

strojní a textilní
Vysoká škola: v Liberci Fakulta: strojní
Katedra: materiálu a strojírenské Školní rok: 1986/87
metallurgie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro Petr K U Č E R A
obor 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: Studium napjatosti v povrchových vrstvách materiálu
vzniklých ozářením pulsním laserem vysokého výkonu

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte stručnou rešerši zadaného tématu se zvláštním zaměřením na způsoby měření pnutí.
2. Vyberte vhodnou metodu měření napětí a experimentálně ji proveďte.
3. Zpracujte výsledky experimentů a formulujte závěry

V 177 / 87 S

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5
PSČ 461 17

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy: 50 - 60 stran

Seznam odborné literatury:

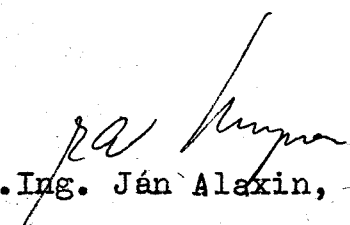
- /1/ Iva Kraus : Úvod do strukturní rentgenografie
- /2/ další literatura podle pokynů vedoucího práce

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Jiří Horyna, CSc

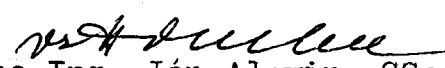
Datum zadání diplomové práce: 15.9.1986

Termín odevzdání diplomové práce: 11.5.1987

L.S.


Doc. Ing. Ján Alaxin, CSc

Vedoucí katedry


Doc. Ing. Ján Alaxin, CSc

Děkan

Liberci

10.9.

86

V dne 19.....

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci

nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

Obor 23 - 07 - 8

strojírenská technologie

zaměření

strojírenská metalurgie

Katedra materiálů a strojírenské metalurgie

STUDIUM NAPJATOSTI V POVRCHOVÝCH VRSTVÁCH MATERIÁLU
VZNIKLÝCH OZÁŘENÍM PULSNÍM LASEREM VYSOKÉHO VÝKONU

KMM - 232

Petr Kučera

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Jiří Horyna, CSc.
VŠST Liberec

Konzultant:

Rozsah práce a příloh

Počet stran : 61

Počet tabulek : 5

Počet obrázků : 31

Počet příloh : 2

Počet výkresů : 0

Liberec 11. května 1987

P O D Ě K O V Á N Í

Děkuji s. Doc. Ing. Jiřímu Horynovi, CSc
za vytvoření dobrých pracovních podmínek, cenné rady
a konzultace řešené problematiky.

Děkuji též s. Maříkovi, s. Ing. Janouškovi a všem
pracovníkům KMM včetně metalografické laboratoře,
kteří mi pomohli při řešení úkolů této práce.

V Liberci 11. května 1987

Petr Kučera
Kučera Petr

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

V Liberci dne 7. května 1987

Petr Kučera
Kučera Petr

O B S A H

1. Úvod	6
1.1 Seznam použitých symbolů a značek	7
2. Teoretická část	8
2.1 Fyzikální podstata ohřevu laserovým zářením	8
2.1.1 Parametry laseru nutné pro tepelné zpracování pomocí laseru	9
2.1.2 Zpracování kovů paprsky laseru	10
2.2 Pnutí v materiálu	11
2.2.1 Rozdělení metod zjišťování vnitřních pnutí	11
2.2.2 Pojem okamžité, vložené a zbytkové pnutí	12
2.2.3 Zbytková napětí	12
2.2.3.1 Klasifikace zbytkových napětí dle rentgenogramu	13
2.2.4 Princip difrakčního měření zbytkových napětí 1. druhu	14
2.2.4.1 Metoda jedné expozice	18
2.2.4.2 Metoda dvou expozic	18
2.3. Metody zjišťování vnitřního pnutí	20
2.3.1 Odvrtávací metoda	20
2.3.2 Nános křehkých laků	21
2.3.3 Metoda využívající efektu Moiré	22
2.3.4 Holografická interferometrie	22
2.3.5 Rentgenová difrakce	23
2.3.6 Fotoelasticimetrie	23
2.3.7 Odleptávací metoda	24
2.3.7.1 Daviděnkova metoda určení napětí 1. druhu	25
2.4 Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálů zpevněných laserem	26
2.4.1 Zbytková napjatost v povrchové vrstvě	26
2.4.1.1 Vliv vzájemné interakce laser - materiál na rozvržení zbytkových pnutí vzniklých transformací pevná látka - pevná látka u ocelí	36
2.4.2 Zbytková napjatost v povrchové vrstvě - litina	37
2.4.3 Zbytková napjatost v povrchové vrstvě - titanové slitiny	39
2.4.4 Vliv laserového záření na mechanické charakteristiky materiálu	40

3. Prováděcí část	42
3.1 Návrh zařízení	42
3.1.1 Výpočet zbytkových pnutí u rovných vzorků	45
3.2 Návrh vzorků	46
3.3 Rozbor struktur	48
4. Výsledková část	54
4.1 Parametry zařízení pro odleptávání vzorků z oceli 12 O40	54
4.2 Tabulky naměřených hodnot	54
4.3 Grafické znázornění naměřených hodnot	56
5. Diskuze	57
6. Závěr	59
6.1 Návrh dalšího výzkumu	59
7. Literatura	60

Ú V O D .

Závěry XVII. sjezdu KSČ staví před všechny odvětví národního hospodářství neustále vyšší úkoly.

Z dokumentů komplexního programu vědecko-technického pokroku členských zemí RVHP do roku 2000 vyplývá pět prioritních směrů vývoje a využívání principiálně nových druhů techniky a technologií.

- 1 ... Elektronizace národního hospodářství
- 2 ... Komplexní automatizace
- 3 ... Jaderná energetika
- 4 ... Nové materiály a technologie jejich výroby a zpracování
- 5 ... Biotechnologie

Jedním z úkolů, který je pokládám za nezbytný je, aby hlavní úsilí bylo zaměřeno na vývoj a osvojení nových a zdokonalení existujících technologií, ke kterým patří vývoj série technologických laserů a jejich použití pro řezání, svařování, obrábění a tepelné zpracování. Do této problematiky je zařazen Státní výzkumný úkol, který řeší Katedra materiálů a strojírenské metalurgie VŠST a do kterého spadá i téma mé diplomové práce - studium napjatosti v povrchových vrstvách materiálů vzniklých ozáření pulsním laserem vysokého výkonu.

Cílem předložené práce je:

- 1 ... rešerže literatury v oblasti zbytkových napětí v povrchové vrstvě materiálů ozářených laserem a způsobů jejich určení
- 2 ... vybrání vhodné metody měření zbytkových napětí, její provedení
- 3 ... zpracování výsledků experimentu a jejich porovnání se srovnatelnými výsledky měření zbytkových napětí prováděných různými metodami, které jsou uvedeny v rešeržní části.

Seznam použitých symbolů a značek.

značka	význam	rozměr
$\bar{v}$	změna teploty mřížky	
R	el. odpor vodiče	Ω
I_{ef}	efektivní hodnota el. proudu	A
ρ	měrný elektrický odpor	$\Omega \cdot m$
ρ'	měrná hmotnost	$kg \cdot m^{-3}$
d_{hkl}	mezirovinná vzdálenost	m
ϵ	deformace	N/m^2
ϵ_i	relativní deformace	N/m^2
G	napětí	Pa
θ	Braggův úhel reflexe	°
E	Youngův modul pružnosti	Pa
ν	Poissonovo číslo	-
φ	směrový úhel	°
ψ	směrový úhel	°
d	tloušťka vzorku	m
l	vzdálenost od roviny zpevnění k indikátoru	m
Δy_n	měřená hodnota deformace po odstranění n-té vrstvy	
ΔH_n	tloušťka n-té vrstvy	m
h_n	tloušťka vzorku po odstranění vrstvy n	m
l	délka leptané plochy	m
a	vzdálenost konců leptané plochy od roviny snímání deformace	m
φ	úhel pootočení koncového průřezu	°
y	měřená hodnota deformace	m
y'	průhyb nosníků	m
y''	pootočení měřicího třmene v rovině měření	m
b	šířka průřezu	m
h	tloušťka průřezu	m
M	ohybový moment	N.m

2. Teoretická část.

2.1. Fyzikální podstata ohřevů laserovým zářením

Paprsek laseru v podobě světelné vlny se pomocí soustavy čoček fokusuje na povrchu materiálu. Dochází-li k difrakci paprsku v tenké povrchové vrstvě o rozměru $\delta 10^{-7} \div 10^{-8}$ [m], přičemž se část fotonového kvanta v závislosti na odrazivosti této vrstvy odráží zpět do prostředí obklopující ozařovanou věc /7/.

Světelná vlna se pohlcuje valenčními elektrony a přechází v kmitání mřížky. Přejít elektromagnetické energie v teplo se končí za dobu, která odpovídá několika setinám kmitu iontu, neboť doba existence fotonu $t = \delta/c$ a to odpovídá $10^{-15} \div 10^{-16}$ [s].

Rozdíl hmotnosti elektronu a iontů vede k tomu, že ohřev elektronového plynu je rychlejší než ohřev mřížky. Změna teploty mřížky je daná relaxačním vztahem laserového impulsu /7/.

$$\pi \cdot \frac{R \cdot I_{ef}^2}{m \cdot \epsilon} = \frac{\bar{I} \cdot I_{ef}^2}{S \cdot \rho \cdot \epsilon}$$

Doba relaxace laserového impulsu je 10^{-11} [s]. Během rychlého pohlcení dostatečně velké energie fotonů sleduje světelná vlna šíření nahráte oblasti /7/.

Tento proces může být natolik intenzivní, že vede ke vzniku tlakových vln. Pohlcování elektromagnetické energie exponenciálně ubývá od povrchu. Důsledkem toho je vznik vysokého gradientu teploty, přičemž dochází k vyparování povrchové vrstvy materiálu.

Tento proces je srovnatelně rychlý s dilatací pevné látky, takže v době ohřevu dochází nad ozařovaným povrchem k vysokým tlakům par, což při kombinaci s impulsi může vést ke značným narušením ohřívaného materiálu /7/.

Pro tok fotonů vysokých energií se účinný průřez absorpce nemění vlivem procesů probíhajících během absorpce, tj. v průběhu ohřevu, fázových přeměn a ionisace. Pro fotonová kvanta nízkých energií je situace jiná. Hloubka průniku a tím i účinný průřez absorpce elektromagnetického záření materiálu nezávisí na teplotě a může dojít k tomu, že počáteční část impulsu působí na větší či menší hloubku než konečná část /7/.

Směr změny závisí na zmenšování nebo zvětšování elektrické vodivosti pevné fáze při absorpci světla. Proto je hloubka pohlcení světelné energie jedním ze základních parametrů určujících intenzivnost tlakové vlny a impulsu /7/.

2.1.1. Parametry laseru nutné pro tepelné zpracování pomocí laseru

Hlavními charakteristikami laserového tepelného zpracování, které jsou nezávisle proměnné, jsou výkon dopadajícího svazku paprsku záření a průměr dopadajícího svazku, které se vyjadřují jako plošná hmota výkonu, dále vlnová délka záření, pohltivost povrchu materiálu, nebo povlaku na něm a posuvová rychlost svazku paprsku podél povrchu materiálu /5/.

Režim zpracování se volí a ovládá nejdůležitějšími proměnnými laseru, což je konstanta výkonu a posuvová rychlost /5/.

Všeobecně se pro transformační zpevnění železných materiálů používají hustoty výkonu $10^3 \div 10^5 \text{ W/cm}^2$. Hloubka zpevnění je přímo úměrná výkonu laseru pro konstantní průměr svazku paprsků a rychlost posuvu /5/. Jsou-li konstantní energetické parametry, je hloubka zpevnění nepřímo úměrná druhé odmocnině posuvové rychlosti /5/.

Gaussovým rozdělením intenzity záření ve svazku paprsků je daná největší hloubka zpevnění, která je umístěná uprostřed stopy. Šířka tepelně ovlivněné oblasti je omezena šířkou svazku paprsků /3/. Pro dosažení větší šířky této oblasti je nutno stopy paprsků překrývat. To má však za důsledek, že nedosáhneme stejnoměrné hloubky zpevnění a také v překrytých oblastech dochází k odpevnění popuštěním /3/.

Širokého pásu s rovnoměrnou tloušťkou zpevnění dosáhneme vysokofrekvenční oscilací. Nejjednodušším případem je oscilace paprsku příčně ke směru posuvu součástí /3/.

Laserový paprsek se fokusuje na hustotu výkonu minimálně

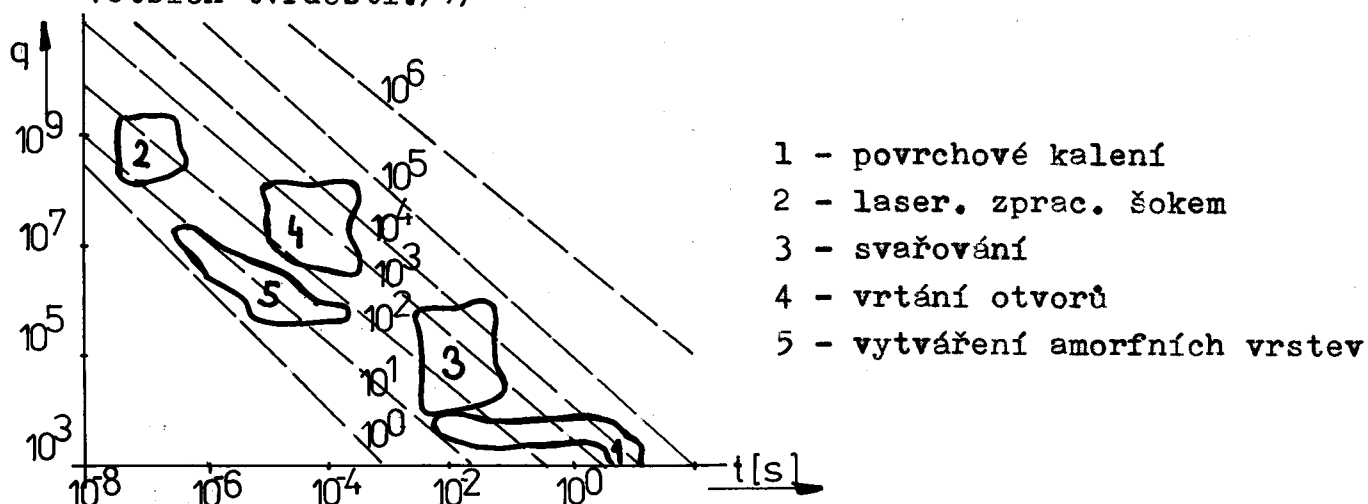
$10^4 \text{ [W cm}^{-2}\text{]}$, což zaručuje rychlý ohřev. Oscilační frekvence a posuvová rychlost se volí tak, aby teplota dané skvrny na povrchu byla mezi teplotou tání T_t a transformační teplotou T_{krit} /3/.

Je-li vzhledem k hustotě výkonu frekvence oscilace příliš malá, dochází k natavení povrchu. Je-li frekvence oscilace příliš velká pro daný výkon, materiál se neohřeje na transformační teplotu a nedojde ke zpevnění. Osciluje-li paprsek příliš dlouho v dané oblasti třeba pro zvýšení hloubky zpevnění, ohřeje se celá součást a nedochází k samozakalení /3/.

2.12. Zpracování kovů paprsky laseru

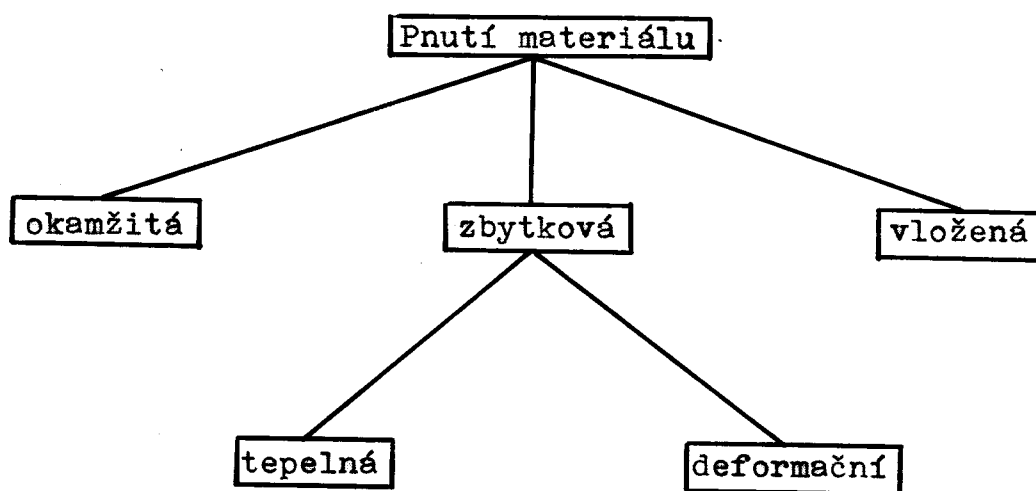
Laser je výhodný jako zpevňovací nástroj, jehož výhodou je to, že způsobuje menší deformace součásti, než je tomu u jiných metod. Je zapotřebí méně tepla v menším čase a povrchové namáhání je sníženo na minimum přesným řízením hloubky zpevněné vrstvy /7/.

Lasery jsou účinné při prudkém zvyšování teploty materiálu. Jestliže se energie laseru sníží, nebo je paprsek odveden do jiného místa, následuje prudké samoochlazení /7/. V některých materiálech toto samoochlazení má za následek transformační zpevnění povrchu, což je hlavním cílem tepelného zpracování laserem. KIKUCHI předpokládá /7/, že během tepelného zpracování laserem vzniká martenzit za neobvykle vysokého brzdění vzhledem k vysokým rychlostem ohřevu a ochlazování. Tento jev vede ke tvorbě neobvykle deformovaného martenzitu, který dosahuje větších tvrdostí. /7/



obr. č.2.1. Energetické charakteristiky některých procesů laserového zpracování.

