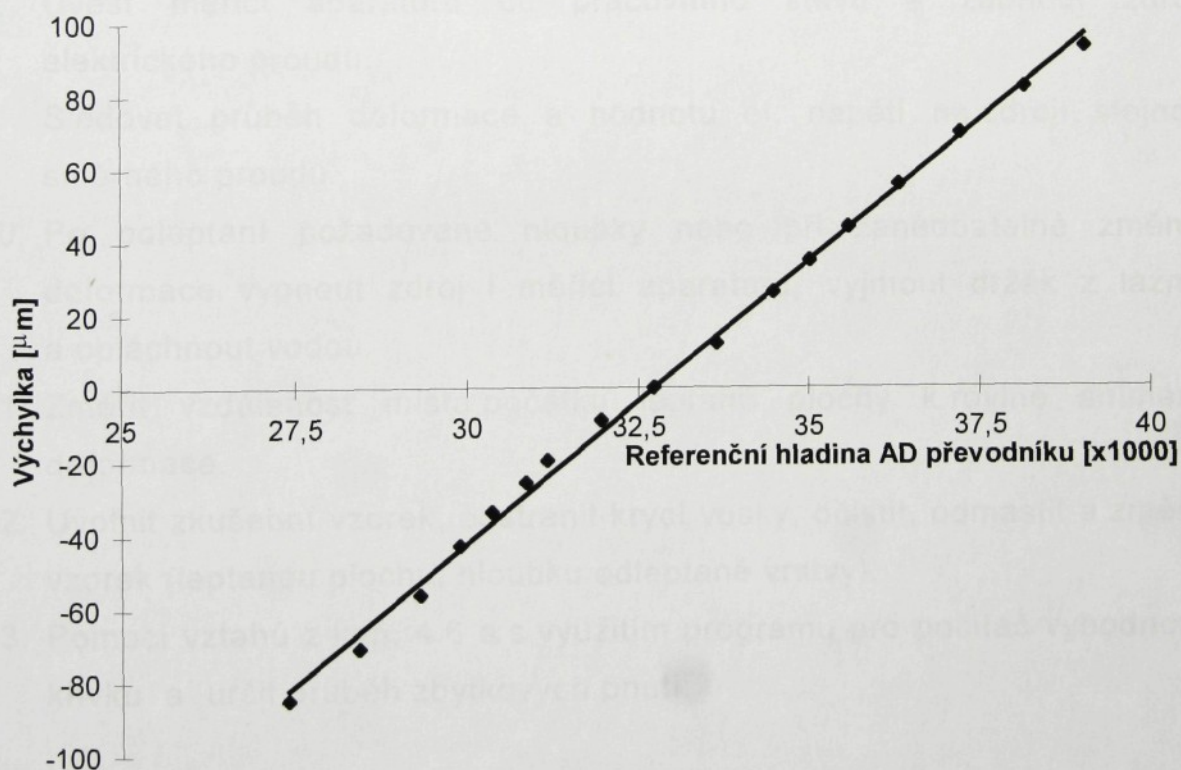
6.2. Měření zbytkových napětí [10]

Měření zbytkových pnutí bylo provedeno metodou elektrolytického odleptávání, která byla podrobně popsána v kap.4.

6.2.1. Příprava měření

Před započítím měření bylo nutno provést kalibraci měřicí aparatury. Kalibrace se provádí simulací výchylky indukčních snímačů vůči relativně pevné tyčce po krocích. Po každém kroku se zaznamenává velikost výstupního signálu z měřicího můstku, kterému se přiřadí velikost výchylky měřené tisícínovým úchylkoměrem. Kalibrace se provádí v rozsahu předpokládané maximální výchylky dosažené při měření. Celý proces se provádí několikrát kvůli vyloučení možné chyby.

V grafu na obr. 10. je uvedena závislost výstupního signálu z měřicí karty na skutečné výchylce měřicí tyčky.



Obr. 10. Cejchovní křivka

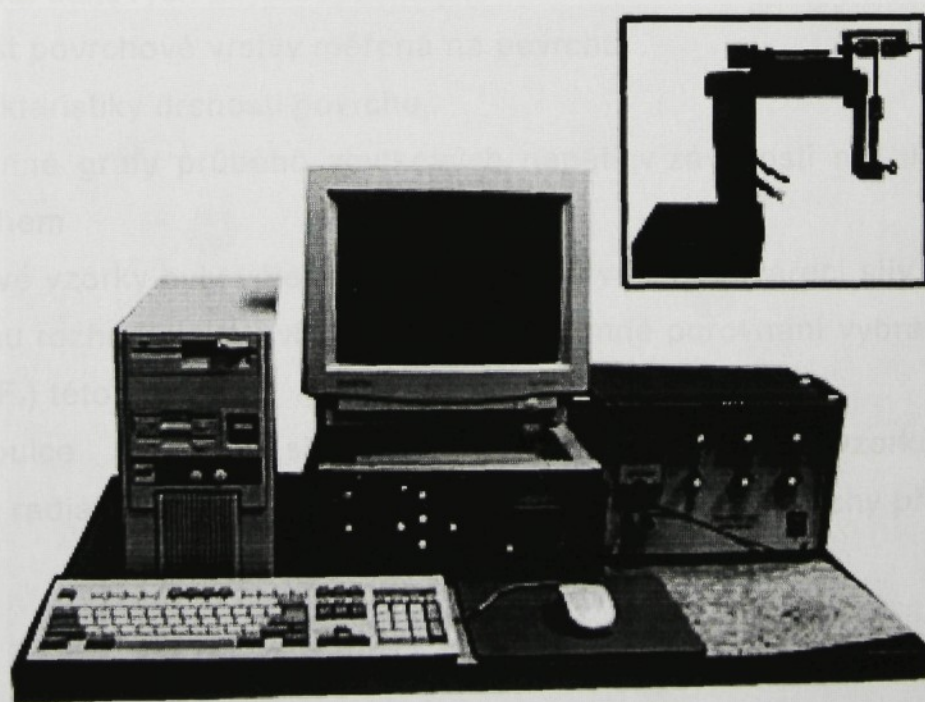
6.2.2. Postup měření

1. Zapnout měřicí aparaturu M1000 a vyčkat cca. 1 hodinu, než dojde k ustálení teploty el. obvodů měřicího můstku.
2. Vyvážit měřicí můstek bez měřicí tyčky.
3. Připravit a proměřit vzorek, (tzn. zbavit ho drobných mechanických nečistot a odmastit, změřit šířku a tloušťku vzorku).
4. Pečlivě očistit stykové plochy upínacího třmenu a vzorku v místě vetknutí, upnout vzorek a seřídít polohu snímačů.
5. Směsí roztavených vosků provést nátěr všech ploch, které budou ve styku s elektrolytem, vyříznout leptanou plošku, zbavit vosku i katodu a oba tyto póly znovu odmastit.
6. Vyčkat po dobu cca. 20 min, než dojde k ochlazení vzorku po ohřátí směsí roztavených vosků.
7. Vložit vzorek do lázně tak, aby byla ponořena celá odleptávaná plocha a zapnout zařízení na promíchávání elektrolytu.
8. Uvést měřicí aparaturu do pracovního stavu a zapnout zdroj elektrického proudu.
9. Sledovat průběh deformace a hodnotu el. napětí na zdroji stejnosměrného proudu.
10. Po odleptání požadované hloubky nebo při zanedbatelné změně deformace vypnout zdroj i měřicí aparaturu, vyjmout držák z lázně a opláchnout vodou.
11. Změřit vzdálenost místa počátku leptané plochy k rovině snímání deformace.
12. Uvolnit zkušební vzorek, odstranit krycí vosky, očistit, odmastit a změřit vzorek (leptanou plochu, hloubku odleptané vrstvy).
13. Pomocí vztahů z kap. 4.6 a s využitím programu pro počítač vyhodnotit křivku a určit průběh zbytkových pnutí.

Vlastní měření bylo provedeno za podmínek uvedených v tab. 8.

