

Vysoká škola strojní a textilní, Liberec
nositelka „Řádu práce“

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

obor 23 - 07 - 8 - strojírenská technologie
zaměření o b r á b ě n í a m o n t á ž

Vliv technologických podmínek při obrábění
vybraných materiálů na hodnoty zbytkových
pnutí

KOM - OM - 446

H y n e k P a v l ů

Vedoucí práce: Ing. J. Janoušek
VŠST Liberec

Konzultant: Ing. J. Kafka
ČVUT Praha

Počet stran: 116
Počet příloh: 55
Počet tabulek: 23
Počet obrázků: 11
Počet výkrasů: -
Počet modelů nebo
jiných příloh: -

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMELECKÉHO DÍLA, UMELECKÉHO VÝKONU)

pro **Kynek Pavla**

obor **23-07-8 strojírenská technologie**

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorózních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: **Vliv technologických podmínek při obrábění vybraných materiálů na hodnoty slytkových pnutí**

Zásady pro vypracování:

1. Zlepšení parametrů stávajícího zařízení pro měření slytkových pnutí
2. Volba elektrolytu a proudových hustot pro měření niklových, titanových a hliníkových slitin
3. Měření slytkových pnutí
4. Vyhodnocení výsledků

V 268 / 87 S

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LÁZEŇEC 1, STUD. MĚSTO
PSČ 461 17

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**

Rozsah průvodní zprávy: **30 stran**

Seznam odborné literatury:

Komenda, D.: Vybudování laboratoře pro měření zbytkových pnutí metodou elektrolytického rozpouštění. /DP/,
VŠST Liberec, SP, KCH 1985

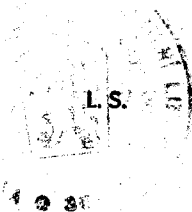
Nešpář, F. - Kafka, J.: Výzkumné zprávy o měření zbytkových pnutí na kováře Mánka o obrábění, SP ČVUT Praha

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jaroslav Janoušek**

Konzultant: **Ing. J. Kafka, ČVUT Praha**

Datum zadání diplomové práce: **16. 10. 1986**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. 5. 1987**



Garda
Doc. Ing. Jaromír Garda, CSc.
Vedoucí katedry

Alaxin
Doc. Ing. Ján Alaxin, CSc.
Děkan

v Liberci dne 30. 9. 1986

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury

V Liberci, dne 11. 5. 1987

Pavlu Hýšek

Na závěr čtyřletého studia na VŠST
Liberec - fakulta strojní - předkládám
svou diplomovou práci.

Děkuji všem vyučujícím, kteří přispěli svými vědomostmi a zkušenostmi k rozšíření mých technických znalostí.

S odevzdáním diplomové práce chci též poděkovat vedoucímu diplomové práce s. ing. J. Janouškovi, konzultantovi s. ing. J. Kafkovi a ostatním pracovníkům VŠST v Liberci a ČVUT v Praze za cenné rady, poskytnuté při zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat s. doc. J. Gazdovi za to, že mi umožnil měření v laboratoři obrábění na VŠST Liberec.

V Liberci dne 11. května 1987

Pavlu Hynek

Hynek Pavlu

1. Obsah

1. Obsah	4
2. Seznam příloh	6
3. Úvod	7
Seznam použitých symbolů a označení	11
4. Metoda měření zbytkových pnutí	14
5. Příprava vzorků	15
5.1. Modelové vzorky	15
5.2. Vzorky k měření konkrétních součástí	15
6. Měřicí zařízení pro měření zbytkových pnutí	16
6.1. Pracoviště pro měření zbytkových pnutí	16
6.2. Zlepšení parametrů stávajícího měřicího zaří- zení	23
6.2.1. Mechanická část	23
6.2.2. Přístrojová část	23
6.3. Cejchování měřicí aparatury	24
6.4. Pracovní postup při měření zbytkových pnutí ...	26
6.4.1. Popis obsluhy měřicího zařízení	26
6.4.2. Stručný postup měření zbytkových pnutí	28
7. Volba elektrolytu a proudových hustot pro měření niklových, titanových a hliníkových slitin	30
7.1. Vliv různých faktorů na proces odleptávání	30
7.1.1. Vliv koncentrace roztoků	30
7.1.2. Vliv teploty elektrolytu	31
7.1.3. Vliv promíchávání elektrolytu	31
7.2. Použití HCl v elektrolytech	32
7.3. Volba elektrolytu a proudových hustot pro mě- ření vybraných kovů a jejich slitin	33
7.3.1. Volba elektrolytu a proudových hustot pro hliník a slitiny hliníku	33