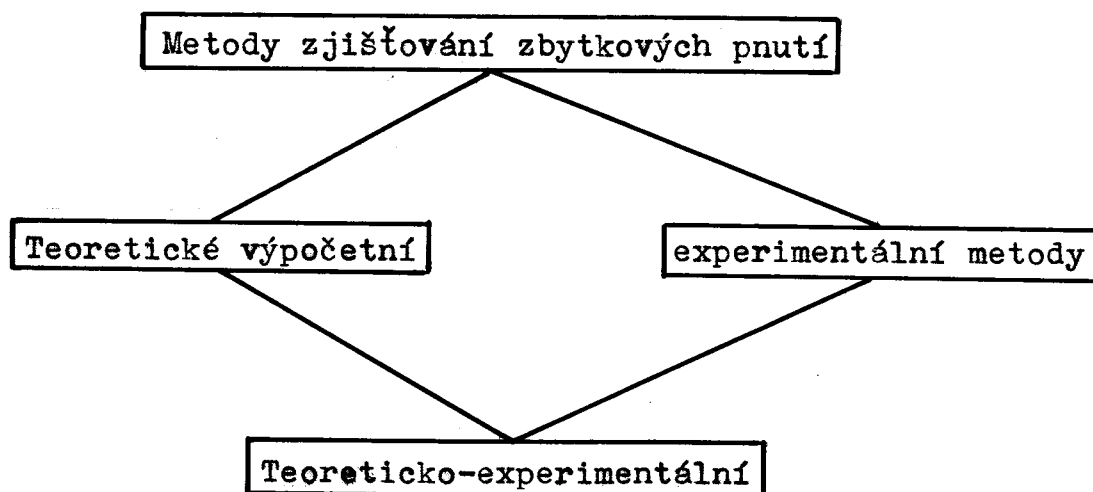
2.2. Pnutí materiálu /13/



Příčiny vzniku pnutí:

- 1/ nerovnoměrný ohřev ochlazování
- 2/ nerovnoměrná plastická deformace
- 3/ strukturní změny

2.2.1 Rozdělení metod zjišťování vnitřních pnutí /13/



2.2.2. Pojem okamžité, vložené a zbytkové pnutí

V případě, že vnitřní pnutí nepřesáhnou oblast pružného stavu, dojde po vyrovnání teplot i k vyrovnání stavu napjatosti. V materiálu připouštíme pnutí OKAMŽITÁ, nemající technického významu /13/.

Víceosé napětí, které působí v uzavřeném systému jehož každá část má stejnou teplotu, se nazývá napětím ZBYTKOVÝM /12/. Součet vnitřních sil vzhledem k libovolnému řezu uvažovaným systémem i součet vnitřních momentů vzhledem k libovolné ose procházející systémem je nulový. Systém je uzavřený nejen vůči vnějším silám a jejich momentům, ale i vůči vnějším nemechanickým stavovým veličinám, které v něm mohou mechanické účinky vyvolat /12/.

VLOŽENÉ napětí je napětí, které vzniká v objektu kratším působením vnějších sil /12/.

2.2.3. Zbytková napětí

Vznikají v polykrystalických materiálech, zvláště v kovech jak při výrobě, tak i během jejich dalšího zpracování. Doprovázejí každý mechanický, tepelný nebo chemický proces v materiálu, při němž dochází k trvalé změně jeho části nebo objemu. Pro existenci zbytkových napětí jsou důležité plastické deformace, které jsou způsobeny různými příčinami /12/. Dle druhu příčin rozlišujeme napětí tepelná, deformační apod. /12/.

Napětí rozdělujeme dle velikosti objemu v němž dosahují rovnováhy.

ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ I. DRUHU (makroskopické) jsou přibližně konstantní co do směru i velikosti homogenní v makroskopické oblasti materiálu. U polykrystalických kovů je makroskopická oblast s velkou plochou nekonečně tenkou. Kolmo k ní jsou přípustné strmé gradienty zbytkového napětí I. druhu /12/.

Porušením silové a momentové rovnováhy (vnitřní síly odpovídající zbytkovým napětím 1. druhu nabývají rovnováhy vzhledem ke každému řezu celým tělesem stejně jako momenty vnitřních sil vzhledem k libovolné ose procházející tělesem) dochází ke změně makroskopických rozměrů tělesa /12/.

ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ II. DRUHU jsou homogenní jen v malých oblastech materiálu. U polykrystalických kovů mají tyto objemy velikost jednotlivého krystalu. Vnitřní síly a momenty spojené se zbytkovými napětími 2. druhu jsou v rovnováze ve větším počtu krystalů. Porušením silové a momentové rovnováhy ještě nemusí dojít ke změnám makroskopických rozměrů. Zbytkové napětí 2. druhu se může označit jako homogenní mikroskopické zbytkové napětí /12/.

ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ III. DRUHU jsou nehomogenní i v nejmenších oblastech materiálu - lineární rozměr takového objemu je pouze několik atomových vzdáleností. Rovnováha vnitřních sil odpovídajících zbytkovým napětím 3. druhu se dosahuje v dostatečně velké části zrna. Zásahem do rovnováhy nevznikají žádné makroskopické změny rozměrů tělesa /12/. Zbytková napětí 3. druhu (nehomogenní mikroskopická zbytková napětí) představují porušení pravidelného rozložení atomů v mřížce.

Nejdůležitější zbytková napětí jsou zbytková napětí 1. druhu. /12/

2.2.3.1. Klasifikace zbytkových napětí dle rentgenogramu

Zbytková napětí 1. druhu - na rentgenogramech se projevují takovým posunutím difrakčních linií, které lze odstranit vhodným rozřezáním tělesa. /12/

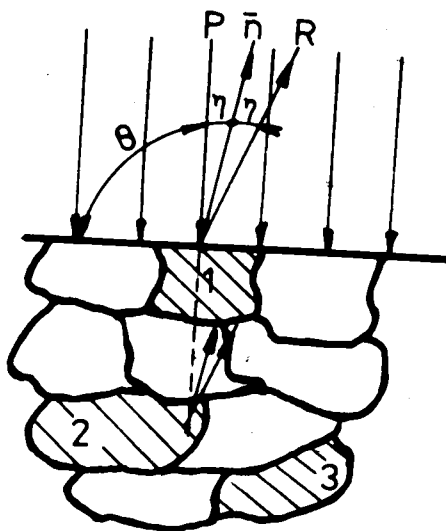
Zbytková napětí 2. druhu - rentgenograficky se projevují symetrickým rozšířením difrakčních linií a případně i jejich posunem, který však nemůže být odstraněn rozřezáním tělesa. /12/

Zbytková napětí 3. druhu - jejich vliv na difrakční linie není dosud zcela jednoznačně stanoven, do klasifikace dle rentgenogramů se nezahrnuje. /12/

224. Princip difrakčního měření zbytkových napětí 1. druhu.

Vložená i zbytková napětí se určují výpočtem z relativní deformace. K měření deformace je třeba absolutní změny délky, u rentgenografické tenzometrické metody se měří vzájemné vzdálenosti d_{hkl} zvoleného systému(hkl) atomových mřížkových rovin /12/.

Na povrch polykrystalického materiálu dopadá svazek monochromatických rentgenových paprsků a dochází k jejich reflexi na systémech rovin (Braggova rovnice), jejichž normála $\vec{n}$ svírá se směrem primárního svazku úhel η /12/.



obr. č.2.2. Schéma difrakce monochromatických rentgenových paprsků v polykrystalickém materiálu

- P R - dopadající (reflektovaný) paprsek
 $\vec{n}$ - normála rovin
 η - úhel, který svírá normála $\vec{n}$ se směrem dopadajícího primárního svazku

Dochází ke změně mezirovinných vzdáleností elastickým namáháním v krystalech. Označujeme d_0 hodnotu d v nenapjatém stavu, pak deformace mezirovinné vzdálenosti ve směru normály n je dána:

$$\varepsilon(n) = \frac{d - d_0}{d_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \quad (2.0)$$

Uvnitř tělesa ve stavu objemové napjatosti je umístěn nekonečně malý rovnoběžnostěn. Jeho napěťová charakteristika je dána /12/:

- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = tři normálová napětí

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ = tři tečná napětí souřadný systém zvolen ve směru hran rovnoběžnostěnu

- volíme-li $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ tak, aby tečná napětí vymizela, pak jsou $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ nazývána hlavními napětími $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$

Vztah mezi deformacemi ε_i a napětími σ_i $i = (1, 2, 3)$ při objemovém stavu napjatosti /12/.

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)}{E} \\ \varepsilon_2 &= \frac{\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)}{E} \\ \varepsilon_3 &= \frac{\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)}{E} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Vyjádření deformace ε v libovolně zvoleném směru φ, ψ ve sférických deformacích (obr. č.2.3.)/12/.

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \varepsilon_1 \sin^2 \psi \cos^2 \varphi + \varepsilon_2 \sin^2 \psi \sin^2 \varphi + \varepsilon_3 \cos^2 \psi$$

dosadíme za ε_i z (2.1)

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{\nu+1}{E} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin^2 \psi + \frac{\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)}{E} \quad (2.2.)$$

přičemž

$$\sigma_\varphi = \sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi$$

sjednocením deformace $\varepsilon_{\varphi, \gamma}$ s deformací mezivrstevné vzdálenosti $\varepsilon(n)$

$$\varepsilon_{\varphi, \gamma} = \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)_{\varphi, \gamma}$$

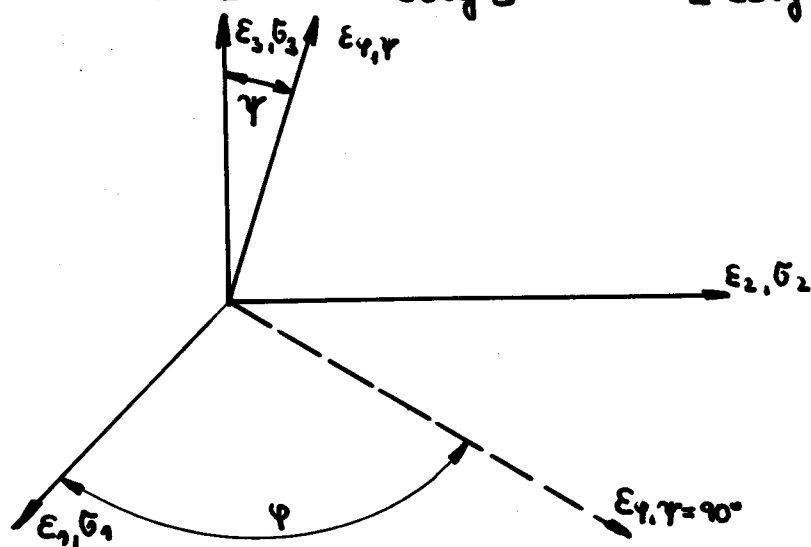
diferencováním Braggovy rovnice s použitím (2.0.)

$$\Delta \theta = \theta - \theta_0 = \operatorname{tg} \theta_0 \cdot \frac{\Delta d}{d_0} = -\operatorname{tg} \theta_0 \cdot \varepsilon \quad (2.3.)$$

$$\varepsilon_{\varphi, \gamma} = \frac{d_{\varphi, \gamma} - d_0}{d_0} = -\cot \theta_0 (\theta_{\varphi, \gamma} - \theta_0)$$

ze vztahu (2.2.) a (2.3.) dostáváme

$$\theta_{\varphi, \gamma} = -\frac{\nu + 1}{E} \frac{(\sigma_1 - \sigma_2) \sin^2 \gamma + -\sigma_2 + \nu(\sigma_1 + \sigma_2)}{\cot \theta_0} + \theta_0 \quad (2.4.)$$



obr. č. 2.3. popis orientace ε pomocí úhlů φ, γ předpokládáme, že směr povrchové normály je dán úhlem $\gamma = 0^\circ$.

Nyní existují dvě možnosti:

a/ $G_3 = 0$ (hloubka vnikání použitého záření je pokládána za zanedbatelnou = dvojosý stav napjatosti) /12/.

b/ $G_3 \neq 0$

Možnost a/ $G_3 = 0$ odpovídá možnostem běžné difrakční techniky a proto se dále budeme věnovat této možnosti /12/.

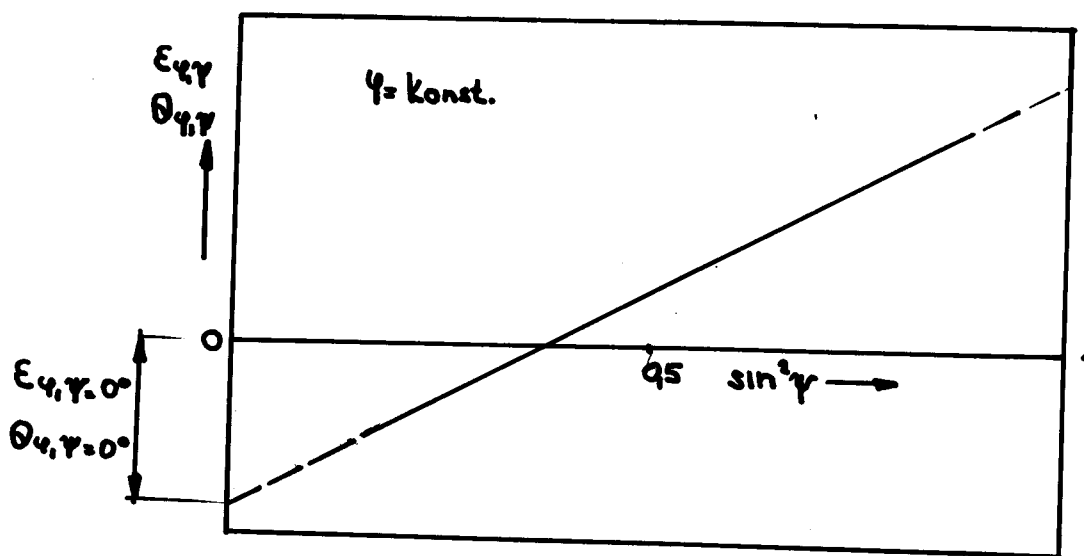
(2.2.) a (2.4.) přechází do tvaru:

$$\varepsilon_{\varphi, \gamma} = \frac{\nu+1}{E} G_{\varphi} \sin^2 \gamma - \frac{\nu}{E} (G_1 + G_2) = \frac{1}{2} S_2 G_{\varphi} \sin^2 \gamma + S_1 (G_1 + G_2) \quad (2.5)$$

$$\theta_{\varphi, \gamma} = -\frac{1}{2} S_2 G_{\varphi} \frac{\sin^2 \gamma}{\cot \theta_0} - S_1 \frac{G_1 + G_2}{\cot \theta_0} + \theta_0 \quad (2.6)$$

kde $S_1 = -\frac{\nu}{E}$; $\frac{1}{2} S_2 = \frac{\nu+1}{E}$ (Voigtovy konstanty)

závislosti $\varepsilon_{\varphi, \gamma}$ a $\theta_{\varphi, \gamma}$ na $\sin^2 \gamma$ je pro každé φ lineární (obr. č.2.4)



obr. č.2.4 Závislost $\varepsilon_{\varphi, \gamma}(\sin^2 \gamma)$, $\theta_{\varphi, \gamma}(\sin^2 \gamma)$ při $\varphi = \text{konst.}$

Jsou-li známe hodnoty $\varepsilon_{\varphi, \gamma=0^\circ}$, $\varepsilon_{\varphi, \gamma=90^\circ}$, $\theta_{\varphi, \gamma=0^\circ}$, $\theta_{\varphi, \gamma=90^\circ}$ (stanovíme je extrapolací) pak z úseků, které přímky vytínají na ose souřadnic (obr. č.2.4) dostáváme /12/:

$$G_1 + G_2 = \frac{\varepsilon_{\varphi, \gamma=0^\circ}}{S_1} \quad G_1 + G_2 = \frac{(\theta_0 - \theta_{\varphi, \gamma=0^\circ})}{S_1} \cot \theta_0$$

Rovnice (2.5.) a (2.6), které jsou analytickým vyjádřením rentgenografické tenzometrické metody " $\sin^2\psi$ ", dávají možnost stanovení složky napětí σ_ψ u předem zvoleného směru ψ a i velikost a směr hlavních napětí σ_1, σ_2

$$\psi = \frac{1}{2} \arctg \frac{\sigma_\psi + \sigma_{\psi+90^\circ} - 2\sigma_{\psi+45^\circ}}{\sigma_\psi - \sigma_{\psi+90^\circ}} \quad (2.7)$$

Experimentální údaje $\epsilon_{\psi,\psi}, \theta_{\psi,\psi}$ potřebné k vyjádření lineárních závislostí $\epsilon_{\psi,\psi} \sin^2\psi$ nebo $\theta_{\psi,\psi} \sin^2\psi$ získáváme alespoň ze dvou měření provedených při různých úhlech ψ_1, ψ_2 [12].

2.2.4.1. Metoda jedné expozice $\psi_1 \neq \psi_2 \neq 0^\circ$

Dosazením do (2.5.) dostáváme $\epsilon_{\psi,\psi_1}; \epsilon_{\psi,\psi_2}$.
Při odečtení dostáváme: [12]

$$\epsilon_{\psi,\psi_1} - \epsilon_{\psi,\psi_2} = \frac{1}{2} S_2 \sigma_\psi (\sin^2\psi_1 - \sin^2\psi_2)$$

takže

$$\sigma_\psi = \frac{2}{S_2} \frac{(\epsilon_{\psi,\psi_1} - \epsilon_{\psi,\psi_2})}{(\sin^2\psi_1 - \sin^2\psi_2)} \quad (2.8.)$$

pak stejně

$$\theta_{\psi,\psi_1} - \theta_{\psi,\psi_2} = \frac{-S_2}{2 \cotg \theta_0} (\sin^2\psi_1 - \sin^2\psi_2)$$

$$\sigma_\psi = \frac{-2 \cotg \theta_0}{S_2} \frac{(\theta_{\psi,\psi_1} - \theta_{\psi,\psi_2})}{(\sin^2\psi_1 - \sin^2\psi_2)} \quad (2.9.)$$

2.2.4.2. Metoda dvou expozic $\psi_1 \neq 0^\circ, \psi_2 = 0^\circ$

Jeden z úhlů ψ_1, ψ_2 volíme roven nule, (normála k reflektujícímu systému atomových mřížkových rovin bude v takovém případě rovnoběžná s povrchovou normálou) [12] pak dostáváme:

$$\sigma_\psi = \frac{2}{S_2} \frac{\epsilon_{\psi,\psi_1} - \epsilon_{\psi,\psi_2=0^\circ}}{\sin^2\psi_1} \quad (2.10.)$$

$$\sigma_\psi = -\frac{2 \cotg \theta_0}{S_2} \frac{(\theta_{\psi,\psi_1} - \theta_{\psi,\psi_2=0^\circ})}{\sin^2\psi_1} \quad (2.11.)$$

Výpočet napětí σ_y pomocí tenzometrické metody jedné expozice (hodnoty $\epsilon_{xy_1}, \epsilon_{xy_2}$ resp. $\theta_{xy_1}, \theta_{xy_2}$ lze určit z jednoho rentgenogramu - tj. při jedné expozici) je používán při uspořádání Debyeovy - Scherrerovy metody na zpětný odraz s fotografickou registrací difraktovaného záření.