Počítač s vloženou měřicí kartou	
Frekvence vzorkování f [Hz]	250
Zdroj elektrického proudu	
Proud I [A]	1,2
Napětí U [V]	$5,5 \pm 0,5$
Měřicí aparatura M1000	
Citlivost [mV/V]	0,5
Filtrace [Hz]	40
Elektrolyt	
500 ml HCL+ 250 ml HF + 250 ml dest.H ₂ O	
Vzorek	
Délka leptané plochy l [mm]	22
Vzdálenost leptané plochy od roviny snímání deformace a [mm]	94
Šířka vzorku, odleptaná hloubka	viz tab.9.

Tab. 8. Podmínky měření zbytkových napětí



Obr. 11. Aparatura pro měření zbytkových napětí

6.2.3. Zpracování získaných dat

Programové vybavení měřicího počítače zaznamenává závislost velikosti el.napětí výstupního signálu z měřicího můstku na čase, kterou po ukončení měření uloží do souboru. Takto získaná data jsou použita pro výpočet zbytkových pnutí.

Ověření funkčnosti celého komplexu činností, spojených s technologickou přípravou, provedením tváření vzorků a následným automatizovaným měřením zbytkových napětí bylo realizováno v souvislosti s řešením souběžně zadané diplomové práce na KOM [10].

6.3. Vyhodnocení naměřených veličin

Měření zbytkových napětí bylo provedeno na devíti vzorcích, jejichž povrchová vrstva byla ovlivněna válečkováním a na jednom neválečkováném vzorku. Ostatní vyrobené vzorky byly použity na zprovoznění a odladění měřicí aparatury, ve které bylo oproti předchozím diplomovým pracem poprvé použito stejnosměrného zdroje se stabilizací el. proudu a sběru dat pomocí počítače s vloženou měřicí kartou. Pro posouzení vlivu válečkování na integritu povrchu byly vybrány následující charakteristiky:

1. zbytkové napětí v hloubce ΔH 0,015 mm pod povrchem
2. hloubka tlakových zbytkových napětí
3. tvrdost povrchové vrstvy měřená na povrchu
4. charakteristiky drsnosti povrchu
5. souhrnné grafy průběhů zbytkových napětí v závislosti na hloubce pod povrchem

Jednotlivé vzorky byly válečkovány při různé velikosti tvářecí síly. Vzhledem ke svému rozhodujícímu vlivu byla pro vzájemné porovnání vybrána radiální složka (F_r) této síly.

V tabulce 9. jsou shrnuty rozměry jednotlivých vzorků, střední hodnota radiální složky tvářecí síly a hloubka odleptané plochy při měření.

označení vzorku	F_r [kN]	h [mm]	h_0 [mm]	δ [mm]	b [mm]	ΔH [mm]
Vzorek 4	5,9	9,21	9,20	0,01	7,04	0,25
Vzorek 7	3,4	9,21	9,20	0,01	6,99	0,20
Vzorek 8	4,0	9,21	9,20	0,01	7,02	0,20
Vzorek 9	7,1	9,21	9,18	0,03	7,06	0,30
Vzorek 10	8,5	9,25	9,22	0,03	7,02	0,40
Vzorek 11	8,4	9,25	9,22	0,03	7,04	0,40
Vzorek 12	10,5	9,25	9,20	0,05	7,05	0,60
Vzorek 13	8,6	9,25	9,21	0,04	7,06	0,40
Vzorek 14	8,4	9,25	9,22	0,03	7,04	0,40
Vzorek 15	—	9,25	9,25	—	7,06	—

Tab. 9. Změřené parametry jednotlivých vzorků

1. Zbytková napětí v hloubce 0,015 mm

Na obr. 12. je znázorněna závislost maximálních zbytkových napětí (v hloubce 0,015 mm) na radiální složce tvářecí síly. Z uvedené závislosti je patrné, že technologie válečkování podle očekávání vnáší do povrchové vrstvy tlaková zbytková napětí. Velikost těchto napětí roste s tvářecí silou.

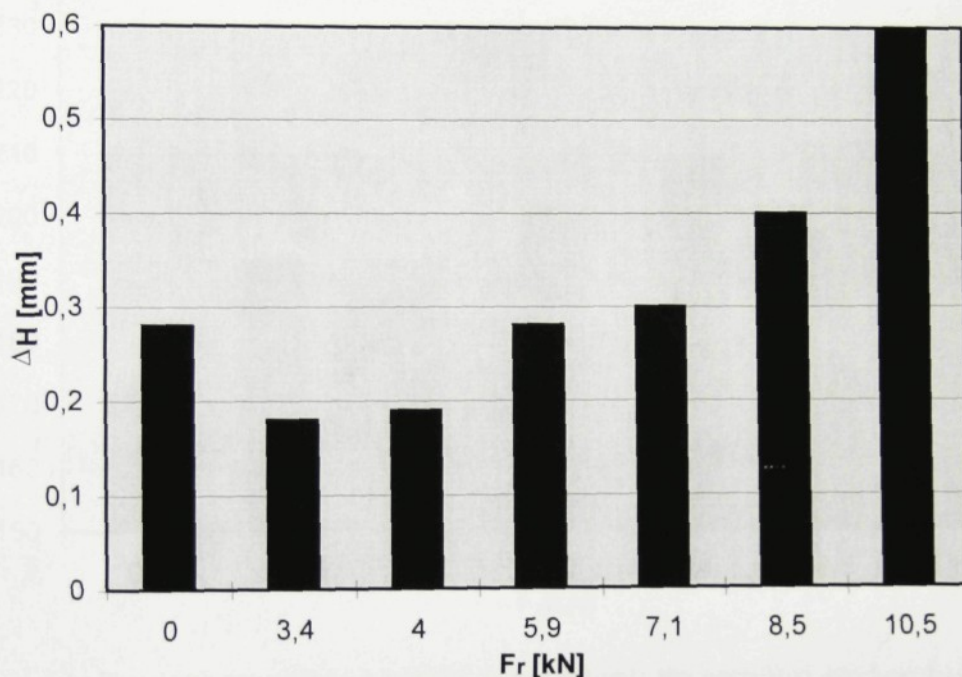
Při měření neválečkováného vzorku byla zjištěna na povrchu zbytková napětí tahová, která vznikla během historie obrábění. V grafu je netvářený vzorek označen jako vzorek tvářený nulovou silou. Tohoto označení je užito i dále.



Obr. 12. Zbytková napětí (max. hodnota v hloubce 0,015 mm pod povrchem) po válečkování v závislosti na velikosti radiální složky tvářecí síly

2. Hloubka tlakových zbytkových napětí

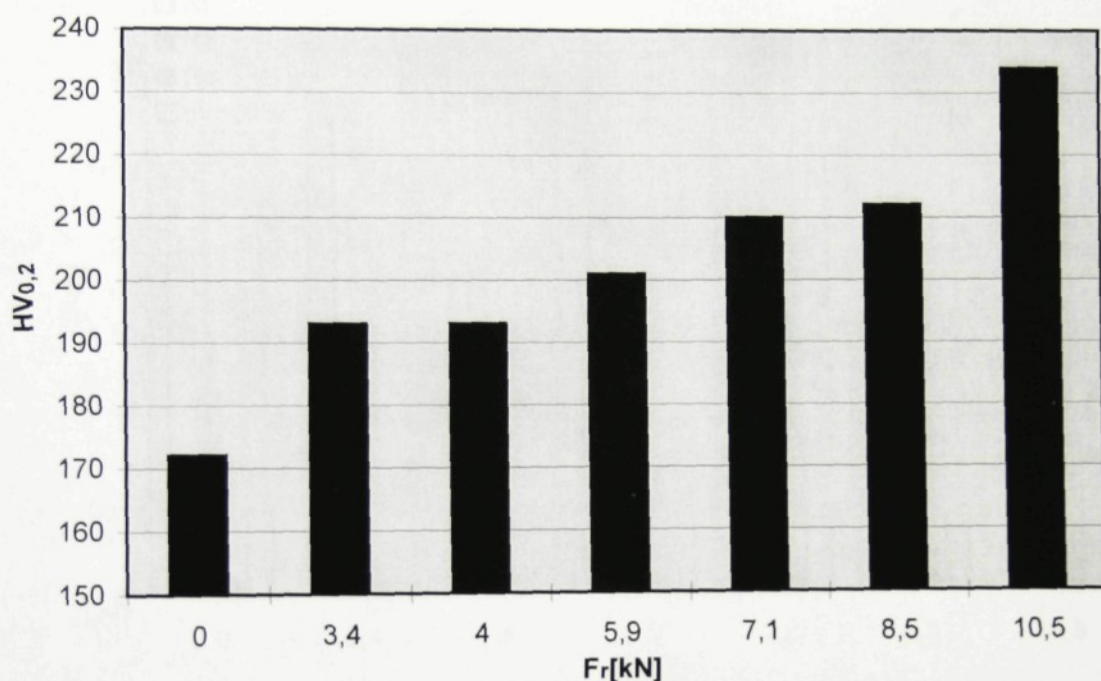
Podobně jako v předchozím případě roste i hloubka tlakových zbytkových napětí s velikostí tvářecí síly. Při experimentálním stanovení zbytkových napětí metodou elektrolytického odleptávání bylo ukončeno měření při zanedbatelné změně deformace. Za těchto podmínek byl zjištěn rozsah hloubky tlakových zbytkových napětí od 0,2mm do 0,6mm.