7.3.2. Volba elektrolytu a proudových hustot pro nikl a slitiny niklu	35
7.3.3. Volba elektrolytu a proudových hustot pro titan a slitiny titanu	36
7.3.4. Volba elektrolytu a proudových hustot pro ocel	38
7.4. Dodatky ke kapitole 7.	39
8. Výpočet vzorků	40
8.1. Výpočet zbytkových pnutí u rovinných vzorků ...	40
8.2. Výpočet zbytkových pnutí u kruhových vzorků ...	44
9. Měření zbytkového pnutí	49
9.1. Technologické podmínky obrábění vybraných ma- teriálů	49
9.2. Vyhodnocení výsledků	53
10. Závěr	60
11. Seznam použité literatury	61

2. Seznam příloh

Tabulky hodnot odečtených z grafů, odměřených
v procesu leptání a vypočtených výsledných
hodnot zbytkových pnutí pro vybrané materiály
a technologické podmínky obrábění 1 - 22

Grafy zbytkových pnutí pro vybrané materiály
a technologické podmínky obrábění 23 - 55

3. Úvod

Současný rozvoj techniky ve všech oblastech národního hospodářství klade stále vyšší požadavky na výrobu strojů a zařízení, na jejich maximální spolehlivost, kvalitu a efektivnost. K dosažení vyšší spolehlivosti s parametry srovnatelnými s obdobnými výrobky špičkové úrovně ve světě je nutno hledat a zavádět nové technologické postupy, kvalitativně nové progresivní metody, získávat další poznatky o materiálech a dosáhnout co nejlepšího využití materiálů, technologií a konstrukčních řešení výrobků. Perspektivní dosažení těchto plánovaných záměrů a urychlení vědecko-technického rozvoje do roku 2000 předpokládá úspěšně a beze zbytku splnit úkoly 8. pětiletky, přičemž rozhodující úkol je kladen na rozvoj ve strojírensko-metalurgickém komplexu.

Statisticky je prokázáno, že většina poruch strojních částí za provozu je způsobena únavou materiálu, vyvolanou jeho cyklickým namáháním. Mezní stav v těchto případech je závislý na úzce lokálních vlastnostech materiálu v nejnámáhanějším místě. U většiny součástí je nejvíce namáhaným místem povrchová vrstva. Kvalita povrchové vrstvy součástí tak zaujímá jedno z rozhodujících kritérií výsledných vlastností součástí /pevnost, trvanlivost, atd./.

Výsledky únavových zkoušek a zkušenosti z provozu ukazují na významný vliv kvality povrchové vrstvy, která závisí zcela na technologii výroby součástí.

Mezní stav součásti daný její únavovou pevností závisí nejen na druhu, složení a vnitřní stavbě materiálu, z něhož byla součást vyrobena, ale i na kvalitě povrchové vrstvy. Citlivost únavové pevnosti na vlastnosti povrcho-