23. Metody zjišťování vnitřního pnutí.

Rozdělení metod /13/

- 1/ Mechanické - do této skupiny metod zjišťování vnitřního pnutí patří: zastavení procesu řezání
vytržení části obráběného mater.
odvrtávací metoda
- 2/ Fyzikální - do této skupiny metod zjišťování vnitřního pnutí patří: nános křehkých laků
metoda sítí
metoda využívající efektu moiré
holografická interferometrie
fotoelasticimetrie
ultrazvuková metoda
rentgenová difrakce
- 3/ Chemické - do této skupiny metod zjišťování vnitřního pnutí patří: difuze vodíku
odleptávací metoda

23.1. Odvrtávací metoda.

Principem této metody je měření napětí pomocí tenzometru. Tenzometr tvaru třísloužkové růžice se umístí v předem zvolené oblasti. Snímače jsou umístěny ve stejné vzdálenosti od středu růžice, od středu otvoru /13/. Vyvrtaný otvor s hloubkou přibližně stejnou jako průměr vrtáku způsobí uvolnění zbytkových pnutí, tyto uvolněné zbytkové pnutí registrujeme přístrojem pro registraci přetvoření /13/.

Připojení k snímačům musí být co nejkratší. Podmínkou měření je, že otvor a růžice musí být soustředné, nesmí dojít ke vzniku plastické deformace. Metoda je určena pro měření pnutí blízko u povrchu materiálu.

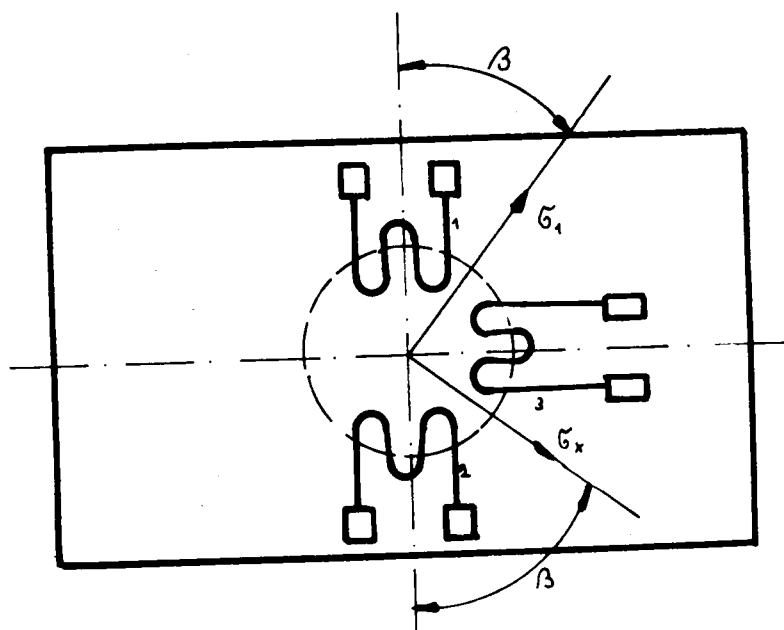
Výpočet:

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots$ změřené přetvoření

$$\begin{aligned} \tan 2\beta &= \frac{\epsilon_3 - 2\epsilon_2 + \epsilon_1}{\epsilon_3 - \epsilon_1} \\ \epsilon_{xy} &= \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} \pm \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \quad (2.12.) \end{aligned}$$

$$A = \frac{1+\nu}{2E} + \frac{1}{r^2} \quad B = -\frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{4}{1+\nu} \cdot \frac{1}{x^2} - \frac{3}{r^4} \right)$$

kde:



obr. č.2.5. Schéma odvrtávací metody.

2.3.2 Nános křehkých laků.

Na povrch zkoušené součásti se nanáší vrstva laku. Materiál laku je z přírodních nebo umělých pryskyřic. Po překročení citlivosti laku začíná praskat kolmo ke směru prodloužení. Ukazuje napjatost v celé ploše. Touto metodou lze zkoumat tlakové i tahové napětí /15/.

Tahové napětí - po vytvrzení lak zkřehne a po tahovém zatížení se poruší ve směru kolmém na směr největšího poměrného prodloužení. Na povrchu se vytváří soustava prasklin - ISOSTAT - rovnoběžně s nimi je největší konstantní prodloužení. Maximální tahové napětí je kolmé na směr isostaty /15/.

Tlakové napětí - na tlakově zatíženou součást jsou nanесeny laky a po jejich vytvrzení a zkřehnutí je součást odlehčena. Určení velikosti napětí se provádí při postupném zatížení součásti na jejímž povrchu je křehký nános. Při postupném zatěžování sledujeme vznik trhlin a při známé citlivosti laku známe i velikost deformace /15/.

23.3. Metoda využívající efektu MOIRÉ.

Metoda je založena na mechanicko-optické interferenci, která vzniká překřížením dvou základních systémů čar ve formě rastrů.

Překřížením vznikají na hustém pozadí základních rastrů dva nové systémy prvků - moiré. Čáry základních osnov jsou obrazy určitých funkcí /15/. Vzniklé prvky moiré pak zobrazují přírůstky těchto funkcí, počítá se z nich deformace. Při deformaci jedné sítě dochází ke změně systému proužků moiré. Stanovení velikosti deformace se provádí porovnáváním prvků před a po deformaci /15/.

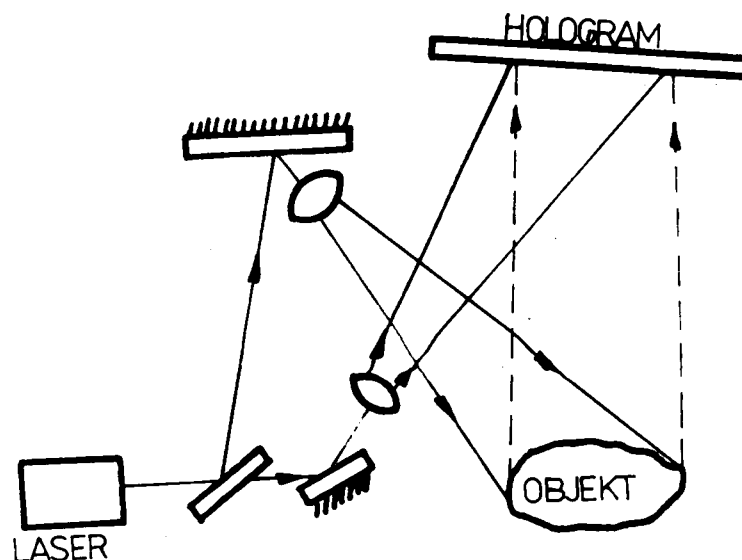
V průběhu měření se jeden rastr připevní na povrch součásti nebo její model, druhý rastr je umístěn před součástí. Rastry jsou složeny ze soustavy rovnoběžných přímých prvků s obsahem $10 \div 200$ [čar/mm]. V odraženém nebo průchozím světle se fotografuje soustava prvků moiré před a po deformaci. Prodloužení lze určit ve směru kolmém na směr prvku /15/.

23.4. Holografická interferometrie.

Po osvětlení difuzně odrážejícího tělesa laserem zdroj koherentního světla je každý jeho bod zdrojem vlnění. Toto vlnění objektová vlna spolu se světelnou vlnou referenční vlna dopadá na fotografickou desku, na které po vyvolání vzniká hologram (interferenční mřížka), která obsahuje $1000 \div 2000$ [čar/mm] /15/.

Dochází k vytvoření trojrozměrného obrazu (osvětlení hologramu světelnou vlnou) dochází k znovuvytvoření vlnění, jak amplitudy, tak i fáze /15/.

Na jednu fotografickou desku zaznamenáváme objekt před a po deformaci, při znovuoobjevení spolu interferují obě vlnění a na obraze se vytvoří soustava interferenčních prvků, které jsou závislé na deformaci objektu. Měřitelné rozdíly jsou řádově rovny vlnové délce použitého světla (laseru) /15/.



obr. č.2.6. Schéma principu hologramu.

235. Rentgenová difrakce.

Zjištění nejdůležitějších pnutí 1. druhu jehož principem je změření absolutní změny, některé základní délky, pomocí které se metodou teoreticko-experimentální zjistí vnitřní pnutí. U rentgenové difrakce je použita základní délka - vzdálenost $d_{h,k,l}$ zvoleného systému (h, k, l) atomových mřížkových rovin /12/. Záření dopadající na krystal. strukturu pevné látky, jednotlivé atomy atomové mřížky (Hugyensův princip) se stávají rozptylovými středy. Kulové vlny vycházející z těchto středů interferují vlivem pravidelného uspořádání atomů v mřížce /12/.

Záření se zesiluje jen ve směrech, ve kterých je dráhový rozdíl od jednotlivých středů roven celému násobku vlnových délek užitého záření /12/.

236. Fotoelasticimetrie.

Vyšetřování napjatosti je založeno na vlastnostech polarizovaného světla a na schopnosti některých průhledných materiálů sklo, celuloid jež v normálním nezátíženém stavu jsou schopné nabývat vlivem napjatosti dočasně vlastností látek krystalických.

Optické osy těchto krystalů se v každém bodě vyšetřovaného modelu shodují se směry hlavních napětí /8/.

Polarizované světlo získáme polarizačním filtrem. Jednosměrně orientované mikrokrystaly jodchininsulfátu nebo jódu v průhledné fólii z umělé hmoty, někdy uzavřené mezi dvě skleněné desky /8/.

Podmínky pro model pro fotoelasticimetrickou analýzu /8/.

- musí mít požadovanou optickou citlivost
- hmota musí být i při větších tloušťkách průhledná, homogenní
- odolnost proti mechanickým namáháním
- lineární závislost mezi napětím a deformací
- snadná opracovatelnost
- materiál nesmí obsahovat napjatost vzniklou při výrobě a nesmí vzniknout napjatost vlivem stárnutí modelu.

23.7 Odleptávací metoda.

Předpokládáme-li, že ve vzorku existují zbytková pnutí lze také předpokládat, že po odleptání povrchové vrstvičky je vzorek nucen zaujímat nové rovnovážné polohy. Měřenou veličinou je pak velikost deformace způsobená tímto jevem /9/. Měřicí zařízení pracuje na principu mechanické metody, k odleptání se používá lázeň elektrolytu. Toto použité zařízení je poměrně přesné. Dává průměrné výsledky vnitřních pnutí v celé odleptané vrstvě, která je jen velmi nízká. Touto metodou se dá měřit okolo 1 μm pod povrchem. Průběh deformace lze sledovat v intervalech vzdálených od sebe jednotky μm /9/.

Výsledkem odleptávací metody je křivka závislosti četnosti pulsů na hloubce odleptané vrstvy. Křivka se rozdělí na stejně velké intervaly. Velikost výchylky se v těchto bodech spolu s hloubkou dosazuje do vzorce : /9/

$$\sigma_n = \frac{\Delta y_n}{\Delta H_n} \cdot K \cdot h_n^2 - \sum_{k=0}^{n-1} \sigma_k \frac{4 \Delta x_k}{h_k} \quad (2.13.)$$

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

Z něho vypočtené napětí se zobrazí do křivky v závislosti napětí na hloubce odleptané vrstvy /9/.

23.7.1 DAVIDĚNKOVA metoda určení napětí 1. druhu.

Napětí 1. druhu bylo určeno metodou N. N. Daviděnkova /2/.
Za tímto cílem byl zhotoven přístroj PON - 1 dovolující automatickou registraci deformace konzolově upevněného vzorku při nepřetržitém odstraňování vrchní vrstvičky kovu /4/.

Rozměry a zpracování vzorků:

70 x 6 x 5 /mm/

žhánáno 700° C (2 hodiny před ozářením)

povrch manganově fosfátovaný (pro zvýšení absorpčních vlastností povrchu).

Laser - impulsní $t_i = 5 \cdot 10^{-3}$ [s]

- kontinuální $W_p = 800$ [W]

Souvislé opracování povrchu se provádí nanesením serie drážek zpevnění s 50% překrytím /4/.

Rozložení zbytkových napětí dle vzorce Daviděnkova:

$$\sigma = \frac{E}{3l^2(1-\nu)} \cdot \frac{d^2}{\Delta h} \cdot \Delta f_k \cdot k$$

k ... koeficient

24. Fyzikálně mechanické vlastnosti materiálů zpevněných laserem.

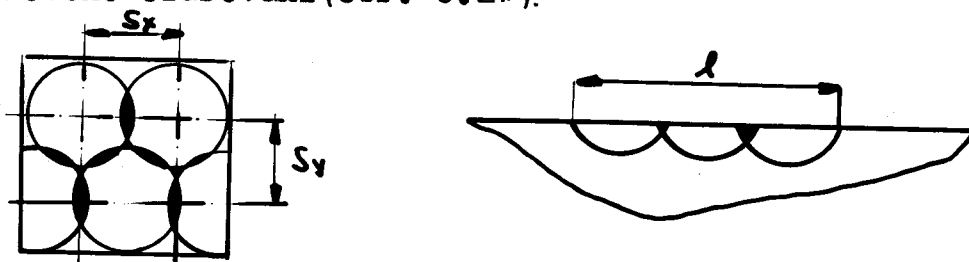
Struktura zpevněné vrstvy, charakterizovaná vysokou disperzností, anomálně vysokou tvrdostí, sníženou chemickou aktivitou má velký vliv na charakteristiky zpevněných materiálů jako je opotřebování, kluzné vlastnosti, mechanické vlastnosti, tepelné vlastnosti, hodnoty a charakter rozložení zbytkové napjatosti. /11/

24.1. Zbytková napjatost v povrchové vrstvě

Studiem hodnot a charakteru rozdělení zbytkových napětí 1. druhu v povrchové vrstvě materiálu ozářené laserem se provádělo na ocelích 45-(12050), Y8-(19 152), XBF -(19 712), X12M -(19 437), P6M5 (19 824), 3M 961 LL- (19 863) ve vyžíhaném a zakaleném stavu, na titanových slitinách BT-3-1, BT-9 /11/.

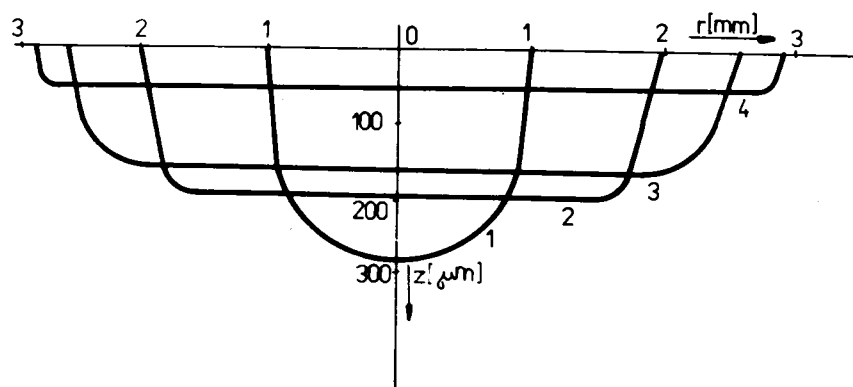
Ploché vzorky byly ozařovány laserem s impulsním režimem a laserem CO₂ v nepřetržitém režimu při různých hodnotách hustot výkonu vyzařování v rozsahu od $10^4 \div 2 \cdot 10^5 \text{ [W/cm}^2\text{]}$ a rychlostech $0,2 \div 4 \text{ [m/min]}$ /11/.

Měření bylo prováděno za takových podmínek, při kterých se obráběný materiál podroboval ohřevu bez natavení a s malým natavením povrchové vrstvy. Pro zvýšení schopnosti pohltivosti se vzorky zpracovávají lihovým roztokem pikrinové kyseliny, koloidním roztokem grafitu, speciálním pokrytím na základě ZnO. Při použití impulsního způsobu ozáření je použito schéma laserového ozařování (obr. č. 2.7).



obr. č. 2.7 Schéma laserového zpevnění pomocí impulsního způsobu ozáření ohniskovou sférickou optikou.

Pro použití nepřerušovaného záření je schéma, při kterém se drážky laserového působení skládají jedna na druhou s koeficientem překrytí $k=0,7$ [11]. Hodnoty a charakter rozdělení zbytkových napětí 1. druhu byly určeny mechanicky metodou DAVIDĚNKOVA a rentgenograficky. Na základě poznatků získaných z deformačních diagramů bylo stanoveno trvalé zbytkové napětí 1. druhu. Při působení laserového záření na povrchovou vrstvu oceli se tvoří tepelně ovlivněná oblast, profil, který závisí na hustotě výkonu vyzařování (obr. č.2.8)



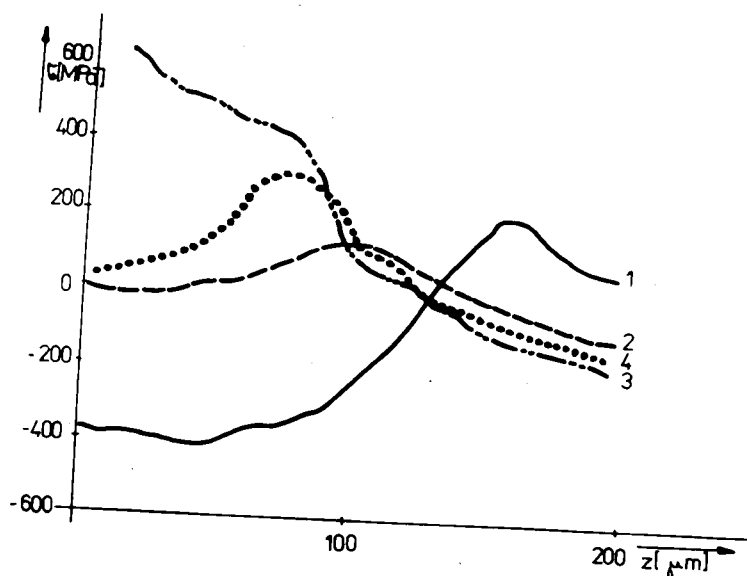
obr. č.2.8 Vliv hustoty výkonu laserového vyzařování na profil tepelně ovlivněné oblasti

W_p	1 ..	200	[kW/cm ²]
	2 ..	60	[kW/cm ²]
	3 ..	36	[kW/cm ²]
	4 ..	18	[kW/cm ²]

Souhrn tepelně ovlivněné oblasti tvoří zpevněnou vrstvu [11]. Na (obr. č.2.9) je rozdělení zbytkových napětí 1. druhu v povrchové vrstvě oceli 45 ozářené laserem při různých intenzitách. [11]

Při různých hustotách výkonu, kdy se materiál zahřívá na teploty nižší než je jeho teplota tavení, se v povrchové vrstvě rozvíjí dosti velké tahové napětí, přičemž oblast jejich rozložení je porovnatelná s hloubkou tepelně ovlivněné oblasti [11].