Obr. 13. Hloubka tlakových zbytkových napětí v závislosti na radiální složce tvářecí síly

3. Tvrdost povrchové vrstvy

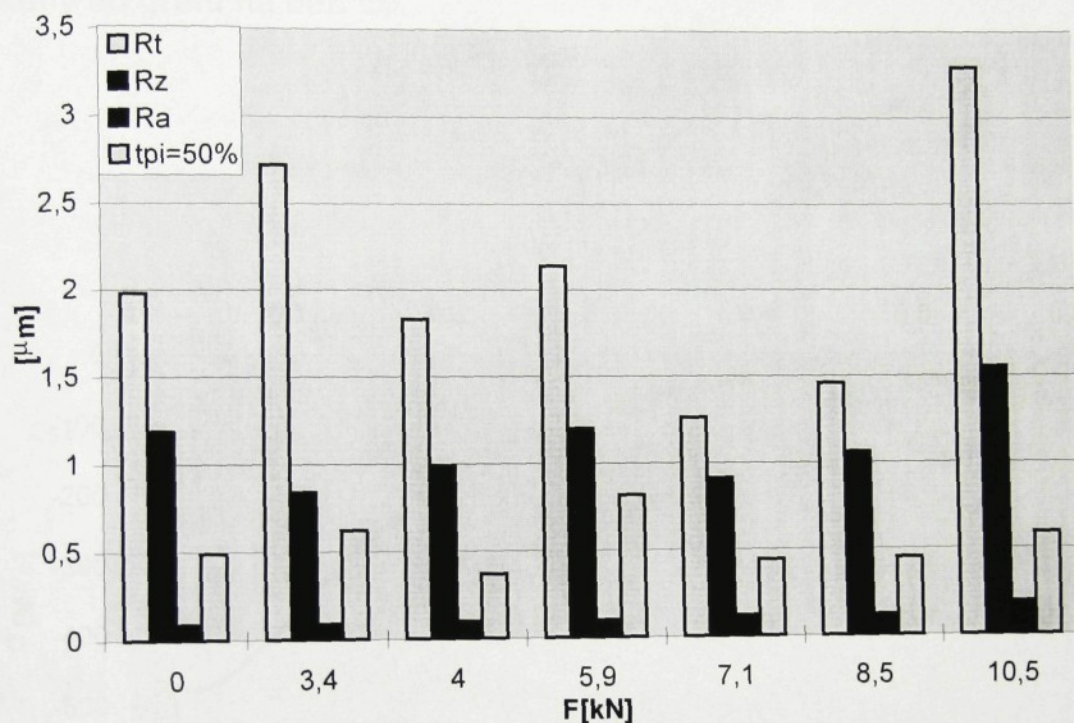
Měřením tvrdosti bylo zjištěno maximální zpevnění 30% v rozsahu velikosti tvářecí síly 0 až 10,5 kN. Na obr. 14. je závislost průměrné hodnoty tvrdosti podle Vickerse měřené na povrchu při zatížení 200g.



Obr. 14. Tvrdost povrchové vrstvy v závislosti na radiální složce tvářecí síly

4. Charakteristiky drsnosti povrchu

Při válečkování, jak je vidět z obr. 15., nedošlo k výrazným změnám charakteristik drsnosti. To lze vysvětlit zejména tím, že výchozí drsnost ploch určených k válečkování byla v rozsahu hodnot běžně dosahovaných při této technologii.



Rt- největší hloubka drsnosti

Rz-výška nerovnosti profilu

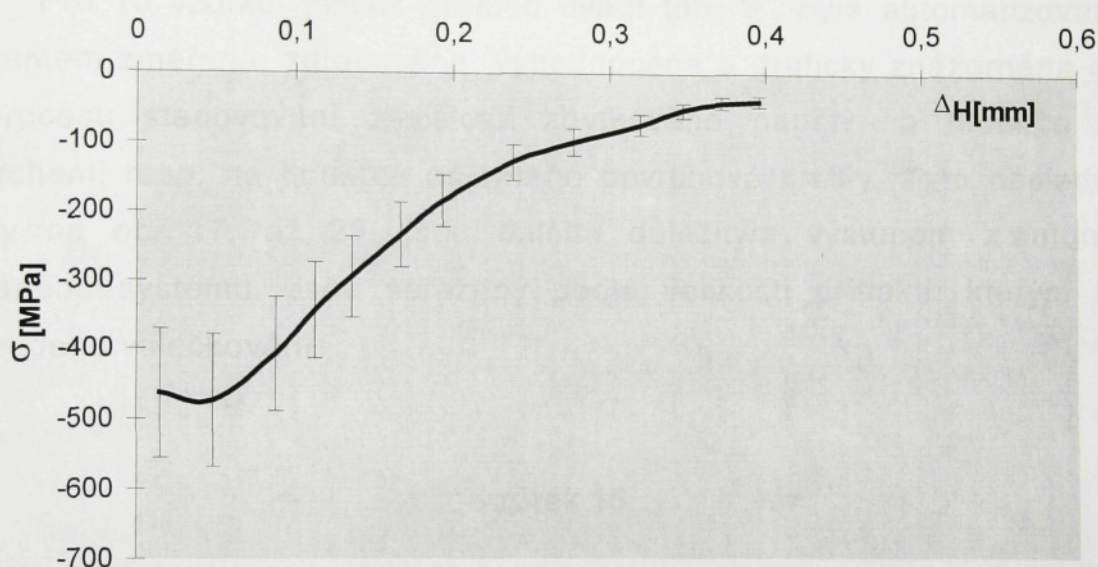
Ra- střední aritmetická úchylka profilu

tpi=50%- nosný podíl mikroprofilu

Obr. 15. Charakteristiky drsnosti povrchu (dle ISO 4287)

5. Souhrnné grafy

Grafické vyjádření závislosti $\sigma=f(\Delta H)$ bylo nejdříve jako vzor zpracováno z výsledků experimentálního měření zbytkových napětí ve vzorcích 10,11,13,14 tvářených téměř stejnou radiální silou $F_r = 8,4$ až $8,6$ kN a byla vypočtena střední hodnota a hranice rozpětí. Získané průběhy jsou vyneseny do grafu na obr. 16.