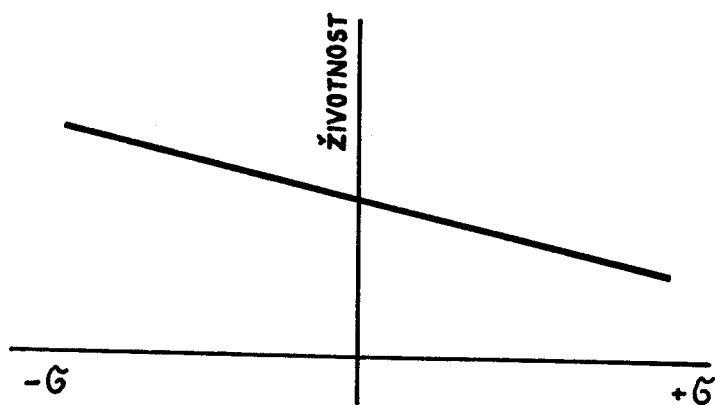
vé vrstvy je dána kromě jiného tím, že v obvyklých případech namáhání /ohyb, krut/ je na povrchu maximální napětí od vnějších sil, při čemž možnost deformace zrn a pravděpodobnost výskytu vakantních míst je zde největší. Kromě toho působí rysky po obrábění na povrchu jako vruby a při mechanickém opracování zde dochází zpravidla i ke změně struktury.

Změna teploty pod povrchem obrobeneé plochy způsobí vznik různých strukturních složek v různých hloubkách, a při jejich různém objemu vznik pnutí různého smyslu, které mohou pnutí způsobené tepelnou dilatací a plastickou deformací zmenšovat, zvyšovat, popřípadě vyrovnávat.

Každá výrobní operace /tváření, obrábění, tepelné zpracování/ vyvolává, v závislosti na použité kombinaci podmínek výrobní operace, určitý průběh zbytkových napětí, a to do takové hloubky pod povrchem, kam zasahují plastické deformace sledované operace /vlivem tepelného a silového působení na materiál součásti/. Nepříznivě ovlivněná vrstva materiálu se následující operací odstraní jen v případě odebrání dostatečně velkého přídatku na obrábění, nebo u dokonalého vyžihání. Běžnými způsoby je však možno velikost zbytkových napětí pouze zmírnit. Následující operace je totiž schopna způsobit úplnou přestavbu zbytkových napětí do hloubky pod povrchem, kam zasahují plastické deformace, které vyvolává. Ve větších hloubkách dochází k superpozici původních napětí s napětími vyvolanými pružnými deformacemi této operace a v ještě větších hloubkách pod povrchem zůstává původní napětí prakticky beze změny.

Druh a velikost zbytkových pnutí v povrchové vrstvě obrobku má vliv na jeho provozní vlastnosti. Všeobecně je

přijímán názor, že zbytková pnutí v tahu jsou považována za nežádoucí, protože jsou-li na ně superponována vlivem působícího namáhání napětí v tahu, představují snížení teoretické pevnosti součásti. Experimentálně bylo dokázáno, že tahová zbytková napětí snižují podstatně životnost součástí. Tlaková zbytková napětí naopak životnost součástí zvyšují. To platí ovšem pouze u charakteristicky zatížených součástí /ohyb, krut/. Obecně závisí požadované napětí na způsobu zatížení.



Obr. 1.: Závislost životnosti součástí na hodnotách zbytkových pnutí v povrchové vrstvě. /4/

Mechanismus vzniku zbytkových napětí je velmi složitý a je značně závislý na vlastnostech obráběného materiálu /tepelná vodivost, teplotní roztažnost, poměr $R_{m_{kt}}:R_{p_{0,2}}$, stabilita struktury apod./.

Druh a velikost zbytkových pnutí v povrchových vrstvách obrobenej plochy bude funkcí obráběného materiálu, způsobu obrábění a řezných podmínek. Z toho důvodu je

nutno provádět měření pro každý materiál obrobku zvlášť.

Studium vlivu pracovních podmínek na druh a velikost zbytkových pnutí v povrchových vrstvách obrobku je proto jedním z podkladů pro optimalizaci obráběcích procesů z hlediska kvality obrobku, zejména u součástí pracujících za obtížných podmínek.