Sledujeme také existenci velkého gradientu zbytkových napětí na hranici zóny laserového působení a základního materiálu /11/.

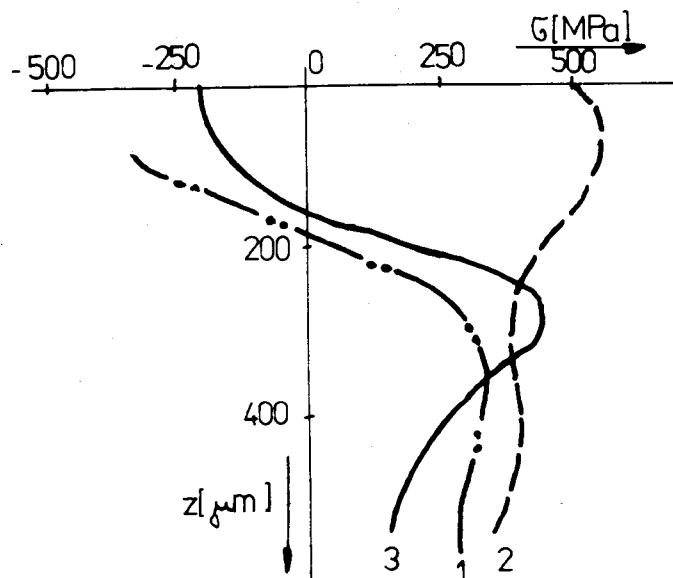


obr. č.2.9 Zbytková napětí u oceli 45 při nízkých hustotách výkonu

W_p	1	..	49	$[kW/cm^2]$
	2	..	37	$[kW/cm^2]$
	3	..	29	$[kW/cm^2]$
	4	..	23	$[kW/cm^2]$

Zvýšení hustoty výkonu laserového vyzařování doprovází na povrchu tenké vrstvy natavení materiálu, vyskytuje se snížení tahových napětí a jejich vyrovnávání v hloubce /11/. Při dalším zvyšování hustoty výkonu dochází k intenzivnímu natavení materiálu, ostatní napětí v povrchové vrstvě zpevněného materiálu mění znaménka (tlak, tah) a v hloubce tepelně ovlivněné oblasti dochází k růstu tahových napětí /11/.

Výzkum napětí 1. druhu u ocelí značek 98A, 98F, X12M ukázal, že na velikost a charakter rozdělení má také velký vliv hustota výkonu laserového vyzařování. Bylo zjištěno, že při hustotě výkonu $2.10 [W/cm^2]$ se objevují v povrchové vrstvě oceli 98F tlakové napětí, asi o velikosti $250 [MPa]$ (obr. č.2.10, křivka 1)

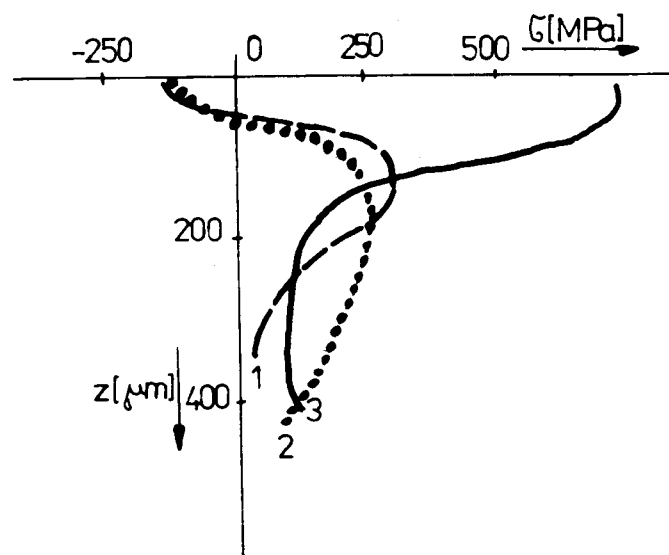


obr. č.2.10 Zbytkové napětí v ocelích XBr(1) VSA(2) X12M(3)
při různých hustotách výkonu

W_p	1	..	200	$[kW/cm^2]$
	2	..	60	$[kW/cm^2]$
	3	..	20	$[kW/cm^2]$

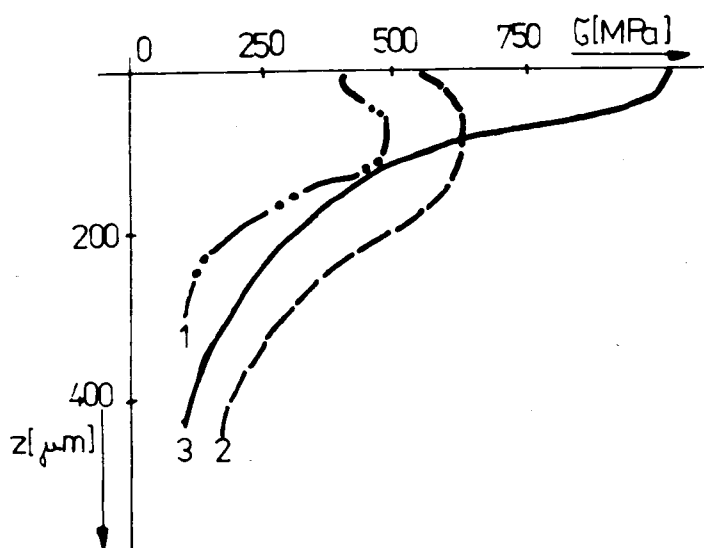
Podobný charakter rozdělení zbytkových napětí při stejné velikosti hustoty výkonu má ocel VSA (obr. č.2.10, křivka 2) a ocel 45 (obr. č.2.9, křivka 1). U těchto ocelí dochází k číselnému snížení zbytkového napětí /11/. U oceli X12M dochází k několikanásobnému snížení proti ostatním uvažovaným ocelím za stejných podmínek ohřevu. V povrchové vrstvě této oceli bylo zjištěno tahové napětí takové velikosti, jako tlakové napětí pro ocel XBr, které více než 2x převyšuje napětí u oceli VSA (obr. č.2.10, křivka 3) /11/. Z (obr. č.2.9 a obr. č.2.10) vidíme, že zbytkové napětí je rozloženo do hloubky, která je porovnatelná s hloubkou tepelně ovlivněné oblasti /11/.

Přitom u všech ocelí v okrajové části zakalené zóny a v přechodové vrstvě jsou také tahová napětí. Se snižováním hustoty výkonu záření do $6 \cdot 10^4 [W/cm^2]$ v povrchové vrstvě oceli XBr a VSA pozorujeme postupné snižování tlakových zbytkových napětí, jak co do hodnoty, tak i do hloubky rozšíření /11/. U oceli X12M přitom dochází k růstu tahových napětí u povrchu a k snížení hloubky jejich rozšíření (obr. č.2.11) /11/.



obr. č.2.11 Zbytkové napětí u oceli X12M

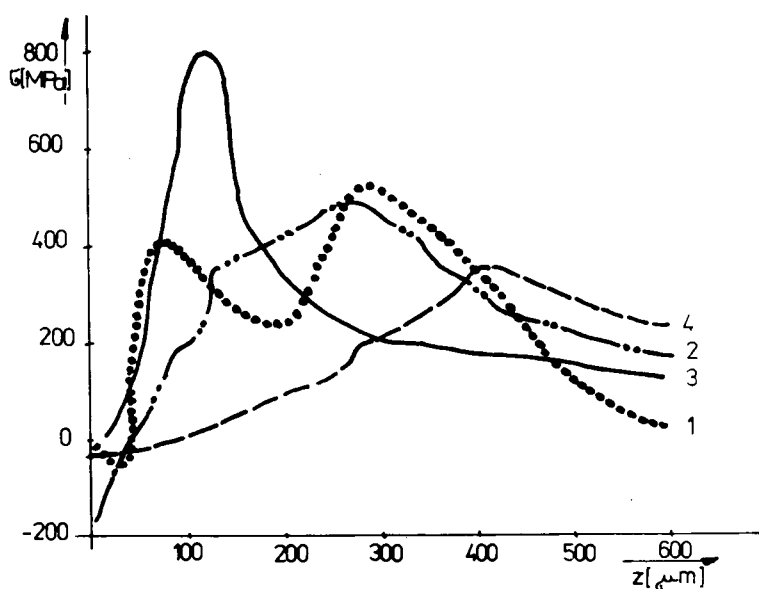
Poslední, v souvislosti se snižováním hloubky tepelně ovlivněné oblasti je (obr. č.2.8)/11/. Při určitých hustotách výkonu do $2 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$ se u všech ocelí v povrchové vrstvě formuje tahové makronapětí, u ocelí ~~xar~~ a ~~30A~~ se zvětšuje a u oceli X12M se zmenšuje směrem k okraji tepelně ovlivněné oblasti (obr. č.2.12)/11/.



obr. č.2.12

V celém rozsahu sledovaných hustot výkonu laserového vyzařování byla zjištěna zákonitost /1/. Se snižováním intenzity ohřevu pozorujeme snížení tlakových napětí s postupnou změnou jejich znaménka, nebo růst tahových zbytkových napětí. Je charakteristické, že se změnou hustoty výkonu laserového vyzařování se průběh křivek relativně nemění (obr. č.210 obr. č.211 obr. č.212 každá z nich patří jinému materiálu) /1/.

Ocel X 12M na rozdíl od ocelí X 15, X 18 A, 45 při všech hustotách výkonu měla tahové napětí, lišící se co do hodnoty i hloubky rozložení /1/. Tento jev je v závislosti s tím, že v tenké povrchové vrstvě tepelně ovlivněné oblasti oceli X 12M, jak ukázaly výsledky metalografické analýzy, se zvyšuje množství zbytkového austenitu /1/.



obr. č.213 Zbytkové napětí v zakalené 1,2 a vyžíhané 3,4 oceli y8A

W_p : 1,4 .. 55 $[kW/cm^2]$
 2,3 .. 170 $[kW/cm^2]$

Na (obr. č. 213) jsou ukázány změny v makronapjatosti povrchové vrstvy žíhané a kalené oceli 58A podrobené laserovému ozařování /11/. Charakter rozdělení zbytkových napětí u oceli po laserovém ozařování se v podstatě neliší od rozdělení v povrchové vrstvě oceli 45, ale má některé zvláštnosti v dalších vrstvách. V hloubce zpevněné vrstvy tahové napětí u oceli 58A několikrát převyšuje velikost makronapjatost u oceli 45. Je zcela zákonité, že čím je kalicí napětí vyšší, tím vyšší je uchovávání uhlíku v oceli /11/. Na křivce napětí vzniklých v zakalené oceli po obrábění paprskem laseru, v hloubce odpovídající přibližně místu existence zóny popouštění dříve zakaleného základního materiálu pozorujeme ostré maxima (obr. č. 213 křivky 1,2) /11/.

Takové jevy jsou podmíněny tím, že při laserovém ozařování zakalených ocelí mezi bílou vrstvou a strukturou základního zakalené vrstvy je rozložena zóna rychlostního popouštění mající strukturu TROOTSIT. Strukturní přeměny tahového charakteru jsou svázány se zmenšováním objemu /11/. Zóna popouštění má dosti malý rozměr, ale napětí jsou maximálně a pokud v těchto místech je možná relaxace napětí 1. druhu, pak se objevují trhliny.

Takové podstatné změny stavu napětí materiálu v podmínkách laserového ozařování je možno objasnit v jednotlivých stádiích jeho ohřevu a ochlazování /11/. Při ozařování povrchu materiálu postupně impulsního a lokálního charakteru ohřevu už v počátcích ohřevu dochází k intenzivnímu objemovému zvětšení kovu v zóně laserového působení, přičemž intenzita i hodnota tohoto zvětšení se stanoví rychlostí a teplotou ohřevu materiálu /11/. Zvětšení objemu překáží chladné vrstvy obklopující oblast ohřevu v důsledku čehož se v tepelně ovlivněné oblasti zvětšuje tlakové napětí, jehož velikost je tím vyšší, čím je vyšší teplota ohřevu kovu. Růst tlakových napětí pokračuje do té doby, dokud se nahříváný materiál nestane plastickým a dočasně vzniklé makronapětí se částečně nebo úplně odstraní.

V počátečním momentu po laserovém impulsu nejintenzivněji chladne povrchová vrstva. Ve vrstvách ležících níže pozorujeme růst teploty v závislosti na přívodu tepla z vrchních vrstev.

Ochlazováním povrchu dochází ke zmenšení zahřátého objemu, ale k růstu tlakových napětí nedochází vzhledem k vysoké plastičnosti, která je v hloubce tepelně ovlivněné oblasti /11/ .

S postupem času se rychlosti ochlazování materiálu v objemu tepelně ovlivněné oblasti vyrovnávají a začínají se intenzivně ochlazovat vrstvy hraničící s chladným základním materiálem /11/.

Tuhnoucí kov v tepelně ovlivněné oblasti ztrácí svou tlumící schopnost a začíná intenzivní rozvoj tahových napětí ve směru k povrchu a výsledkem je snížení chladnoucích objemů. Přitom v tenkých povrchových vrstvách hodnota tahových napětí může být vyšší než hranice pevnosti materiálu, následkem čehož se na povrchu ozářeném paprskem laseru může vytvářet síť mikrotrhlin /11/. V tomto případě má tepelné napětí určený význam ve formulaci napěťového stavu zpevněné vrstvy /11/.

V podmínkách dalšího ochlazování v materiálu dochází ke strukturním přeměnám, které jsou provázeny změnou měrného objemu. V jedné etapě u oceli dochází k martenzitické přeměně vedoucí k zvětšování objemu, dochází k zvýšení strukturních napětí /11/.

Zvětšující se objem materiálu prodávající strukturní přeměny způsobuje rozvoj tlakových napětí, které snižují dříve vzniklé tahové tepelné napětí. Taková podoba napěťového stavu materiálu je určena tepelnými zbytkovými i čistě strukturními napětími, majícími opačná znaménka /11/. V závislosti na tom, který typ napětí má větší vliv, takový charakter bude mít celkové rozdělení zbytkových napětí v materiálu.

Procesy v materiálu se zaznamenávají a také se zaznamenává poměr sestavených napětí způsobených hustotou výkonu laserového záření v zóně obrábění. Z (obr. č.29) je vidět, že se zvyšováním hustoty výkonu tj. když se zvyšuje objem roztaveného kovu, v povrchové vrstvě se tvoří a rozšiřuje do velké hloubky, pak tlakové napětí přechází nedaleko hranice se základním kovem v tahové. Podobný charakter rozdělení zbytkových napětí pozorujeme při plastické reformaci povrchových vrstev, například při vibračním omílání nebo při tepelně mechanickém zpevnění /11/.

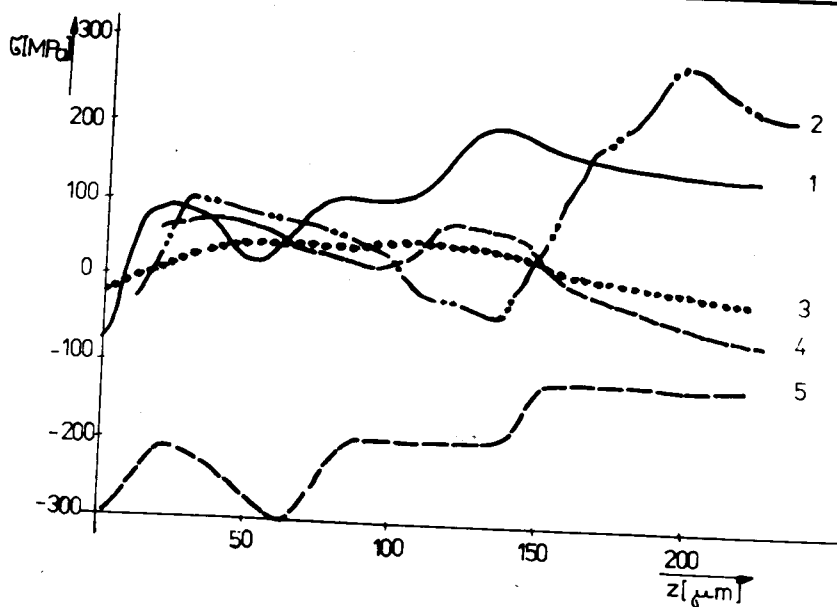
I při laserovém obrábění podstatnou roli při formování zbytkových napětí s takovým rozdělením hrají tepelně plastické deformace vznikající v závislosti na nerovnoměrnosti tepelného pole v tepelně ovlivněné oblasti a velkých rychlostí ochlazení materiálu /11/.