Obr. 16. Hranice rozpětí a vypočtená střední hodnota zbytkových napětí po válečkování v závislosti na hloubce (experiment)

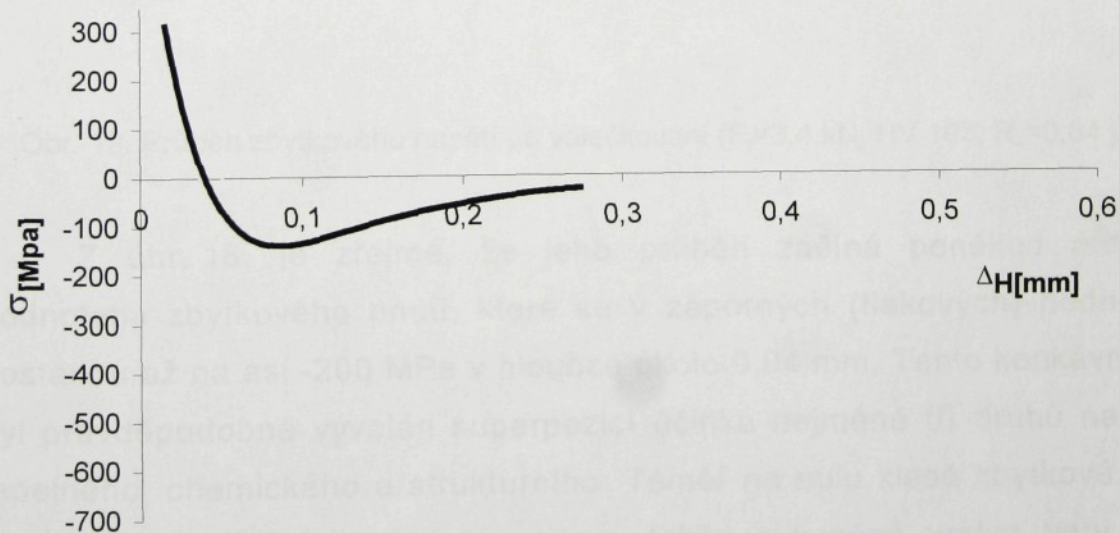
Při měření metodou elektrolytického odleptávání bylo velmi obtížné stanovit průběh zbytkových napětí v hloubkách menších než $0,01$ mm pod povrchem zkoumané plochy. Vlivem velkého proudového nárazu při zapnutí zdroje dochází k rušení zaznamenávaných dat, ze kterých se průběh zbytkových napětí stanovuje. To může určitým způsobem vysvětlovat i rozdíl měřených hodnot, ke kterému dochází nejvíce v těsné blízkosti povrchu součásti.

Další vliv na přesnost zjištěných výsledků lze vysvětlit obtížným vyrovnáním teplot vzorku, lázně a stabilitou procesu odleptávání. Určitý rozptyl velikosti zbytkových napětí je způsoben také obtížným zajištěním zcela shodných podmínek obrábění.

Průběhy zbytkových napětí v závislosti na hloubce pod povrchem, doplněné o údaje o tvrdosti podle Vickerse (HV) povrchové vrstvy po válečkování a výškou nerovnosti profilu Rz jako orientační charakteristikou pro drsnost povrchu se staly hlavním, závěrečným výsledkem aplikace vytvořeného automatizovaného systému pro vyhodnocování velikosti zbytkového napětí v povrchových vrstvách.

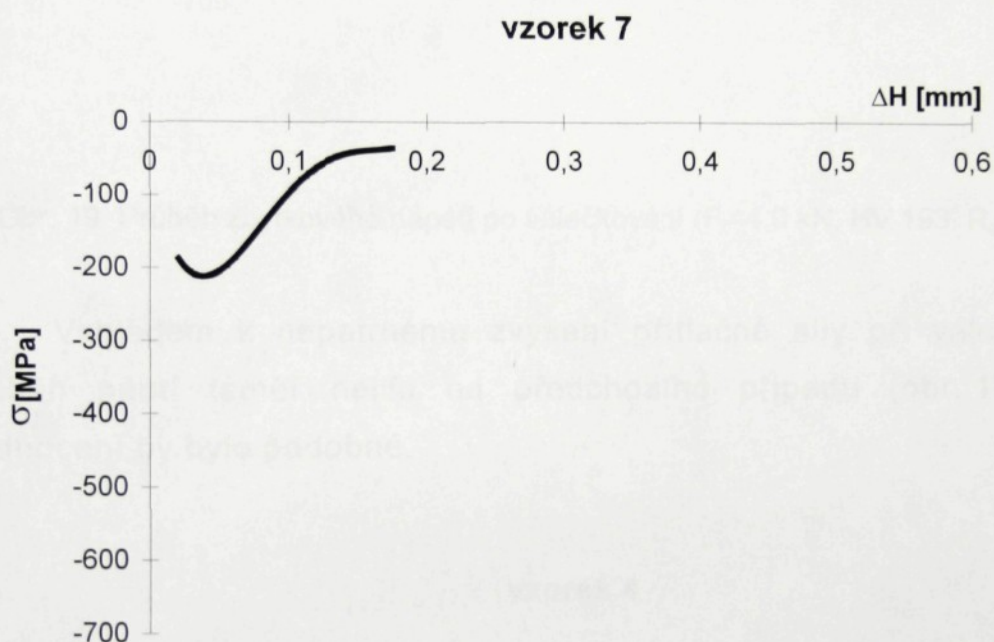
Pro 10 vzorků, jejichž přehled uvádí tab. 9., byla automatizovaným systémem změřena, zpracována, vyhodnocena a graficky znázorněna data z procesu stanovování závislosti zbytkového napětí na hloubce pod povrchem, resp. na tloušťce odleptané povrchové vrstvy. Tyto následující grafy na obr. 17. až 25. jsou dalším důležitým výstupem z automatizovaného systému. Jsou seřazeny podle velikosti přitlaku, kterým bylo provedeno válečkování.

vzorek 15

Obr. 17. Průběh zbytkového napětí po broušení, netvářeno (HV 172, $R_z=1,19 \mu\text{m}$)

Tento obrázek představuje skutečný typický průběh zbytkových pnutí po broušení. Někdy bývá ve velmi malé hloubce pod povrchem, případně až na povrchu, změněno náhle napětí tahové na tlakové, avšak ne vysoké. Zpravidla je vyvoláno superpozicí tepelných pnutí se strukturními. Mohou též spolupůsobit napětí vyvolaná opotřebovaným broušicím kotoučem.

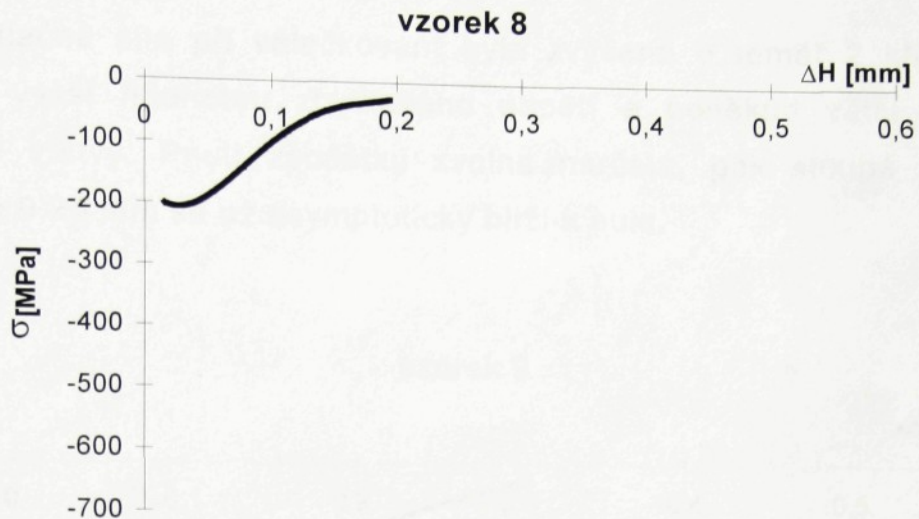
Lze říci, že hned tento první graf svou typickou formou potvrzuje, že navržený systém plní správně svou funkci a pracuje spolehlivě. Zcela odpovídá grafům, publikovaným Neckářem [2].