Stanovení optimálních podmínek obrábění bylo také součástí a cílem této práce. Na základě měření na vzorcích z různých materiálů obráběných různými způsoby obrábění a různými řeznými podmínkami byly pro tyto materiály stanoveny optimální podmínky obrábění, z hlediska zbytkových pnutí v povrchové vrstvě součástí, pro provozně namáhané součásti.

Seznam použitých symbolů a označení

a	-	hloubka řezu	/mm/
a	-	vzdálenost konce leptané plochy od roviny snímání deformace	/mm/
a	-	konstanta	/-/
b	-	šířka průřezu nosníku	/mm/
b	-	konstanta	/-/
\bar{b}	-	střední šířka nosníku	/mm/
d	-	specifická hmotnost	/kg/l/
E	-	modul pružnosti	/N/mm ² /
F	-	síla	/N/
H	-	odleptaná hloubka materiálu	/μm/
ΔH	-	tloušťka odebrané vrstvičky	/μm/
ΔH_n	-	tloušťka n-té odebrané vrstvy	/μm/
h_0	-	počáteční tloušťka vzorku	/mm/
h	-	hloubka od povrchu vzorku	/μm/
h_n	-	tloušťka vzorku po odstranění vrstvy n	/mm/
h_N	-	tloušťka náhradního prizmatického nosníku	/mm/
h	-	hloubka řezu	/mm/
I	-	proud	/A/
I	-	modul setrvačnosti průřezu	/mm ⁴ /
K, K	-	konstanty zahrnující geometrický tvar	/-/
l	-	délka leptané plochy	/mm/
L	-	délka zápisu	/mm/
ΔL_n	-	délka zápisu příslušející vrstvě ΔH_n	/mm/
mZ	-	měřítko	/mm/
mT	-	měřítko	/mm/
M_R	-	měřítko použitého rozsahu	/μm/mm/
M	-	ohybový moment	/Nm/
Ra	-	drsnost	/μm/
ΔS	-	deformace vzniklá rozříznutím vzorku	/μm/

S_1	- vzdálenost dvou kontrolních bodů před rozříznutím vzorku	/μm/
S_2	- vzdálenost dvou kontrolních bodů po rozříznutí vzorku	/μm/
S	- plocha leptané vrstvy	/mm ² /
s	- posuv	/mm/min/
s_z	- posuv na zub	/mm/zub/
T	- čas	/min/
U	- napětí	/V/
V	- napětí	/V/
v_k	- obvodová rychlost brous. kotouče	/m/s/
v_{ft}	- posuvová rychlost	/m/min/
v	- řezná rychlost	/m/min/
V'_v	- odebraný objem materiálu na 1mm kotouče při broušení s vyjiskřováním	/mm ³ /mm/
V'_H	- odebraný objem materiálu na 1mm kotouče při hrubování	/mm ³ /mm/
W	- modul průřezu	/mm ³ /
W_p	- výkon	/W/
ΔX_n	- tloušťka vrstvy	/μm/
Δx	- tloušťka odebrané povrchové vrstvy	/μm/
y	- měřená hodnota deformace	/μm/
y'	- průhyb nosníku	/μm/
y''	- pootočení měřicího třmenu v rovině měření	/μm/
ΔY_n	- přírůstek deformační křivky na délce zápisu ΔL_n	/mm/
Δy_n	- deformace vzniklá odleptáním vrstvy n	/μm/
Δy_c	- velikost deformace po odebrání vrstvy Δx	/μm/
Δy_1	- deformace vyvolaná natočením souměrných průřezů od působení M	/μm/
Δy_2	- deformace vyvolaná poměrným zkrácením nebo prodloužením od působení tahových nebo tlakových napětí	/μm/
Δy_3	- změna polohy konce ramene v místě měření deformace, vyvolaná natočením souměrných průřezů o úhel $\Delta \varphi_y$	/μm/