Zkoumáním rentgenové struktury oceli $3M\ 961\ 11$ ozářené v impulsním a nepřerušovaném režimu se ukázalo, že změny struktury při laserovém obrábění jsou v mnohém analogické změnám, ke kterým dochází při kalení nebo při plastické deformaci /11/. Působení laserového paprsku má vliv na značné zmenšení rozměru bloků, růst mikrostažením krystalické mřížky a zvětšení hustoty dislokací. V následující tabulce je uvedeno rentgenografické zkoumání oceli $3M\ 961\ 11$ obráběné nepřerušovaným laserovým zářením /11/.

druh obrábění	rozměr bloku $\times 10^5$ [cm]	mikrostaže- niny $\Delta a/a \cdot 10^{-3}$	hustota dislokací $p \cdot 10^{10}$ [cm $^{-2}$]
výchozí stav /dodávka/	10	0	0,3
plastická deformace	1,3	0	1,5
tepelné kalení 900° C, bez výdrže, chlaze- ní ve vodě	1,6	1,7	1,5
laserové působení $W_p = 1,2,5_2 \times 10^4$ [W/cm 2] $v = 0,2 \div 0,5$ [m/min]	1 ÷ 1,3	1,3 ÷ 1,7	1,8 ÷ 2,7

Působení laserového záření v povrchové vrstvě oceli vznikají napětí tlakové, které při teplotě 500° C mění znaménko a v procesu popouštění při 660° [C] napětí mizí /11/. Kladný význam napětí při působení nepřerušovaného záření je v souvislosti s chemickým nasycením povrchu oceli kysličníkem zinku, který využijeme ke krytí pro zvýšení kvality pohlcovací schopnosti. Výsledky měření jsou v následující tabulce a na (obr. č.2.14) /11/.

druh obrábění /stav povrchu/	úhel skluzu stupně	meziplošná vzdálenost A_0	období mřížky	napjatost 1. řádu [MPa]
výchozí stav dodávky	$72^{\circ}25'$	1,01615	2,845220	0
impulsní oza- řování $W=450 \text{ W/mm}^2$ $p=10^{-3}$	$72^{\circ}49'$	1,01531	2,842868	-630
impulsní oza- řování + po- pouštění při 200° C při 500° C při 600° C	$72^{\circ}49'$ $72^{\circ}37'$ $72^{\circ}25'$	1,01531 1,01641 1,01615	2,842868 2,845948 2,845220	-630 210 350
nepřerušované ozařování $W=250 \text{ [W/mm}^2]$ $v_p=0,5 \text{ [m/min]}$	$72^{\circ}19'$	1,01672	2,846816	350
nepřerušované ozařování + popouštění při 500° C při 600° C	$72^{\circ}22'$ $72^{\circ}25'$	1,01638 1,01615	2,845864 2,845220	140 0



obr. č.214 Zbytkové napětí v oceli **3M 961M** ozářené nepřerušo-
vaným laserovým zářením

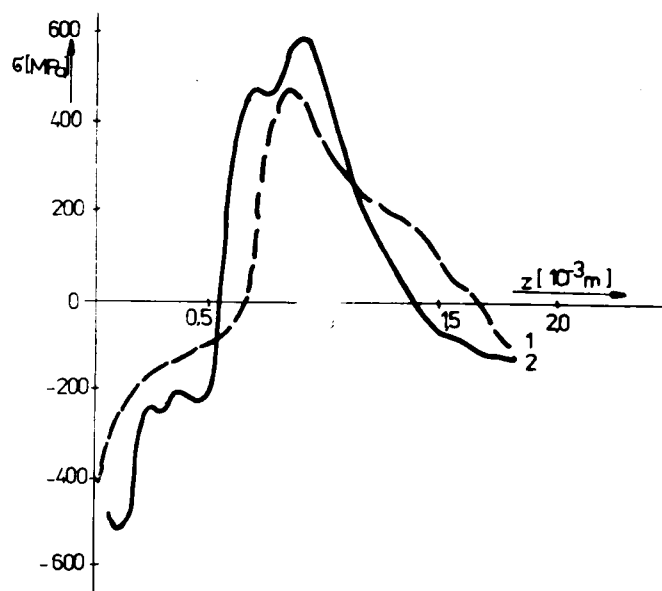
$W_p 1,2 = 10^4 \text{ [W/cm}^2]$ $v = 2 \text{ [m/min]}$ $k = 0,8$

24.11. Vliv vzájemné interakce laser - materiál, na rozvržení
zbytkových pnutí vzniklých transformací pevná látka - pevná
látka u ocelí /6/.

Materiál - oceli 35 NC D16 (15 130)

35 CD 4 (16 431)

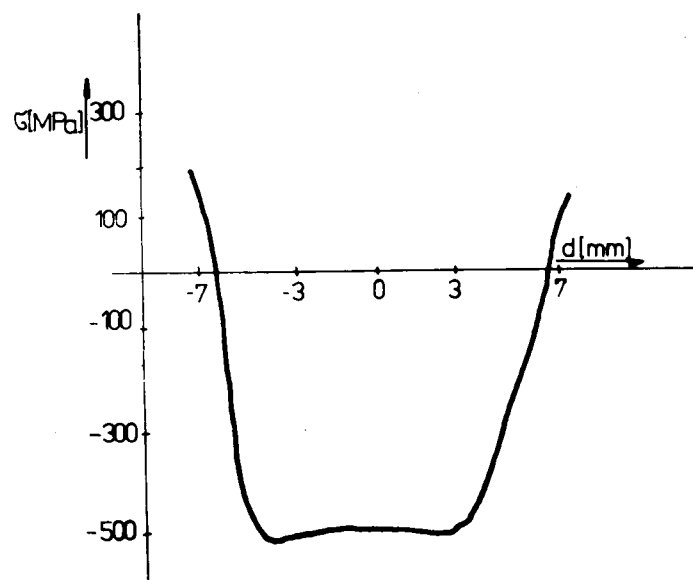
ozařování pomocí laseru CO₂ - $\angle W_p = 5 \text{ kW}$



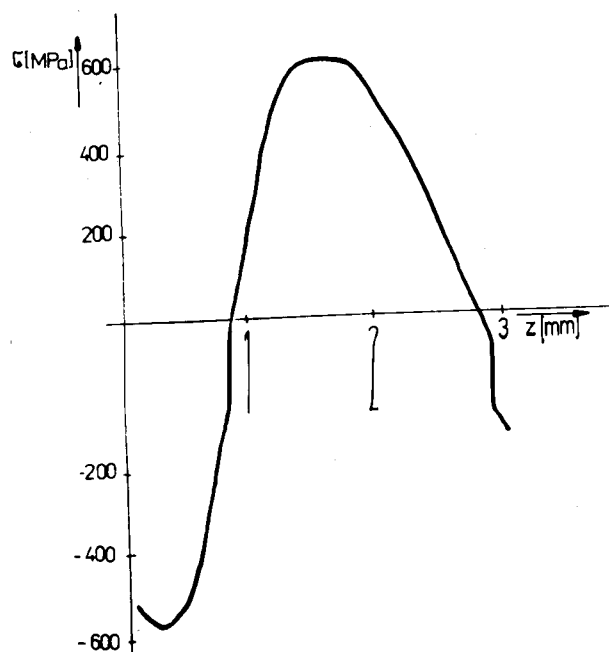
obr. č.2.15 Vliv druhu oceli na rozložení zbytkových pnutí

1 ... 35 CD 4

2 ... 35 NC D16



obr. č.2.16 Rozdělení zbytkového pnutí na povrchu /6/.



obr. č.2.17 Rozdělení zbytkových pnutí v závislosti na hloubce /1/.

24.2. Zbytková napjatost v povrchové vrstvě - litina

Impulsní zpracování feritické litiny KČ 35 - 10 v režimu bez natavení vede ke vzniku tlakových napětí, které se zmenšují jen v hloubce 0,3 [mm], což značně převyšuje tloušťku vrstvy se změněnou strukturou (hloubka zakalení 0,12 [mm], hloubka natavení 0,02 [mm]) /4/.

Při natavení povrchu zpravidla vznikají trhliny pokalení, což svědčí o relaxaci značných tahových napětí v tenké povrchové vrstvě /4/.

Úhrnem chybí v natavených vrstvách vnitřní napětí, což je na grafu vidět přítomností nulového úseku, který končí v hloubce odpovídající hloubce natavené vrstvy.

V případě využití pro laserové kalení kontinuálního ozáření vznikají na povrchu KČ 35 - 10 tahná napětí. Jejich velikost je větší než po zpracování bez natavení, ale rychle se snižuje do hloubky /4/. Trhliny po kalení se neobjevují, protože maximální velikost tahových napětí ($\sigma = 120$ [MPa]) nepřevyšuje mez pevnosti litiny ($\sigma_n = 372$ [MPa]).

Zbývá odpovědět, jestli po laserovém zpracování kontinuálním ozářením napětí také mizí v hloubkách, než je porovnatelná hloubka tepelného zpracování /4/.

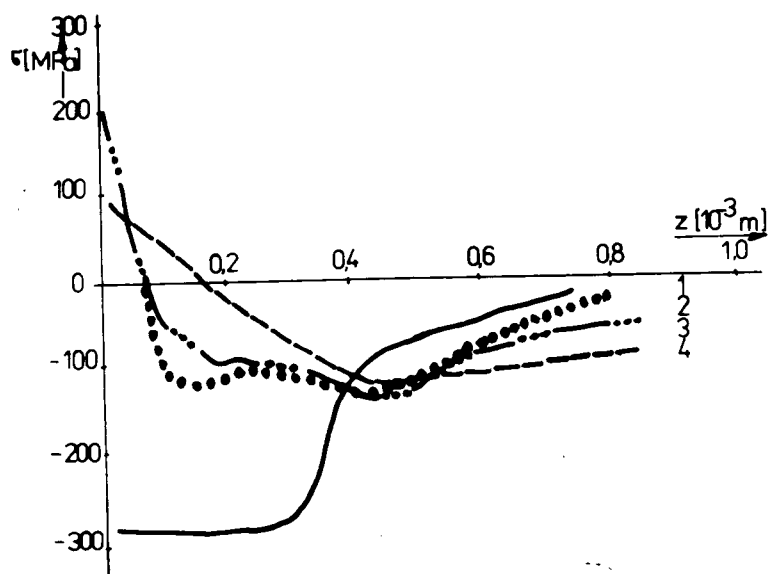
Pro režim s natavením platí, že hloubka, kde mění napětí své znaménko souhlasí s hranicí mezi natavenou zónou a vrstvou tepelného vlivu.

Analogický charakter má rozložení napětí v perlitické litině, avšak extrémní velikosti napětí jsou daleko větší než ve feritické litině /4/.

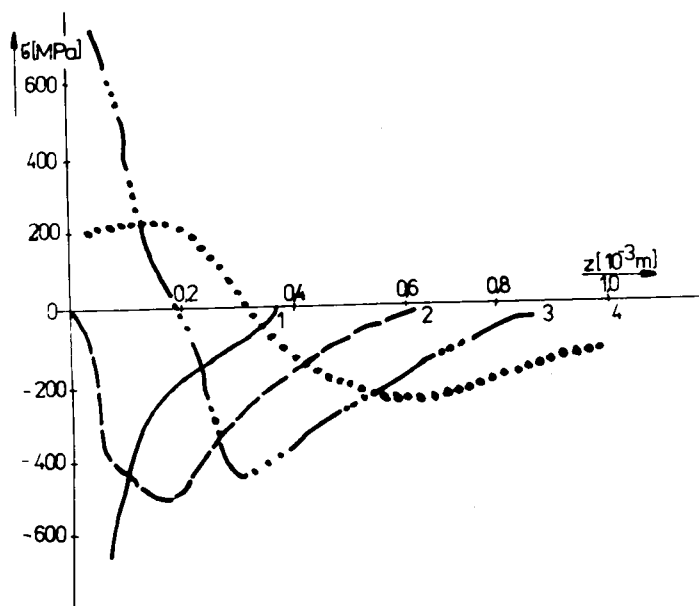
Impulsním ozářením vznikají v perlitické litině na povrchu tlaková napětí dosahující velmi vysokých hodnot (~ 1 [MPa]), ale do hloubky se rychle snižují /4/.

Při kontinuálním záření (KČ) bez natavení povrchu se velikost tahových napětí blíží, někdy i převyšuje mez pevnosti perlitické litiny. To vede ke vzniku nevýznamného množství trhlin po kalení, které jsou příčinou odloupání /4/, pittingu v procesu tření při namáhání součástí. Proto je lepší pro perlitické litiny používat měkčí režimy laserového kalení, což umožňuje snížit hodnoty tahových napětí při práci bez natavení povrchu /4/.

Z tohoto pohledu jsou výhodné podmínky tvořící zpevnění s neznatelným natavením povrchu. Takový režim nevede ke vzniku vysokých tažných napětí 1. druhu a trhliny po ozáření nevznikají /4/.



obr. 8.2.18 Rozdělení zbytkových pnutí v závislosti na hloubce od povrchu - feritická litina KČ 35 - 10



obr. č.2.19 Rozdělení zbytkových pnutí v závislosti na hloubce od povrchu - perlitická litina KČ

režim laseru: — impulsní ozáření bez natavení
 ---- impulsní ozáření s natavením
 -.-.- kontinuální režim bez natavení
 kontinuální režim s natavením

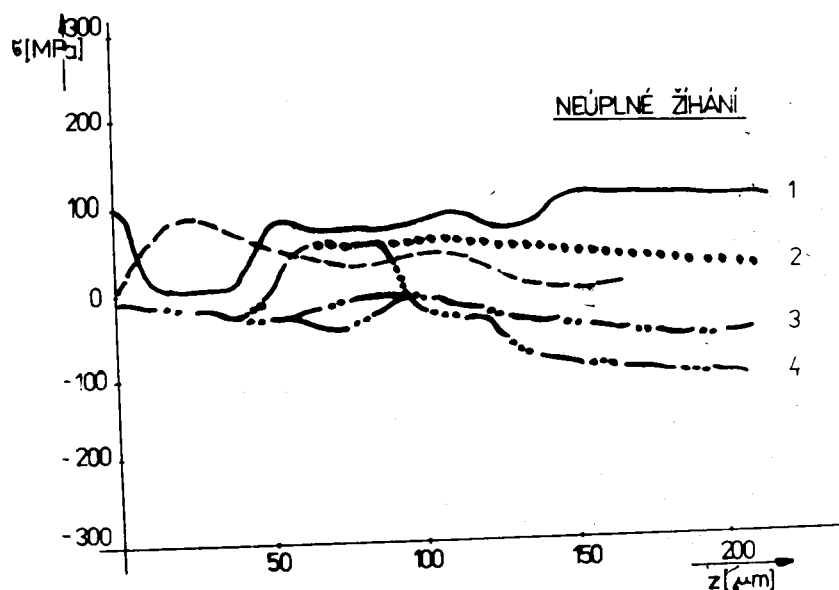
24.3 Zbytková napjatost povrchové vrstvy - titanové slitiny.

Na rentgenogramech titanových slitin podrobených impulsnímu a nepřetržitému ozařování laserem pozorujeme rozšíření difrakčních čar, což svědčí o drobení krystalů a zvětšování mikroporušení, přičemž maximální efekt je při impulsním ozařování [11].

Při ozařování v prostředí argonu se fázové změny projevují tak, že základní materiál a oblast tepelného ovlivnění zachovává α a β fázi Ti. Označuje se snížení zachování metastabilní β - fáze v oblasti ozáření (7 ÷ 12%, v základním materiálu 20%), při zakalení v závislosti na teplotě naproti tomu dochází k jejímu zpevnění nebo vzniku [11].

Při impulsním ozáření na vzduchu ($W_p = 300 \text{ [W/mm}^2\text{]}$, $\tau = 10^{-3} \text{ [s]}$) důsledkem vzájemného působení s dusíkem se objevuje nová fáze TiN, která má velkou texturu [11]. V povrchové vrstvě titanových slitin při impulsním ozařování laserem vznikají napětí tlaková o velikostech do 600 [MPa].

Rozložení ostatních napětí do hloubky povrchové vrstvy po nepřerušovaném ozáření laserem je ukázáno na (obr. č.220).



obr. č.220 Zbytkové napětí v titanových slitinách

1,2 ... BT - 3 - 1

3,4,5 . BT - 9

obráběných nepřerušovaným laserovým ozařováním

$W_p : 1,2 \dots 10^4 \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad v = 0,8 \text{ [m/min]} \quad k = 0,9$

$3,4,5 \dots 0,64 \cdot 10^4 \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad v = 0,5 \text{ [m/min]} \quad k = 0,8$

V závislosti na režimu ozařování se hodnota zbytkových pnutí v povrchové vrstvě silně 40 μm mění v rozsahu od 30 ÷ 50 [MPa] .

Následující neúplné žhání titanových slitin (570°C) po dobu 2 hodin, ochlazení na vzduchu) způsobí zrušení napětí //.

Uvedené údaje svědčí o tom, že při navrhování technologických procesů laserového zpevnění součástí strojů a nástrojů k řezání kovů je nutno přihlédnout k zbytkovým napětím, jejich znaménku a velikosti. Kromě toho existují možnosti pro řízení charakteru napětí v vrstvě materiálu podrobenému laserovému záření //.

24.4. Vliv laserového záření na mechanické charakteristiky materiálu.

Laserové záření má vliv na mechanické charakteristiky nástrojových ocelí (na mez pevnosti ζ_r , podmíněnou mez kluzu ζ_k a rázovou houževnatost) // . Ukázalo se, že se zvýšením hustoty výkonu záření pozorujeme snížení meze pevnosti a rázové houževnatosti.

Laserové zpevnění prakticky nemá vliv na změnu smluvní meze kluzu oceli. Rázová houževnatost zakalené oceli se snižuje v důsledku laserového obrábění z 1,32 do 0,5 [MJ/m²] /11/. Při hustotách výkonu $4 \cdot 10^4$ [W/cm²] se mez pevnosti oceli po laserovém ozáření prakticky neliší od meze pevnosti oceli ve výchozím stavu. Přitom rázová houževnatost má maximální význam, přičemž její velikost je menší ve srovnání s výchozí. Snížení pevnosti oceli zpevněné laserovým ozařováním při zvýšených hustotách výkonu je svázáno se zvýšením drsnosti povrchu způsobeným natavením /11/.

3. Prováděcí část.

Účelem dále uvedených experimentů je ověření možností způsobů měření zbytkových napětí v povrchové vrstvě materiálu, podrobeného ozařování laserovým paprskem, odleptávací metodou a jejich porovnání s výsledky měření zbytkových napětí jinými metodami, které byly prováděny ve světě.

3.1 Návrh zařízení.

Měření na zařízení k měření zbytkových napětí bylo prováděno ve spolupráci s Katedrou obrábění a montáže v rámci diplomové práce studenta Hynka Pavlů.