Obr. 18. Průběh zbytkového napětí po válečkování ($F_r=3,4$ kN, HV 193, $R_z=0,84$ μm)

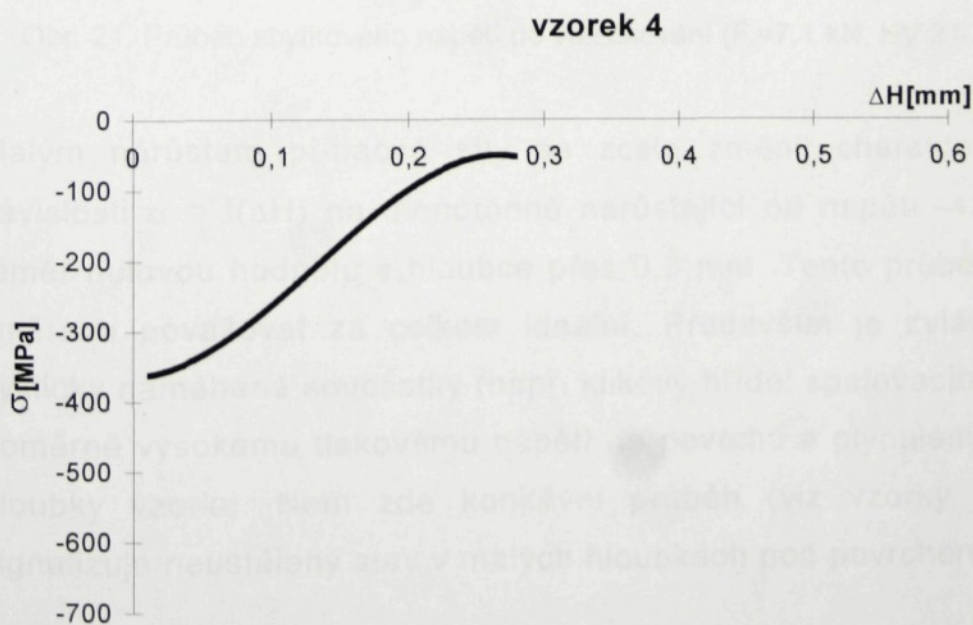
Z obr. 18. je zřejmé, že jeho průběh začíná poněkud menšími hodnotami zbytkového pnutí, které se v záporných (tlakových) hodnotách dostanou až na asi -200 MPa v hloubce okolo 0,04 mm. Tento konkávní tvar byl pravděpodobně vyvolán superpozicí účinku nejméně tří druhů napětí - tepelného, chemického a strukturního. Téměř na nulu klesá zbytkové pnutí už v hloubce 0,2 mm pod povrchem, takže ovlivněná vrstva není příliš tlustá.

Obr. 20. Průběh zbytkového napětí po válečkování ($F_r=3$ kN, HV 203, $R_z=1,23$ μm)



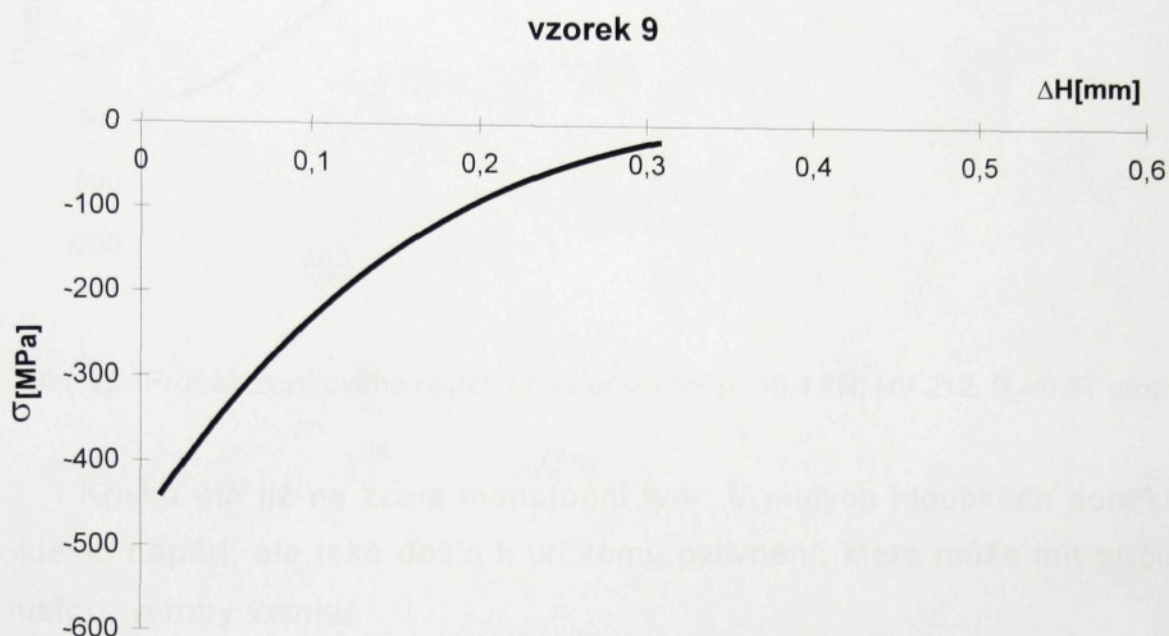
Obr. 19. Průběh zbytkového napětí po válečkování ($F_r=4,0$ kN, HV 193, $R_z=0,99$ μm)

Vzhledem k nepatrnému zvýšení přitlačné síly při válečkování se průběh pnutí téměř neliší od předchozího případu (obr. 18.) a jeho hodnocení by bylo podobné.



Obr. 20. Průběh zbytkového napětí po válečkování ($F_r=5,9$ kN, HV 201, $R_z=1,20$ μm)

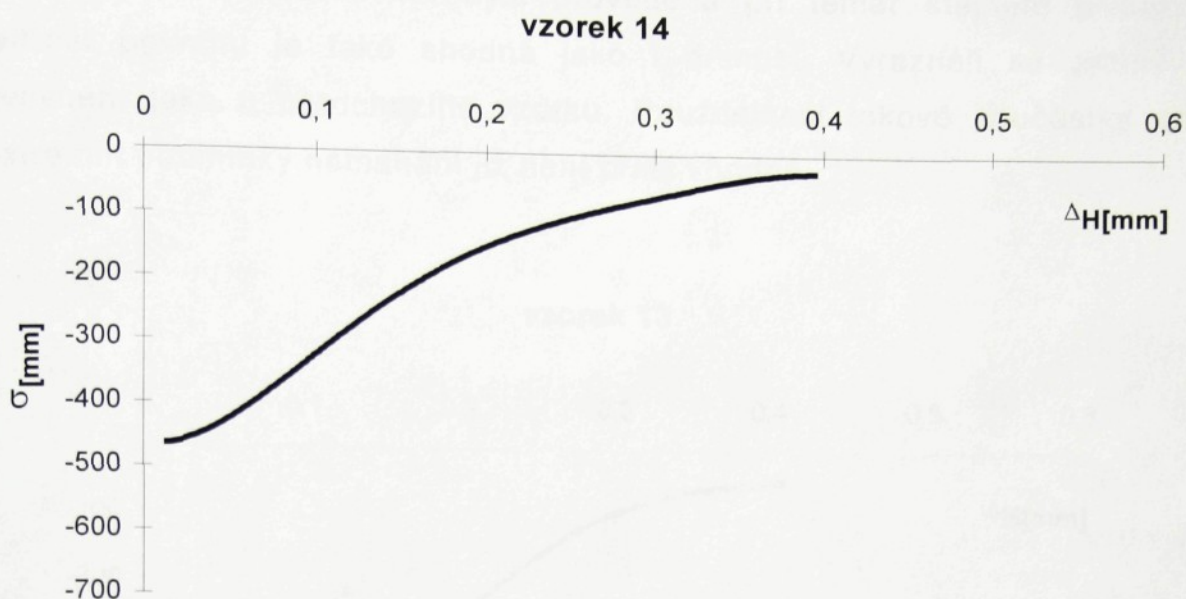
Přítlačná síla při válečkování byla zvýšena o téměř 2 kN, což se projevilo vyšší hodnotou zbytkového napětí a poněkud větší hloubkou zasažené vrstvy. Pnutí zpočátku zvolna narůstá, pak stoupá strměji a v hloubce 0,25 mm se už asymptoticky blíží k nule.