α, β	- úhly odpovídající neodleptané části kroužku	/°/
α_0	- ortogonální úhel hřbetu	/°/
γ_0	- ortogonální úhel čela	/°/
κ	- úhel nastavení	/°/
α_s	- úhel sklonu ostří	/°/
ψ	- úhel pootočení koncového průřezu	/°/
Θ	- teplota	/K/
$\pm \sigma$	- zbytková pnutí tahová (tlaková)	/MPa/
σ_n	- zbytková pnutí ve vrstvě n	/MPa/
σ_{sn}	- skutečná zbytková napětí ve vrstvě n	/MPa/
σ_c	- celkové zbytkové napětí	/MPa/
σ_T	- napětí zjištěná z deformace vzorku po odebrání jednotlivých vrstviček	/MPa/
σ_R	- napětí uvolněná při rozřezání vzorku	/MPa/
σ_V	- napětí vzniklá ve vrstvě při odebrání všech předchozích vrstev	/MPa/
σ_{Vn}	- zbytkové napětí vypočítané z deformace pro vrstvu n	/MPa/
x, y, z	- osy souřadného systému	/-/

4. Metoda měření zbytkových pnutí

Pro měření zbytkových pnutí byla zvolena metoda elektrolytického odleptávání. Tato metoda je z destruktivních, mechanických metod nejpřesnější a oproti ostatním typům metod ekonomicky nejvýhodnější. Umožňuje také určování pnutí i pro materiály, kde např. rentgenový způsob selhává. Při pečlivém provedení je tedy přesnější a rychlejší než ostatní metody

Její nevýhodou je to, že určuje pouze pnutí I. druhu, a to jeho průměrnou hodnotu po celé délce odebrané vrstvy. Je nevhodná pro nehomogenní rozložení makropnutí. Má-li zbytkové pnutí vysoký gradient dostáváme rozdílné výsledky podle toho pro jakou tloušťku odebrané vrstvy měříme deformaci.

Princip metody spočívá v tom, že z vyšetřované plochy jsou postupně elektrolyticky odebírány vrstvy materiálu konstantními podmínkami. Odstraněním vrstvy dochází k deformaci, ze které je možno stanovit napětí úměrné této změně rovnováhy vnitřních sil. Přesnost měření je závislá na možnosti odebrání vrstvy konstantní tloušťky po celé sledované ploše, přesnosti deformace, složitosti výpočtu a hlavně na ovlivnění původních zbytkových napětí podmínkami úběru. Známe-li tloušťku vrstvy, deformaci vzorku a modul pružnosti materiálu, můžeme na základě klasické teorie pružnosti vypočítat hodnotu pnutí v jedné, popř. v dalších postupně odebíraných vrstvách. Z hodnot deformace v jednom nebo více směrech lze určit jednoosou nebo víceosou napjatost.

5. Příprava vzorků

5.1. Modelové vzorky

Modelové vzorky k ověření vlivu jednotlivých způsobů výrobních operací a kombinace nastavitelných podmínek je třeba volit tak, aby umožňovaly snadnou manipulaci při výrobě i vlastním měření a výpočtu zbytkových napětí. Pro rovinné vzorky při používaném způsobu měření vyhovuje prismatický průřez s konečnou tloušťkou 3 ± 10 mm, šířkou 5 ± 12 mm a výškou 50 ± 70 mm. Pro kruhové vzorky jsou optimální rozměry, vnitřní průměr 20 ± 40 mm, vnější průměr 25 ± 50 mm, šířka 2 ± 10 mm.