Vzorek zatížený vnitřním pnutím se po odleptání vrstvičky povrchu zdeformuje. Tento jev je způsoben tím, že vzorek je nucen zaujímat nové rovnovážné polohy, protože na něj přestaly působit síly vnitřního pnutí v odebrané vrstvičce /9/. Velikost této deformace ΔY_c vyvolaná odebráním povrchové vrstvičky o tloušťce ΔH je výchozí hodnotou pro výpočet střední hodnoty zbytkového pnutí ve vrstvičce. Deformaci lze charakterizovat vychýlením neupnutého konce vzorku s obdélníkovým průřezem (3.2) /10/.

Měření spočívá v kontinuálním snímání deformace vzorku při elektrolytickém odleptávání materiálu ze sledované vrstvy.

Elektrolytem je roztok: 800 ml CH_3COOH

100 ml HCl

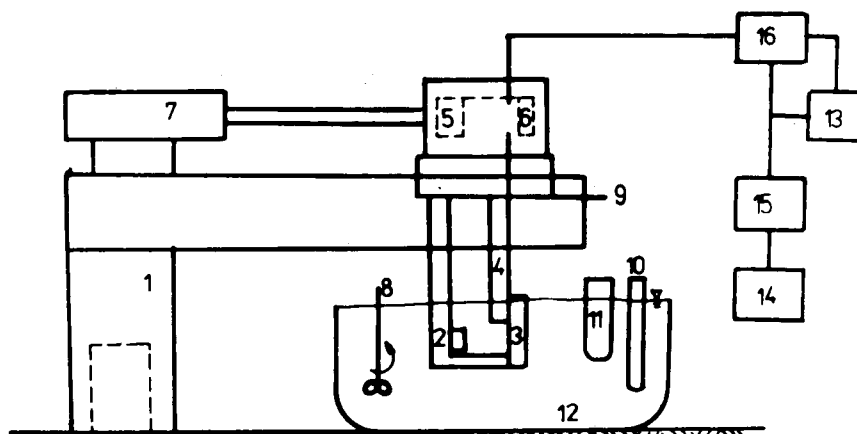
50 ml HF

50 ml destilovaná voda

Po celou dobu měření musí být teplota udržována na teplotě asi 20°C / Její pokles, nebo stoupnutí nad 40°C by mělo za následek explozi. Nesmí dojít k roztavení vosků chránících neleptané plochy.

Při správně nastavené proudové hustotě $0,4 \div 0,9 \text{ [A/cm}^2\text{]}$ dochází k elektrolytickému odleptávání konstantní rychlostí, v opačném případě dochází k elektrolýze vody, což není žádoucí. K ochraně neleptaných ploch a částí zařízení ponořených v elektrolytu se používá vosků (lyžařský vosk na mokry sníh a včelího vosku v poměru 1:1, lékařského parafínu).

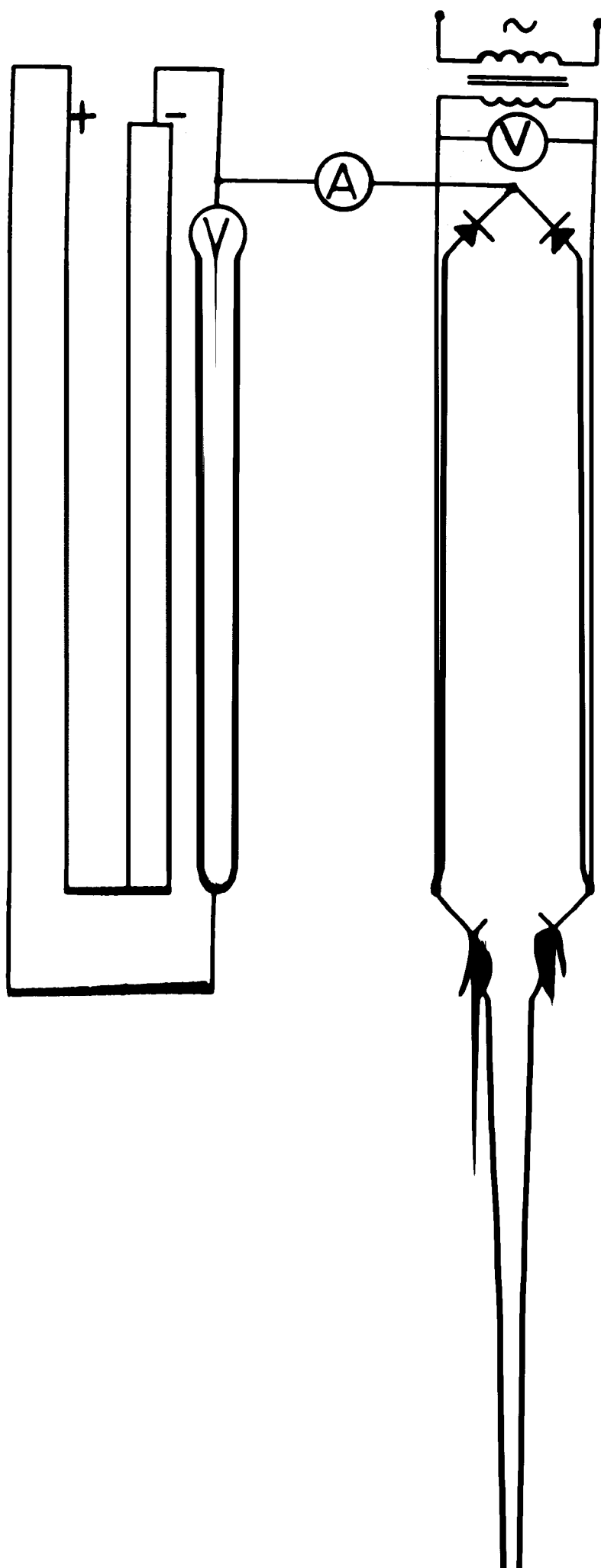
Zařízení: bylo vyvinuto na Katedře obrábění a montáže /H. Pavlů/.



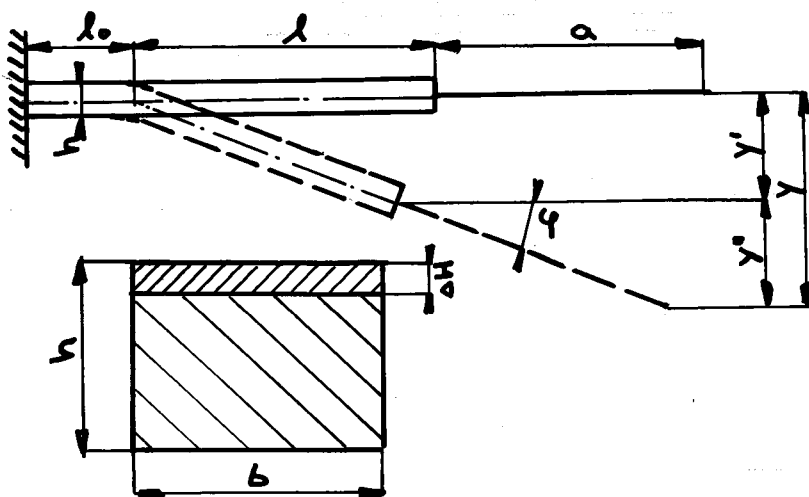
obr. č.3.1 Zařízení k elektrolytickému odleptávání.

- | | |
|------------------------|------------------------------|
| 1 ... stojan | 9 ... pohybový šroub |
| 2 ... upínací třmen | 10 ... teploměr |
| 3 ... zkušební vzorek | 11 ... zdroj tepla |
| 4 ... měřicí třmen | 12 ... nádoba s elektrolytem |
| 5 ... indukční měřidlo | 13 ... zapisovač |
| 6 ... napájecí zdroj | 14 ... stejnosměrný zdroj |
| 7 ... úchylkoměr | 15 ... seřizování citlivosti |
| 8 ... míchadlo | 16 ... miliampérmetr |

Práce přístroje: Deformace zkušebního vzorku, vzniklá odleptáním vrstvičky, se projeví posunutím volného konce třmene 4. Tím se zmenšuje vzduchová mezera cívky a rozváží se můstek, do něhož jsou cívky zapojeny a na miliampérmetru se objeví výchylka úměrná posunu třmene z počáteční polohy.



3.1.1 Výpočet zbytkových pnutí u rovných vzorků /10/.



Předpoklad, který je základem výpočtu: ve vrstvičce tloušťky ΔH je zbytkové pnutí $\sigma = \text{konst.}$ Odebrání vrstvičky ΔH způsobí zbytkové pnutí stejnou deformaci, jako by na ni působila vnější síla $F = \Delta H \cdot b \cdot \sigma$

průhyb vzorků:

$$y = \frac{1}{E \cdot I} \int_0^l M_x \cdot dx$$

pro nás platí:

$$\Delta y = y' + y''$$

$$\Delta y' = \frac{1}{E \cdot I} \int_0^l M_x \cdot dx = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \frac{M \cdot l^2}{2}$$

$$\Delta y'' = a \cdot \Delta \varphi = a \cdot \frac{1}{E \cdot I} \int_0^l M \cdot dx = \frac{1}{E \cdot I} \cdot M \cdot l \cdot a$$

$$M = \sigma \cdot b \cdot \Delta H \cdot \frac{h}{2}$$

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

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

$$\sigma = \frac{\Delta y}{\Delta H} \cdot K \cdot h^2 \quad (30) \quad \text{kde: } K = \frac{E}{3 \cdot l (1 + 2a)}$$

Odebereme-li další vrstvičku ΔH_2 , dostaneme ve vzorci (30) napětí, které neodpovídá a proto ho musíme upravit. Odleptání první vrstvy způsobilo namáhání celého průřezu.

tah silou:

moment na ohyb:

$$\frac{h - \Delta H_1}{2}$$

tah silou:

$$F = G_1 \cdot b \cdot \Delta H_1$$

moment na ohyb:

$$M = G_1 \cdot b \cdot \Delta H_1 \cdot \frac{h - \Delta H_1}{2}$$

ve vrstvě ΔH_2 vznikne odstraněním předchozí vrstvy napětí:

$$G_{2t} = \frac{F}{S} = \frac{G_1 \cdot b \cdot \Delta H_1}{b \cdot (h - H_1)} = \frac{G_1 \cdot \Delta H_1}{h - H_1}$$

$$G_{20} = \frac{M}{W_0} = \frac{G_1 \cdot b \cdot \Delta H_1 (h - \Delta H_1)}{2 \cdot \frac{1}{6} \cdot b (h - \Delta H_1)^2} = \frac{G_1 \cdot \Delta H_1}{\frac{1}{3} (h - \Delta H_1)}$$

$$G_{2t} + G_{20} = \frac{G_1 \cdot 4 \cdot \Delta H_1}{h - \Delta H_1} \quad (3.1)$$

úprava (3.1) se sčítá pro jednotlivé vrstvičky, takže tvar základní rovnice (3.2)

$$\sigma_n = \frac{\Delta y_n}{\Delta H_n} \cdot K \cdot h_n^2 - \sum_{k=1}^{n-1} G_k \cdot \frac{4 \Delta H_k}{h_k} \quad (3.2)$$

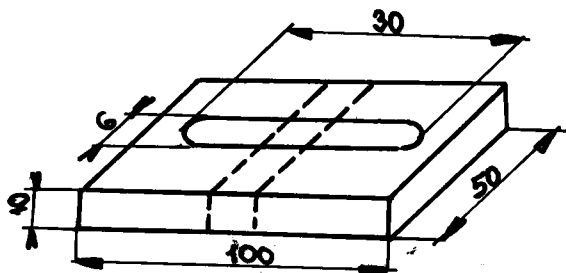
kde:

$$h_n = h - \sum_1^n \Delta H$$

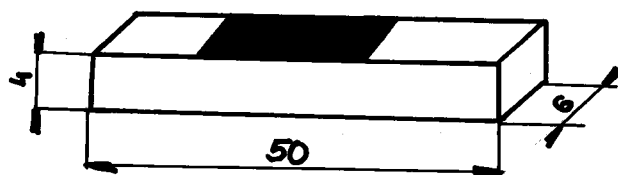
3.2. Návrh vzorků.

Materiál použitý při experimentu je 12 040

- hlavní rozměry: - 100 x 50 x 10 /mm/, povrch vzorku začerněn
barvou - černá, matná Ol 99
- materiál ozářen kontinuálním laserovým zářením, laser CO₂, $W_p = 2$ /kW/ ve SVÚM Praha
 - rychlosti ozáření: $v_1 = 1600$ /mm/min/
 $v_2 = 2400$ /mm/min/
 $v_3 = 2600$ /mm/min/
 - rozměr stopy 6 x 30 /mm/



Z ozářeného materiálu byly nařezány vzorky vhodné pro odleptávání. Příprava vzorku byla provedena na rozbrušovací stroji značky METASECAR /NDR/ chlazeným vodou, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění laserované části vzorku a tím ke změnám napjatosti uvnitř vzorku.
rozměr vzorku k odleptávání: 50 x 6 x 4



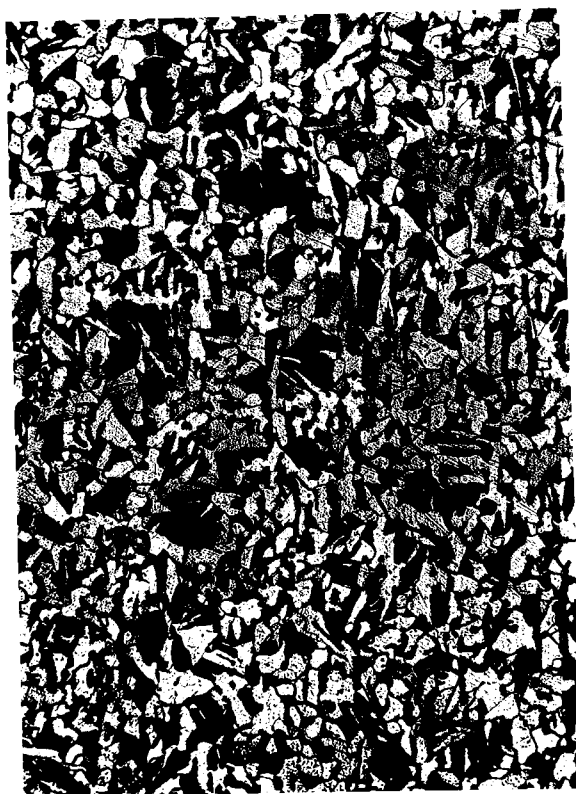
3.3 Rozbor struktur.

Ve své práci chci poukázat na změny struktury materiálu 12 040 po ozáření laserem při různých rychlostech ozařování. Fotografie výbrusů materiálů byly vytvořeny ve spolupráci se studentem Antonínem Kotkem v rámci jeho diplomové práce. laser CO_2 , $W_p = 2 \text{ [kW]}$

rychlost ozáření: $v_1 = 1600 \text{ [mm/min]}$

$v_2 = 2400 \text{ [mm/min]}$

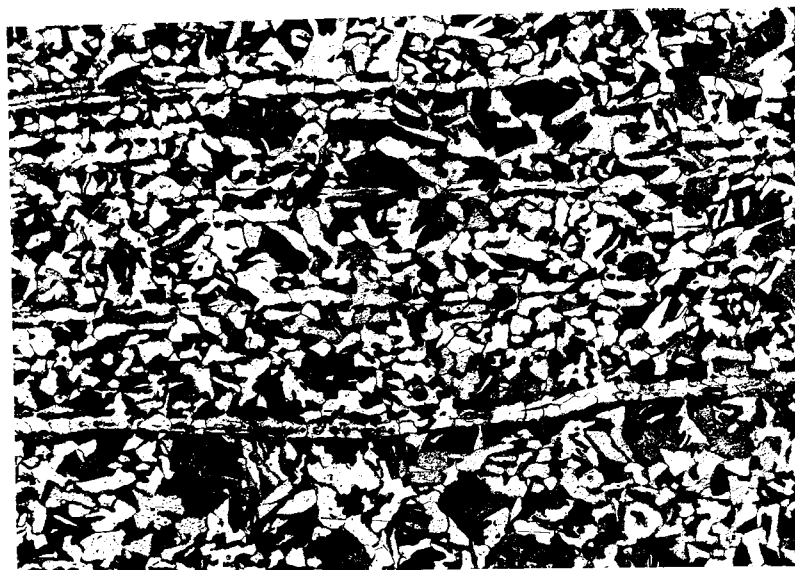
$v_3 = 2600 \text{ [mm/min]}$



200x 12 040 Nital 3%

obr. č.33 Struktura základního materiálu - příčná

Na (obrázku č.33) je mikrostruktura zkoumané oceli ČSN 12 040. Jedná se o feriticko-perlitickou ocel, středně hrubozrnnou, homogenní. V rozsahu pozorovaných výbrusů nebyly zjištěny žádné povrchové a ani vnitřní vady materiálu. Povrch nebyl oduhličen.



200x

12 040

Nital 3%

obr. č.34 Struktura základního materiálu - podélná.

Na (obrázku č.34) je struktura získaná z podélného výbrusu. Je zde patrná podélná textura vzniklá tvářením polotovarů. Řadkovitost byla výrazná v celém rozsahu pozorovaného výbrusu. Množství zjištěných nekovových vměstků odpovídá jakosti ušlechtilé oceli.