Obr. 21. Průběh zbytkového napětí po válečkování ($F_r=7,1$ kN, HV 210, $R_z=0,91$ μ m)

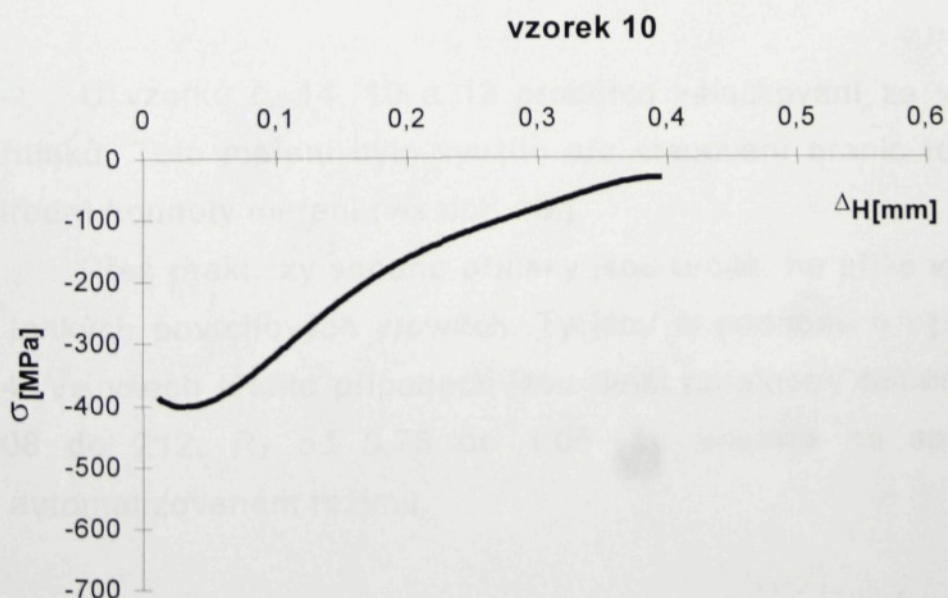
Malým nárůstem přítlačné síly se zcela změnil charakter tvaru křivky závislosti $\sigma = f(\Delta H)$ na monotónně narůstající od napětí -430 MPa až po téměř nulovou hodnotu v hloubce přes 0,3 mm. Tento průběh lze v mnoha směrech považovat za celkem ideální. Především je zvlášť vhodný pro cyklicky namáhané součástky (např. klikový hřídel spalovacího motoru) díky poměrně vysokému tlakovému napětí na povrchu a plynulému přechodu do hloubky vzorku. Není zde konkávní průběh (viz vzorky 7 a 8), který signalizuje neustálený stav v malých hloubkách pod povrchem.

Obr. 23. Průběh zbytkového napětí po válečkování ($F_r=8,9$ kN, HV 202, $R_z=1,07$ μ m)



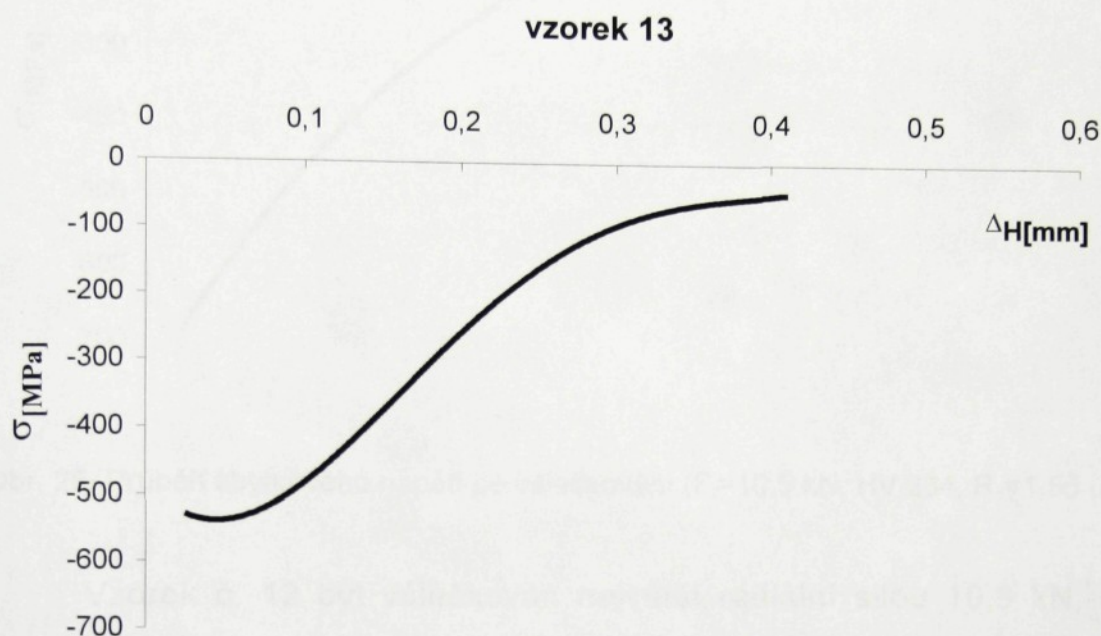
Obr. 22. Průběh zbytkového napětí po válečkování ($F_r=8,4$ kN, HV 212, $R_z=0,97$ μm)

Křivka má již ne zcela monotónní tvar. V malých hloubkách poněkud pokleslo napětí, ale také došlo k určitému ovlivnění, které může mít příčinu v historii výroby vzorku.



Obr. 23. Průběh zbytkového napětí po válečkování ($F_r=8,5$ kN, HV 208, $R_z=1,01$ μm)

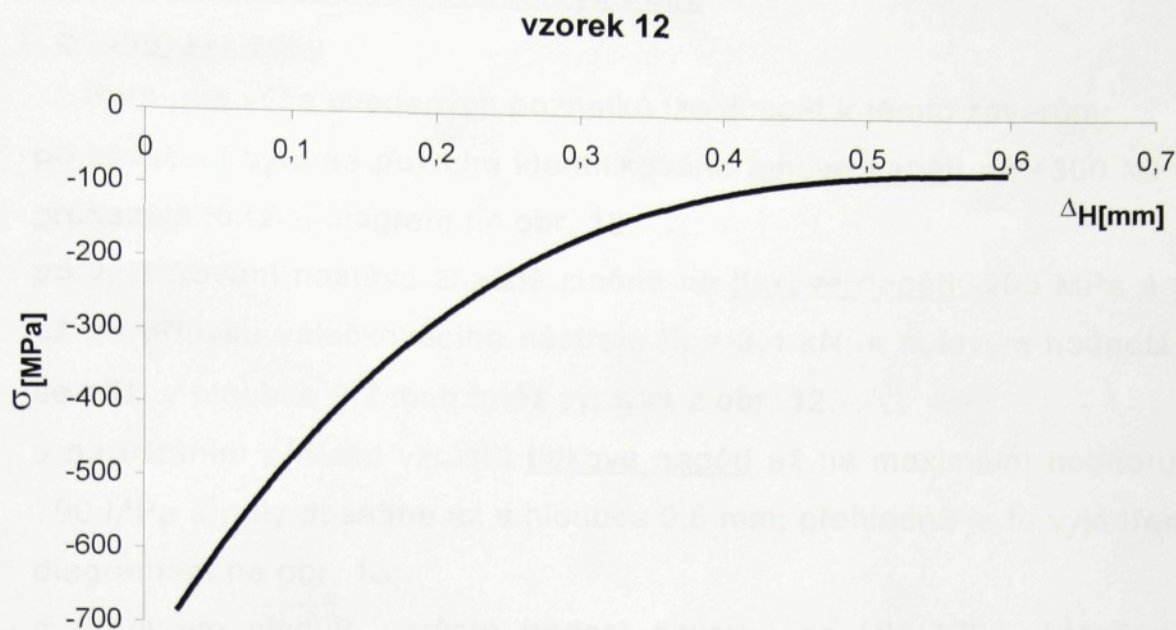
Operace válečkování byla provedena při téměř stejném přitlaku, tvrdost povrchu je také shodná jako i drsnost. Výrazněji se projevilo ovlivnění jako u předchozího vzorku. Použitelnost takové součástky pro extrémní podmínky namáhání již není příliš vhodná.