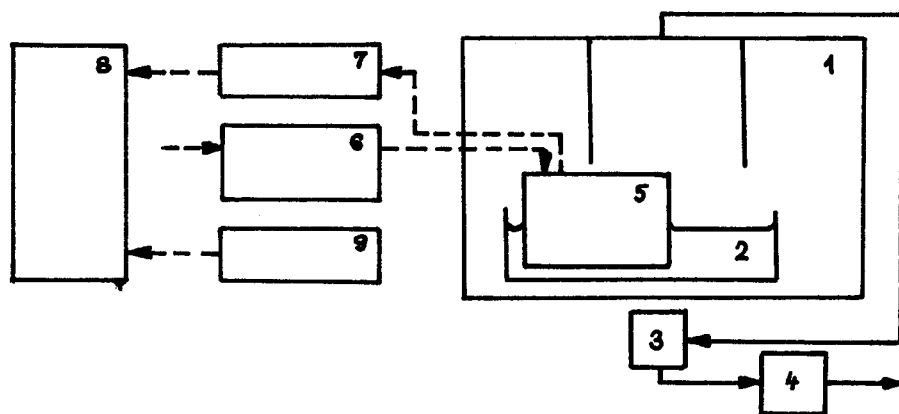
5.2. Vzorky k měření napětí na plochách konkrétních součástí

Odříznutí vzorků je nutno provádět takovým způsobem, aby nedocházelo k většímu ovlivnění napjatosti /např. upínacími silami, teplotou vznikající při řezání apod./ . Vhodným způsobem řezání je např. elektrojiskrové obrábění, řezání drátovou pilou AGIE při jemných podmínkách apod.. Pro navrhovaný způsob měření je nutno získat vzorky o minimální šířce 3 mm, s výškou minimálně 40 mm, tloušťka pod sledovanou plochou by se neměla výrazně měnit /přechodové poloměry apod./ . Rozměry jsou závislé na požadované rozlišovací schopnosti měření při použití kombinace snímač deformace - zesilovač - indikační přístroj a na geometrických tvarech a rozměrech měřícího zařízení

6. Měřicí zařízení pro měření zbytkových pnutí

6.1. Pracoviště pro měření zbytkových pnutí

Pro měření zbytkových pnutí bylo využito pracoviště vyvinuté v laboratoři obrábění, KOM na VŠST Liberec u kterého byly zlepšeny parametry měření.



Obr. 2.: Blokové schéma pracoviště.

- | | |
|---|--|
| 1 - digestoř | 7 - univerzální měřicí
můstek UM 131 |
| 2 - jímací vana /nádrž/ | 8 - číslicový zapisovač XY
Schreiber Endim 2200/1 |
| 3 - odlučovač | 9 - časová základna ARITMA |
| 4 - ventilátor | |
| 5 - měřicí zařízení | |
| 6 - stejnosměrný zdroj se
stabilizací napětí a
proudu | |

Bezpečnou práci s agresivním prostředím při leptání zabezpečuje digestoř 1, která vytváří uzavřené pracoviště; ventilátor 4, který odčerpává odpařené plyny z nádrže 2 a odlučovač 3, který plyny z leptajícího roztoku

před odchodem do atmosféry neutralizuje. Odlučovač obsahuje neutralizační lázeň tohoto složení /příprava 10 l/:

- 2,8 l destilované vody
- 7,2 l lihu
- 200ml dietyltriaminu

Před vlastním používáním je nutno lázeň zhomogenizovat.

Pracovní parametry neutralizační lázně:

- pracovní teplota 20 ± 25 °C
- skladovací teplota do 20 °C
- minimální obsah volného dietyltriaminu 15 g/l

Upnutí vzorku a jeho změření umožňuje měřicí zařízení 5, které je napájeno ze stejnosměrného zdroje 6.

Princip měření spočívá v kontinuálním zjišťování polohy měřicí tyčky, spojené s volným koncem odleptávaného vzorku. K vlastnímu vyhodnocení se využívá změny indukčnosti dvou diferenciálně zapojených indukčních snímačů typu IWB 102 /výrobce RFT WEB FUNKWERK DRESDEN, DDR/.