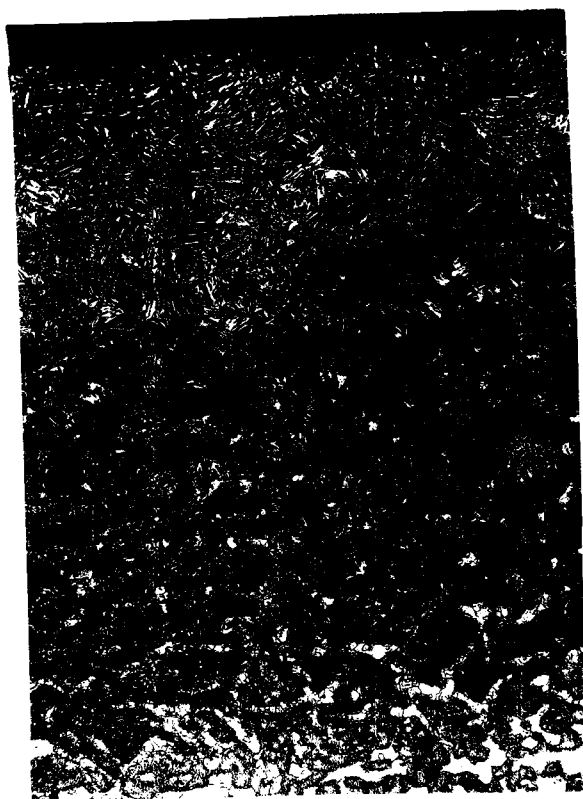
25x

12 040

Nital 3%

obr. č.35 Struktura oceli 12 040 ozářené laserem rychlosti
ozařování $v_1 = 1600$ [mm/min]

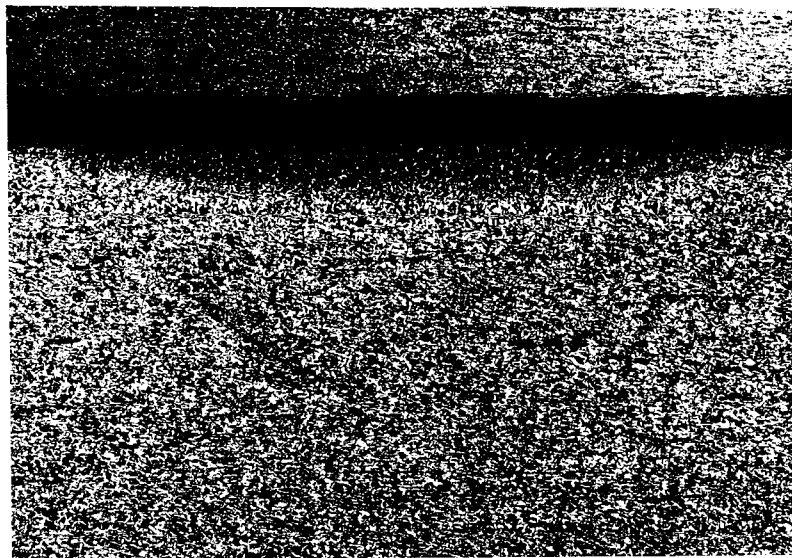
Na (obr. č.35) je zachycen stav povrchu v oblasti ozáření při rychlosti ozařování $v_1 = 1600$ [mm/min]. Detail struktury ozářené oblasti je na (obr. č.36).



200x 12 040 Nital 3%

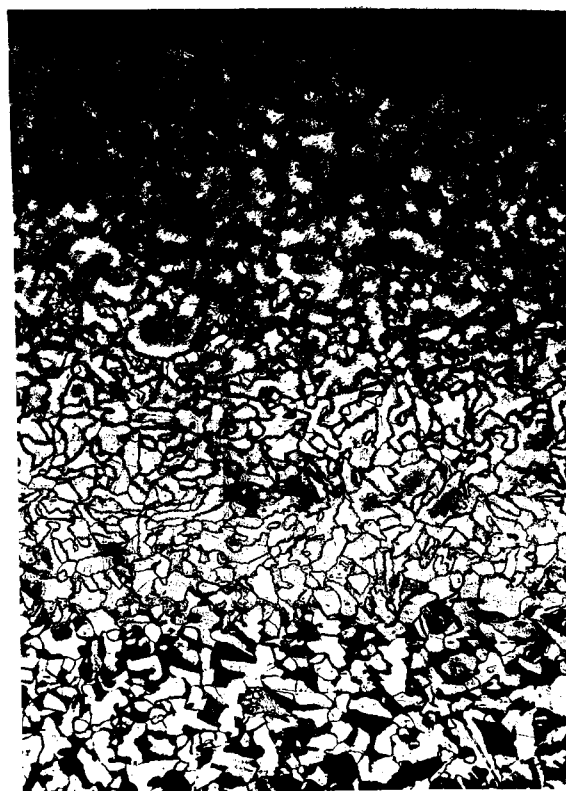
obr. č.36 Detail struktury ozářené oblasti.

Na (obr. č.36) jsou jasně patrné tři různé oblasti. Vrstva nejblíže k povrchu je martenzitická a vykazuje tvrdost 500 [HV], její tloušťka je 0,4 [mm]. Tato povrchová vrstva plynule přechází ve druhou vrstvu o tloušťce 0,24 [mm], která má martenziticko-bainitickou strukturu a ta postupně přechází opět s plynulou návazností na strukturu materiálu výchozího stavu feriticko-perlitickou. Celková hloubka transformované vrstvy je 0,64 [mm].



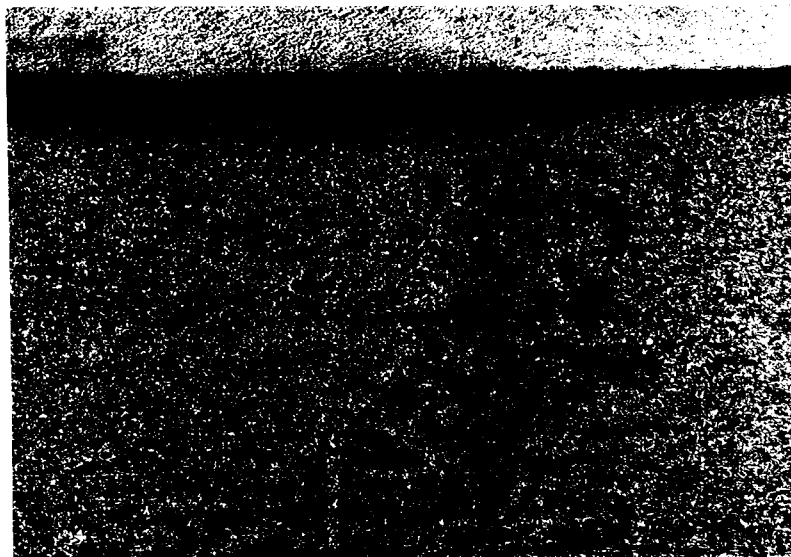
25x 12 040 Nital 3%
 obr. č. Struktura oceli 12 040 ozářené laserem rychlosti
 ozařování $v_2 = 2400$ [mm/min]

Na (obr. č.37) je zachycen stav povrchu v oblasti ozáření při rychlosti ozařování $v_2 = 2400$ [mm/min]. Detail struktury ozářené oblasti je na (obr. č.38).



200x 12 040 Nital 3%
 obr. č.38 Detail struktury ozářené oblasti.

Na (obr. č.38) se objevuje přechodová vrstva, kterou tvoří nízkouhlíkový martenzit. Se zvyšující se rychlostí ozařování se snižuje hloubka vrstev materiál se nestačí zakalit. Nejvíce se snižuje tloušťka vrstvy nejbližší k povrchu - martenzitické. Celková hloubka transformované vrstvy je 0,41 [mm].



25x

12 040

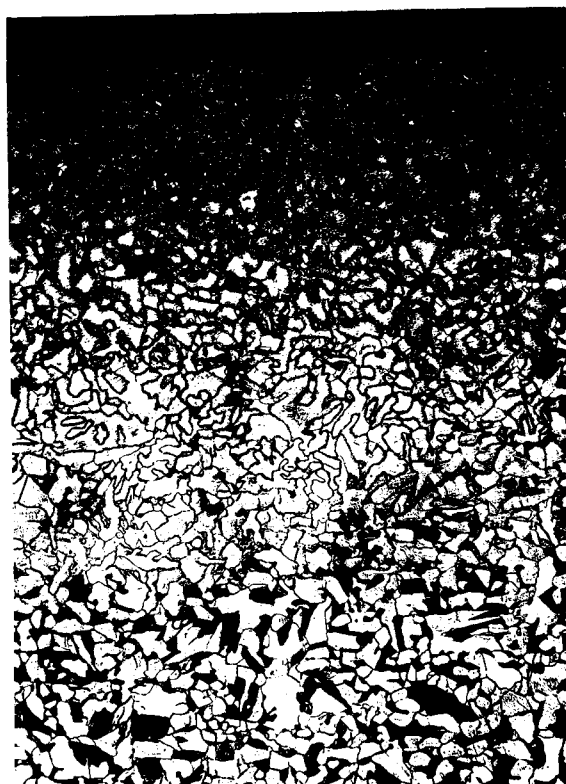
Nital 3%

Obr. č.39 Struktura oceli 12 040 ozářené laserem rychlostí ozařování $v_3 = 2600$ [mm/min].

Na (obr. č.39) je zachycen stav povrchu v oblasti ozáření při rychlosti ozařování $v_3 = 2600$ [mm/min]. Detail struktury ozářené oblasti je na (obr. č.3.10).

Na (obr. č.3.10) se základní struktura feriticko-perlitická rozpadá po ozáření. Perlit se rozpadá difuzí do okolí, průběh austenitizace je nedokonalý a tomu odpovídá nižší hodnota tvrdosti. Celková hloubka transformované vrstvy je 0,34 [mm].

Průběhy tvrdostí (příloha č.12)



200x 12 040 Nital 3%

obr. č.3.10 Detail struktury ozářené oblasti.

4. Výsledková část.

4.1 Parametry zařízení pro odleptávání vzorků z oceli 12 040

vzorek: ochrana neleptaných ploch byla provedena lékařským parafínem

zařízení: katoda - olovo

napětí - $2 \div 4$ [V]

proud - $0,1 \div 0,3$ [A]

proudová hustota - $0,4 \div 0,9$ [A/cm²]

dobu odleptávání - $45 \div 60$ [min]

leptání do hloubky - $0,4 \div 0,7$ [mm]

teplota elektrolytu - 20° [C]

složení elektrolytu - 800 ml CH₃ COOH

100 ml HCl

50 ml HF

50 ml destilovaná voda

4.2 Tabulky naměřených hodnot.

vzorek č. 1 ... $v_1 = 1600$ [mm/min]

z[mm]	0,0025	0,005	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
G[MPa]	-697	-458	-82	-5,3	-1,3	0,4	2,9

z[mm]	0,07	0,09	0,12	0,15	0,18	0,22	0,25
G[MPa]	4,4	9	10,3	10,5	10	9	8,5

vzorek č. 2 ... $v_2 = 2400$ [mm/min]

z[mm]	0,005	0,015	0,025	0,045	0,065	0,085	0,125
G[MPa]	-373	-370	-17	-13	-11	-6	-3

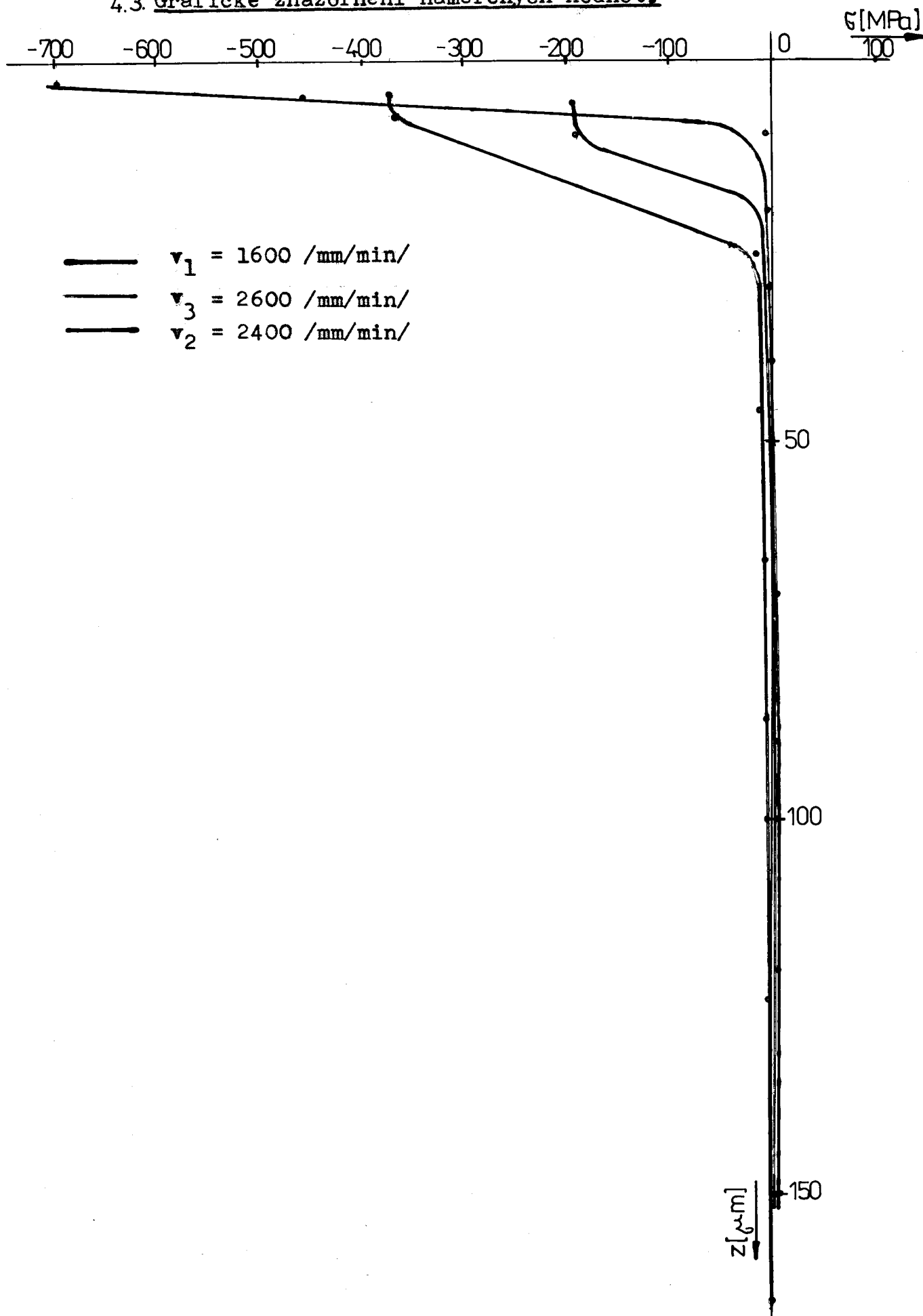
z[mm]	0,165	0,245	0,325	0,405	0,445	0,485	0,525
G[MPa]	0	2	0	6	10	15	20

vzorek č. 3 ... $v_3 = 2600 \text{ [mm/min]}$

z [mm]	0,005	0,01	0,02	0,03	0,04	0,07	0,1
ζ [MPa]	-197	-195	-4	-2	0	2	3

z [mm]	0,15	0,20	0,30	0,40	0,45	0,50	0,55
ζ [MPa]	4,7	5,4	4,8	1,7	-0,6	-3,6	-7

4.3. Grafické znázornění naměřených hodnot.



5. Diskuze.

Zadání mé diplomové práce navazovalo na zadání diplomové práce z roku 1986 /13/. V uvedené diplomové práci nebylo dosaženo uspokojivých výsledků měření.

Na tuto práci jsem navázal, provedl jsem rešerži s pomocí zahraničních pramenů. Měření bylo prováděno ve spolupráci s Katedrou obrábění a montáže. Přístroj na postupné odleptávání byl zdokonalen a byly změněny jeho parametry pro odleptávání /změna proudové hustoty, elektrolytu a krycí vrstvy/. Byly použity 3 vzorky ze stejného materiálu ČSN 12 040, které byly ozářeny laserem CO_2 $/W_k = 2 \text{ [kW]}/$, kontinuální režim/ různou rychlostí ozařování /1600, 2400, 2600 [mm/min]/. Výsledky /závislost zbytkových pnutí na hloubce odleptané vrstvy/ byly zaneseny do tabulek a sestaveny jejich grafické průběhy. Tyto průběhy byly porovnány s průběhy zbytkových napětí v závislosti na hloubce pod povrchem z rešeržní části. Ovšem tyto průběhy byly publikovány pro ozařování pulsním režimem a proto nejsou plně srovnatelné s průběhy námi naměřených napětí. Přesto se dá konstatovat, že tyto průběhy odpovídají výsledkům zahraničních zkoumání.

U vzorku ozařovaném rychlostí 1600 [mm/min] je zbytkové napětí nejvyšší $/-697 \text{ [MPa]}/$, transformovaná vrstva je nejsilnější $/0,4 \text{ [mm]}/$. U vzorků ozařovaných rychlostmi vyššími klesá velikost zbytkového napětí a zároveň klesá i tloušťka transformované vrstvy. Dle teorie by mělo klesat i zpevnění, ale měření tvrdosti ukázalo, že maximální tvrdost všech tří vzorků ozářených různými rychlostmi je přibližně stejná. Možné vysvětlení této nesrovnalosti je klesající hloubka první vrstvy s rostoucí rychlostí ozáření.

Důvodem možných nepřesností měření je příprava vzorků. Materiál vzorků byl ozářen a až po té byl rozřezán na zkušební vzorky. Zde mohlo dojít k zanesení pnutí dodatečným tepelným ovlivněním při jeho rozřezání. Proto pro další experimenty navrhuji nejprve z materiálu nařezat jednotlivé vzorky, potom teprve je ozářit různými rychlostmi. Měření provést jak metodou odleptávací, tak i jinou vhodnou metodou a jejich výsledky

porovnat navzájem mezi sebou a zároveň s technickými prameny.
Bude-li se shodovat, je možné odleptávací metody s výhodou
dále používat ve výzkumu.

6. Závěr.

Na základě provedených prací je možno konstatovat:

1. Byly získány údaje o možnostech transformačního zpevňování oceli 12 040
2. Kriticky byly posouzeny jednotlivé možnosti měření napjatosti v povrchových vrstvách oceli 12 040 po ozáření laserem. Jako nejvhodnější byla vybrána metoda postupného odleptávání, která byla experimentálně prověřena.
3. Byly získány výsledky konkrétního zpevnění povrchových vrstev materiálu ČSN 12 040 po ozáření laserem při třech různých variantách ozáření. Podle výsledků bylo dokázáno, že čím větší tloušťka transformované vrstvy, tím vyšší napětí v povrchové vrstvě. Teorie říká, že jestliže stoupá napětí v povrchové vrstvě, tak stoupá i zpevnění v této vrstvě. To však experimentem dokázáno nebylo.
4. Ze zahraniční literatury se nepodařilo zjistit žádné údaje o průbězích napětí v materiálu ozářeném kontinuálním režimem laserem CO₂, který byl použit při ozařování našich vzorků. Byly však publikovány podobné experimenty při ozařování pulsním režimem. Dá se konstatovat, že námi dosažené výsledky jsou v přijatelném souhlasu s výsledky zahraničními.
5. Přesto, že metoda postupného odleptávání byla prověřena pouze na malém souboru vzorků, lze předpokládat, že by mohla být metodou vhodnou pro využití v průmyslu jako metoda kontrolní.