Obr. 24. Průběh zbytkového napětí po válečkování ($F_r=8,6$ kN, HV 211, $R_z=0,78$ μ m)

U vzorků č. 14, 10 a 13 proběhlo válečkování za velmi si blízkých přitlaků. Toto měření bylo využito pro stanovení hranic rozpětí a výpočet střední hodnoty měření (viz obr. 16.).

Přes prakticky shodné přitlaky jsou určité, ne příliš významné rozdíly v tenkých povrchových vrstvách. Ty jsou si podobné u vzorků č. 10, 13 a 14. Ve všech těchto případech jsou další parametry téměř shodné: HV od 208 do 212, R_2 od 0,78 do 1,06. To ukazuje na správnost výpočtu v automatizovaném režimu.



Obr. 25. Průběh zbytkového napětí po válečkování ($F_r=10,5$ kN, HV 234, $R_z=1,55$ μm)

Vzorek č. 12 byl válečkován největší radiální silou 10,5 kN, což se výrazně projevilo především vzrůstem tlakového napětí v povrchové vrstvě až na hodnotu -700 MPa. Toto napětí poměrně rychle klesá, takže v hloubce 0,3 mm už má velikost jen asi -150 MPa. Vzrostla též tvrdost povrchu na HV 234 a zhoršila se drsnost povrchu $R_z = 1,55$ μm .

Pro posouzení aplikovatelnosti takto válečkovaného povrchu už by neměly postačovat uvedené údaje. Je nutné je doplnit měřením mikrotvrdoti metodou šikmého řezu, provedením metalografického studia a mikroanalýzou.

7. Shrnutí a diskuse dosažených výsledků

7.1. Souhrn výsledků

Shrnutím výše uvedených poznatků lze dospět k těmto závěrům:

- po broušení bylo na povrchu identifikováno tahové napětí až +300 MPa; prokazuje to také diagram na obr. 12.
- po válečkování nastává značná změna na tlakové napětí -200 MPa a to už při přitlaku válečkovacího nástroje $F_r = 3,4$ kN; k nulovým hodnotám se blíží v hloubce 0,2 mm; totéž vyplývá z obr. 12.
- s narůstáním přitlaku vzrůstá tlakové napětí až na maximální hodnotu - 700 MPa a nuly dosáhne až v hloubce 0,6 mm; přehledně je to vyjádřeno diagramem na obr. 13.
- s přitlakem plynule vzrůstá tvrdost povrchu od HV 172 - broušeno, neválečkováno až po HV 234 při válečkování radiální silou 10,5 kN; viz též obr. 14.
- na charakteristikách drsnosti se vliv přitlaku téměř neprojevuje; nejméně je ovlivněna střední aritmetická úchylka R_a , která jen velmi nepatrně vzrůstá; u ostatních není nárůst jednoznačný, protože kolísá pro tyto měřené ukazatele drsnosti; názorně to dokazuje také obr. 15.

7.2. Zhodnocení a diskuse výsledků

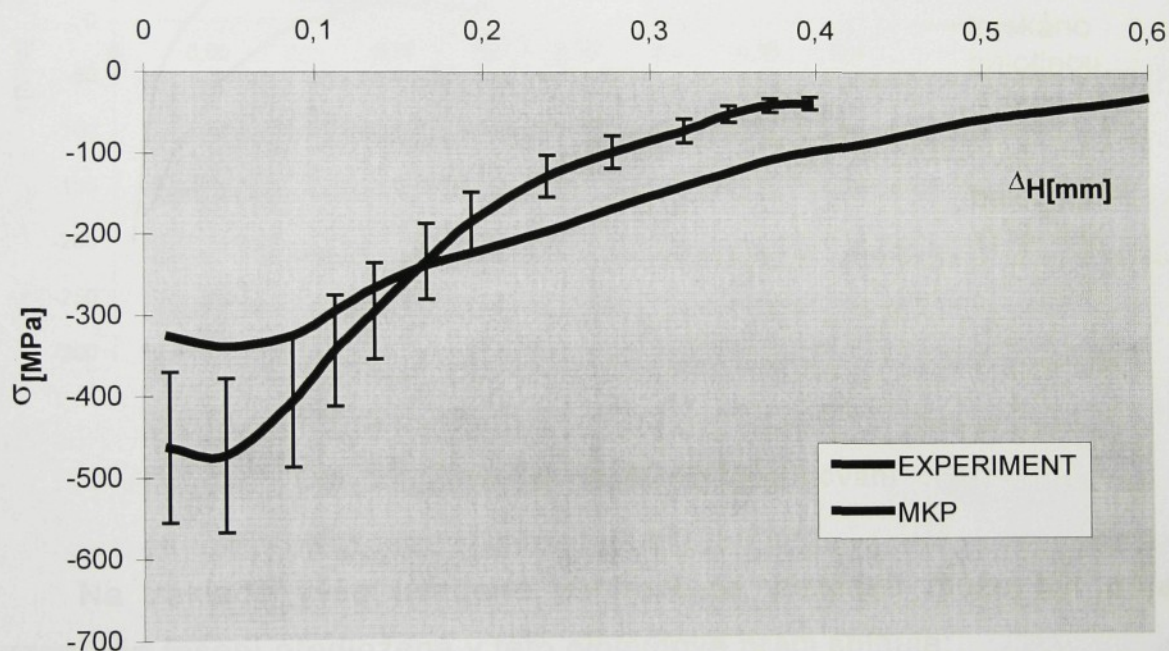
Tento důkladný rozbor a vyhodnocení výsledků se může zdát příliš jednostranně věnován technologickým aspektům, zadané úlohy a málo zaměřen na zhodnocení významu a přínosu řešení z hlediska rekonstrukce původního měřicího pracoviště a vlastní automatizace měření.

Důvodů pro tento přístup je několik:

- a) především přesvědčivé technologické výsledky potvrzují vhodné a na úrovni provedené řešení zadaného problému
- b) souběžně byla na KOM řešena diplomová práce (DP) [10], která zkoumala možnosti výpočtu zbytkových napětí po válečkování povrchu metodou konečných prvků; pro porovnání bylo nutno provést experimentální měření těchto napětí, což si vynutilo jak rekonstrukci měřicího zařízení, tak i modernizaci zpracování naměřených dat; pro

řešení jeho diplomové práce [10] byl automatizovaný systém měření a vyhodnocování zbytkových napětí nepostradatelný (citovaná diplomová práce byla úspěšně obhájena v únoru 1999);

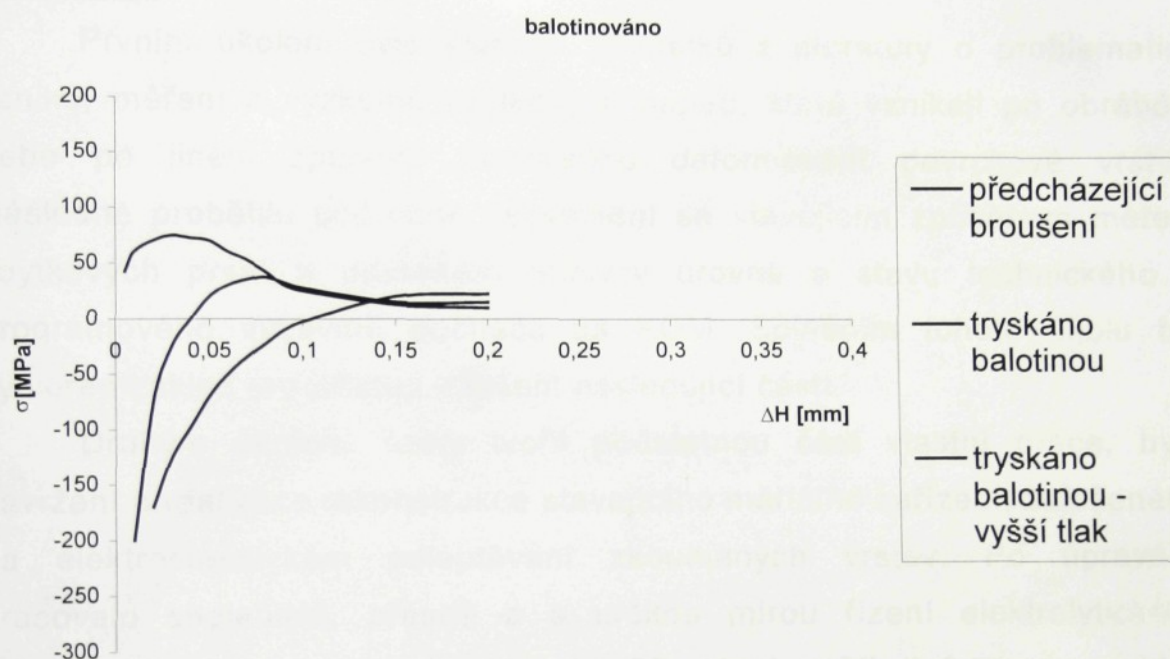
- c) v diplomové práci [10] provedl diplomant důkaz o srovnatelnosti metody konečných prvků pro vypočtené a naměřené závislosti $\sigma = f(\Delta H)$; naměřené údaje byly získány z automatizovaného systému měření a vyhodnocování zbytkových napětí; z grafu na obr. 26. je zřejmá poměrně dobrá shoda výpočtového a experimentálního průběhu studované závislosti; z toho vyplývá další potvrzení správnosti funkce automatizovaného systému měření a vyhodnocování zbytkových napětí;