Indukční snímače jsou zapojeny v měřicím můstku UM 131 7, jež umožňuje buď přímé odečítání měřených hodnot anebo slouží jako zdroj signálu pro souřadnicový zapisovač 8. První varianta slouží pouze k orientaci, druhá je běžně využívána pro vlastní vyhodnocování. V našem případě byl použit souřadnicový zapisovač XY Schreiber Endim 2200/1. Vstupem pro osu y je zpracovaný signál z indukčních snímačů. Zesílení je 100 mV, které umožňuje při použití zapisovacího papíru formátu A3 měřicí rozsah $\pm 0,5$ mm /výchylka vlastní měřicí tyčky vůči indukčním snímačům/.

Posuv zapisovače ve směru osy x je zajišťován pomocí časové základny ARITMA /rozsah 0 ± 20 minut/. V provozu byl používán rozsah 20 minut a zesílení zapisovače 100mV. Při délce zápisu větší jak 20 minut je nutné pomocí tlačítka vratet pisátko zpět a využívat papír vícekrát.

K urychlení a stabilizaci leptání slouží stejnosměrný zdroj 6. Napětí se pohybuje v rozsahu 1 + 8 V. Leptací proud závisí na rozměrech vzorku a dosahuje hodnoty 0,1 + + 2 A/cm². Zdroj má proudovou stabilizaci, neboť vzrůst napětí indikuje vznik pasivačních vrstev.

K dalšímu vybavení měřícího pracoviště patří elektrolyt, zařízení k promíchávání leptací lázně, zařízení k regulaci teploty lázně, krycí ochranné vosky, nádoba s oplachovou vodou a měřící přístroje pro určení rozměru vzorku.

Volba druhu elektrolytu závisí na materiálu, pro který se určuje průběh zbytkových pnutí /viz kap. 7/

Pro zjištění konstantního úběru je nutno elektrolyt intenzívně promíchávat. Je možno použít buď nízkootáčkový elektromotorek s vířící vrtulkou nebo lázeň míchat tlakovým vzduchem. V našem případě bylo použito druhé možnosti. Jako zdroj tlakového vzduchu byl použit vzduchovací přístroj WAD 2 /Zverimex, ČSCHDZ/.

Pro potlačení pasivačních jevů musí být teplota pasivační lázně vyšší než 20 °C jinak dochází k vytváření v daném prostředí nerozpustných sloučenin na povrchu anody, které brání jejímu dalšímu rovnoměrnému rozpouštění. Rovněž je limitována horní hranice teploty. Při použití vosků jako krycího nátěru by neměla přesáhnout 40 °C. U lázně na bázi ledové kyseliny octové a kyseliny fluorovodíkové nesmí překročit 25 °C /nebezpečí prudké, nekontrolovatelné reakce s odleptávanými materiály/. K zahřívání lázně bylo použito topení pro akvária /Eugen Jäger GmbH, Wöstenrot/, umožňující stabilizaci teploty v rozmezí ±0,7 °C. Proti účinkům kyseliny fluorovodíkové je nutno chránit

skleněné části topného tělesa směsí ochranných vosků.

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 například směs vosků - lyžařský vosk na měkký sníh a včelí vosk v poměru 1 : 1. Je však možno použít i lékařský parafín. Nanáší se v roztaženém stavu, nejlépe tyčinkou s dřevěnou rukojetí na horní části upínacího zařízení a neleptané plochy vzorku, na místo vetknutí pak ponořením. Po leptání se odstraňují nejprve hruběji jemným oškrábáním, načisto pak benzinem, toluenem, trichlorem.

Nádoba s oplachovou vodou je nutná k ukončení průběhu leptání a k oplachu vzorku po měření. Její obsah by měl být alespoň 2 l .

Měřicí přístroje pro určení rozměru vzorku: Délkové míry postačuje určovat s přesností 0,01 mm - vyhovuje tedy mikrometr. Pro odměření odleptané vrstvy velmi dobře vyhovují mikrometrické hodinky se stojanem. Pro určení vzdálenosti před a po rozřezání kruhových vzorků je nejvýhodnější použít dílenského mikroskopu.