6.1. Návrh dalšího výzkumu.

Podle dosažených výsledků bude zapotřebí další výzkumné úsilí zaměřit za prvé na studium napjatosti povrchových vrstev při pulsním ozáření. Druhý výzkumný směr, který bude zapotřebí sledovat, navrhuji zpracování stejně připravených vzorků jako v této práci, avšak vyhodnotit výsledky jinou metodou, nejlépe pomocí mikrorentgenu s cílem prověření souhlasu výsledků a v podstatě ocejchování absolutních hodnot měření.

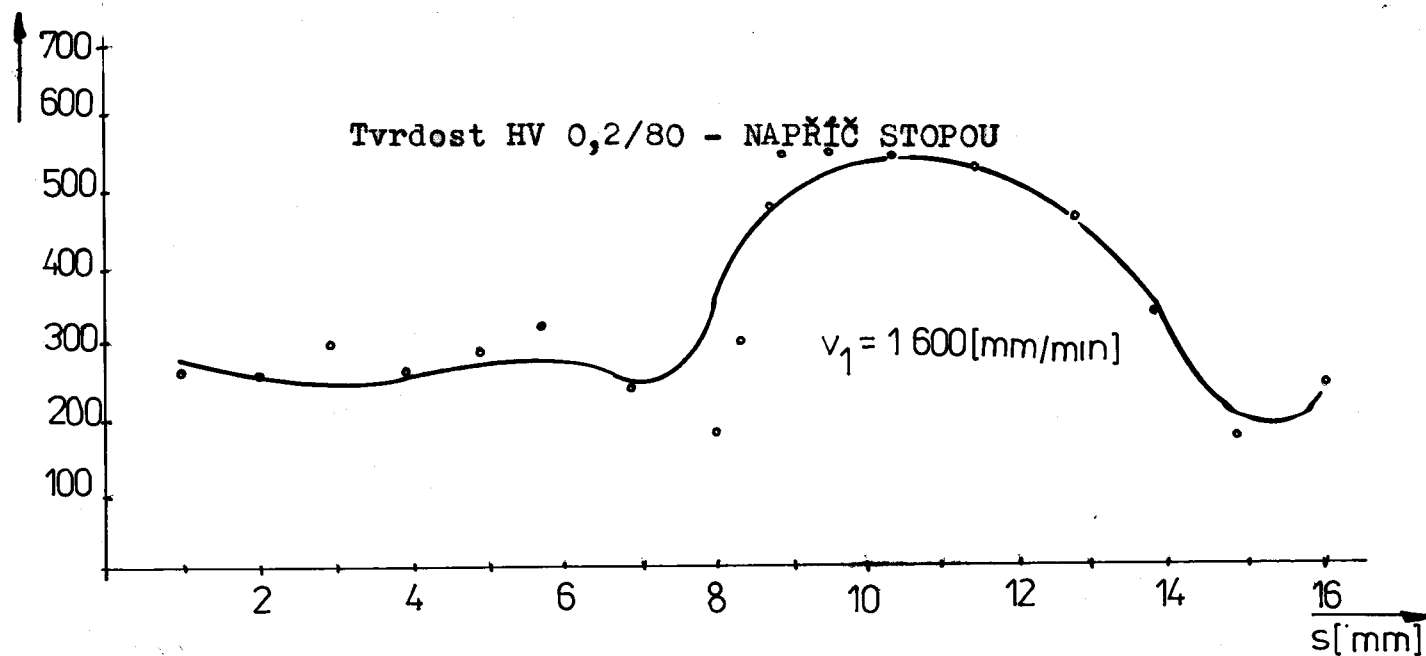
Kučera Petr

7 Literatura.

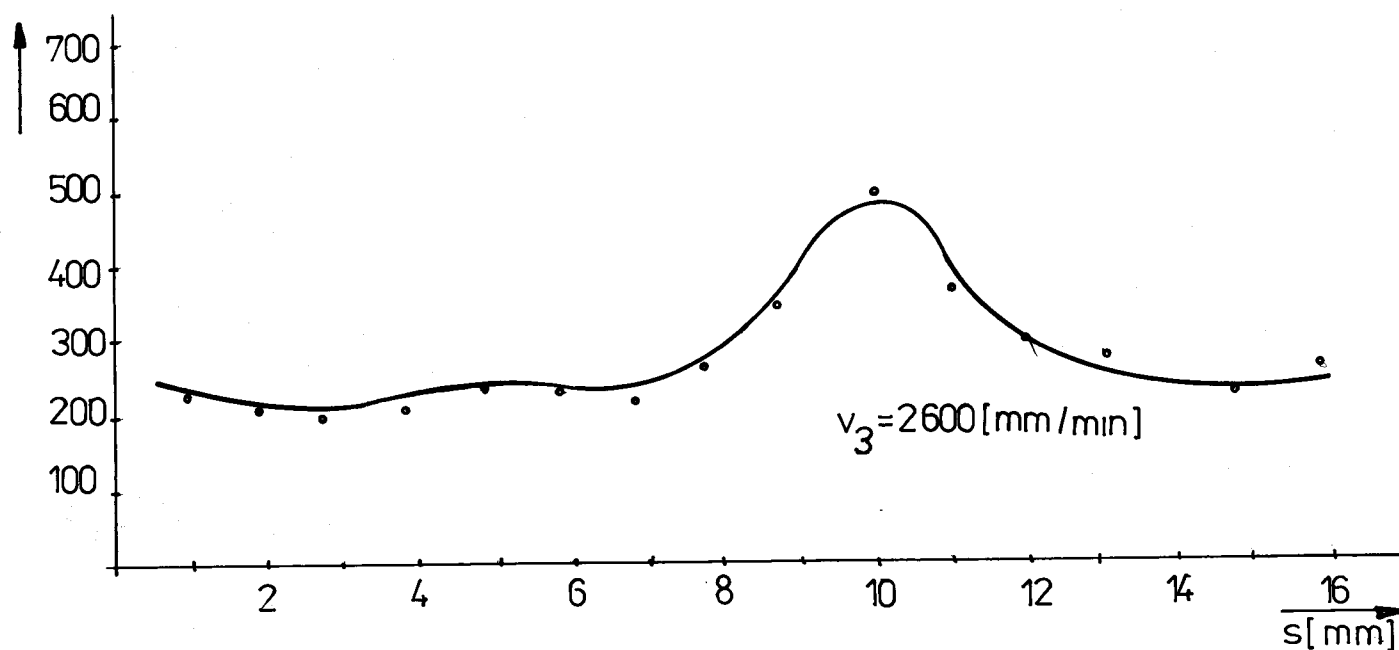
- /1/ BARRAL, M.: Memories etudes scientifiques revue de Metallurgie 81, 1984 9, s. 456.
- /2/ DAVIDĚNKOV, N.N.: Ob izmerenii ostatočnych napraženii - Zavodskaja laboratorija, 1950, XVI, №2, s. 188 - 192.
- /3/ ENGEL, S.L.: Basic of Laser Heat Treatment, Dearbor Mich, 1976.
- /4/ GREČIN, A.N., KATOLIČUK, V.A.: Elektronnaja obrabotka materialov 1984 1, s. 29 - 33.
- /5/ HORYNA, J. a kol.: Impulsní ohřevy v tepelném zpracování kovů - první výsledky na čsl. ocelích a slitinách /Výzkumná zpráva/ Liberec, VŠST 1984.
- /6/ CHABROL, C.: Memories etudes scientifiques revue de Metallurgie 81, 1984 9, s. 453.
- /7/ CHALOUPECKÝ, V. a kol.: Impulsní ohřevy v tepelném zpracování kovů - rešerže a hodnocení /Úvodní studie/. Liberec, VŠST 1982.
- /8/ KLABOCH, L.: Experimentální analýsa napjatosti, 1. vydání, Praha, ČVUT 1972, s. 442.
- /9/ Kolektiv VÚVL: Výzkumná zpráva č. 1144 VÚVL, Brno 1982.
- /10/ KOMENDA, D.: Vybudování laboratoře pro měření zbytkových pnutí metodou elektrolytického rozpouštění /Diplomová práce/. Liberec 1986 - VŠST Fakulta strojní.
- /11/ KOVALENKO, V.S.: Lazernoje i elektroerozinnoje upročnĕnija materialov, Nauka, Moskva 1986.
- /12/ KRAUS, I.: Úvod do strukturní rentgenografie. Academia, Praha 1985.
- /13/ LISALOVÁ, E.: Zjišťování vnitřních pnutí v povrchových vrstvách materiálů vytvořených laserem /Diplomová práce/. Liberec 1986. - VŠST Fakulta strojní.

- /14/ PETROSOV, V.I.; PETRJAEV, A.P.: Pribor dlja nepreryvnogo zamera progiba plastiny pri opredelenem ostatočnych napražnenii. Talže. 1969, XXXV, №3, s. 353 - 356.
- /15/ STŘÍŽ, B.: Pružnost a pevnost 2 díl, Liberec VŠST 1980, skriptum s. 269 - 286.

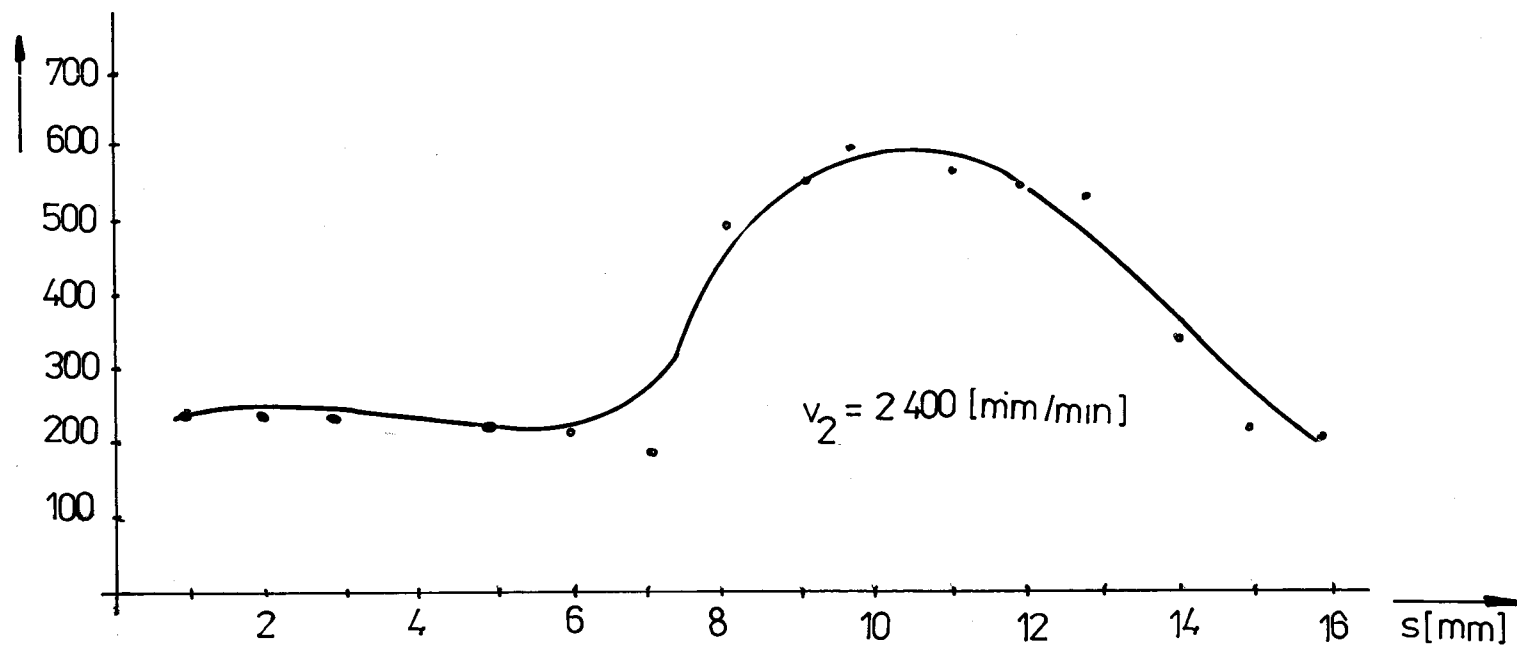
HV 0,2/80



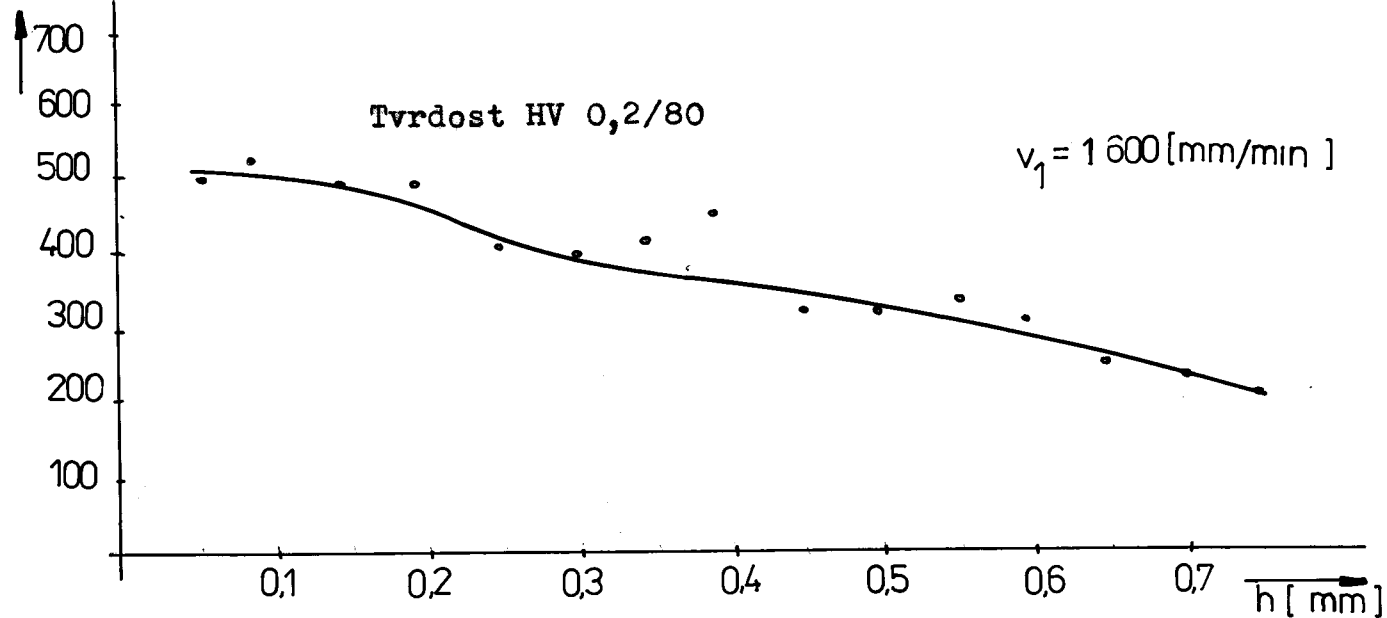
HV 0,2/80



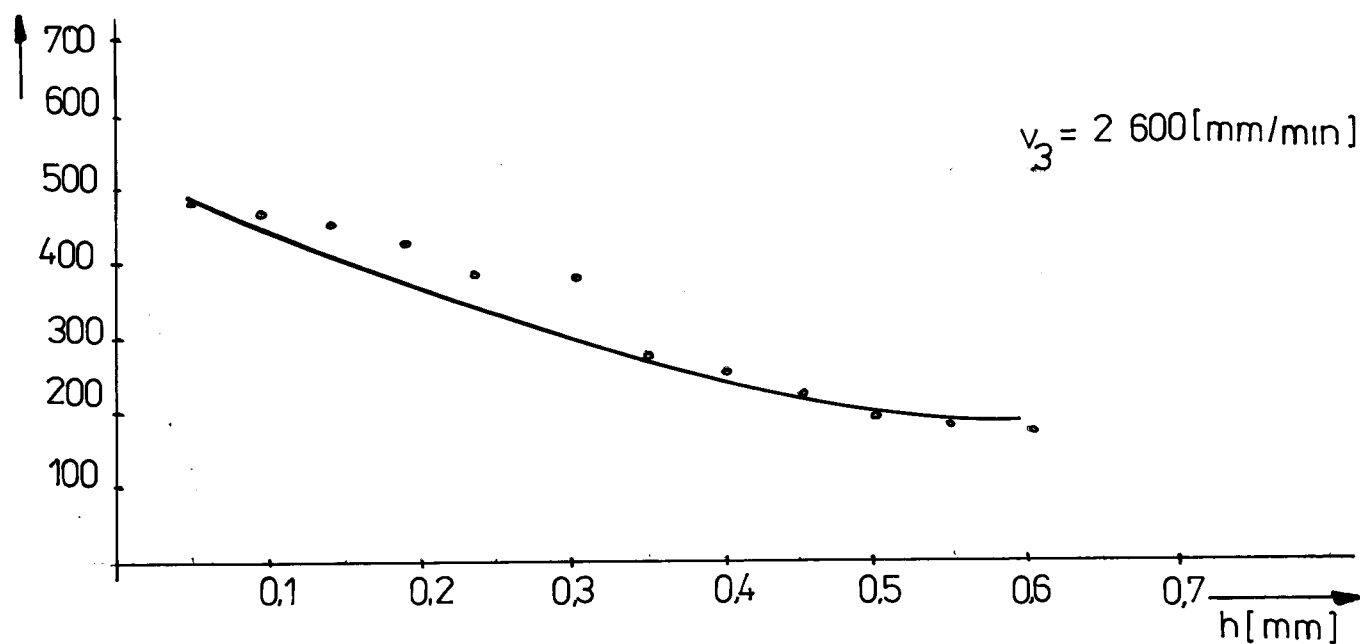
HV 0,2/80



HV 0,2/80



HV 0,2/80



HV 0,2/80