Obr. 26. Porovnání závislostí zbytkových napětí na hloubce pod povrchem získaných jednotlivými metodami

- d) za další doklad o správnosti řešení lze považovat porovnání s prací jiných autorů; přes veškeré úsilí nebyla v dostupné literatuře nalezena adekvátní práce; určitou podobnost bylo možné objevit u Doc. NECKÁŘE a Doc. KAFKY [13], renomovaných autorů v oboru zbytkových napětí;

v grafu závislosti $\sigma = f(\Delta H)$ je zaneseno, jak se projeví tryskání balotinou na změně tahových napětí po broušení; jako u válečkování dochází při balotinování ke tváření za studena; z grafu vyplývá, že křivka (tryskáno balotinou – vyšší tlak) má velmi podobný průběh jako křivky uvedené na obr. 22. až 24.



Obr. 27. Zbytkové napětí po balotinování

Na základě výše uvedené konfrontace výsledků může být přijato tvrzení, že řešení předložené v této diplomové práci splňuje:

1. požadavky zadavatele úlohy, kterým byla Katedra obrábění a montáže
2. názory na automatizovaný systém pro vyhodnocování velikosti zbytkových napětí v povrchových vrstvách
3. tím splňuje cíl diplomové práce

8. Závěry a náměty

Z formulace problému a cíle diplomové práce vyplývá, že hlavním úkolem bylo modernizovat stávající měřicí systém zbytkových napětí po obrábění a převést jej do automatického režimu. Pro jeho splnění byla diplomová práce rozdělena do tří hlavních částí.

8.1. Závěry

Prvním úkolem bylo studium poznatků z literatury o problematice vzniku, měření a výzkumu zbytkových napětí, která vznikají po obrábění nebo po jiném způsobu plastického deformování povrchové vrstvy. Následně proběhlo podrobné seznámení se stávajícím způsobem měření zbytkových pnutí a provedení analýzy úrovně a stavu technického a programového vybavení počítačů na KOM. Splněním tohoto úkolu byl vytvořen základ pro přístup k řešení následující části.

Druhým úkolem, který tvořil podstatnou část vlastní práce, bylo navržení a realizace rekonstrukce stávajícího měřicího zařízení, založeného na elektrochemickém odleptávání zkoumaných vrstev. Po úpravách pracovalo spolehlivě, přesně a s určitou mírou řízení elektrolytického procesu. Signály z indukčních snímačů, které měří deformace vzorku, zůstaly zachovány spolu s tenzometrickým můstkem. Výstup z něj byl nově zpracován počítačem s měřicí kartou a data uložena. Z nich byl sestaven graf závislosti zbytkového napětí na hloubce pod povrchem.

Třetí část byla věnována provedení experimentů s použitím nově uspořádaného a realizovaného měřicího systému. Získané výsledky a jejich porovnání s výsledky jiných autorů osvědčily správnost provedené modernizace na automatický měřicí systém. Tím se laboratoř zbytkových napětí na KOM zařadila na úroveň podobných pracovišť u nás.

8.2. Náměty

Další pokračování ve výzkumu zbytkových napětí leptací technikou s mechanickým principem snímání deformací by mohla být orientována na:

- výpočtové modely pro jiné tvary vzorků, např. kroužků, hřídelů, ...

Seznam použité literatury

- [1] LIMAN, O.: Elektronika bez balastu. 1. vydání. Praha, SNTL 1996. 250 s.
- [2] NECKÁŘ, F. - KVASNIČKA, I.: Vybrané statě z úběru materiálu. [Skriptum]. 1. vydání. Praha, ES ČVUT 1991. 82 s.
- [3] BUDA, J. - BÉKÉS, J.: Teoretické základy obrábění kovov. 1. vydání. Bratislava, SVTL 1967. 700 s.
- [4] KOMENDA, D.: Metodika měření zbytkových pnutí. [Písemná část odborné zkoušky]. Liberec 1989. 42 s. VŠST, FS, KOM.
- [5] KUCKUK, A.: Broušení slitin titanu a sledování vybraných veličin. [Diplomová práce]. Liberec 1987. 66 s. VŠST, FS, KOM.
- [6] MALÝ J.: Možnosti využití akustické emise při sledování zbytkových pnutí. [Diplomová práce]. Liberec 1994. 53 s. VŠST, FS, KOM.
- [7] ADICOM, Praha: Přídavná deska pro počítače řady XT/AT/386/486 ADC 1216S, ADC 1216D. Příručka uživatele. [1994]
- [8] VAJSKEBR, J. - ŠPETA, Z.: Dokončování a zpevňování povrchu strojních součástí válečkováním. . vydání. Praha, SNTL 1984.
- [9] BAŠUS, V. - aj.: Příručka měřicí techniky. Pro strojírenství a energetiku. 1. vydání. Praha, SNTL 1965. 965 s.
- [10] VOVČIČKA, T.: Studium zbytkových napětí po obrábění s využitím metody konečných prvků. [Diplomová práce]. Liberec 1998. 83 s. TU Liberec, FS, KOM.
- [11] KAFKA, J.: Technologie obrábění exponovaných součástí. [Habilitační práce]. Praha 1990. ČVUT, FS, KNO.
- [12] BUMBÁLEK, B. - aj.: Drsnost povrchu. 1. vydání. Praha, SNTL 1989. 340 s.
- [13] NECKÁŘ, F. - KAFKA, J.: Volba a význam dokončovacích operací pro dynamicky namáhané části. In: Vědecká konference Katedry strojírenské technologie. Praha, ČVUT 1975. 6 s.
- [14] OLEHLA, M. - OLEHLA, J.: Programování. [Skriptum]. 1. vydání. Liberec, ES VŠST 1985. 184 s.

- [15] FOŘT, I.: Windows 3. Techniky programování. 1. vydání. Praha, GRADA 1992.
- [16] SOBOTA, B.: Počítačová grafika a jazyk C. 1. vydání. České Budějovice, KOPP 1996. 272 s.
- [17] ŽÁRA, J. - aj.: Počítačová grafika - principy a algoritmy. 1. vydání. Praha, GRADA 1992. 472 s.

P r o h l á š e n í
k využívání výsledků diplomové práce

Jsem si vědom(a) toho, že diplomová práce je majetkem školy a že s ní nemohu sám (sama) bez svolení školy disponovat, že diplomová práce může být zapůjčena či objednána (kopie) za účelem využití jejího obsahu.

Beru na vědomí, že po 5ti letech si mohu diplomovou práci vyžádat v Univerzitní knihovně TU v Liberci, kde je uložena.

Jméno a příjmení (rodné): Marek GAZDA

Adresa: Sosnova' 469/8, LIBEREC I, 460 01

Podpis: Marek Gazda