

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní



DIPLOMOVÁ PRÁCE

1996

Vítězslav Brodský

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro: Vítězslava B R O D S K É H O

obor: 23 - 07 - 8

strojírenská technologie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č. 172/1990 Sb. o vysokých školách určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu:

Jakost povrchu při mikrofrézování laserem

Zásady pro vypracování:

1. Základní poznatky o využití laseru ve strojírenství se zaměřením na dělení materiálu a zejména gravírování a popisování laserovým paprskem.
2. Návrh metodiky zkoušek stanovení integrity povrchu při mikrofrézování laserem. Výběr obráběných materiálů a stanovení rozsahů použitelných pracovních parametrů.
3. Provedení experimentů na laseru fy PLS Laser Systems v Praze.
4. Zpracování výsledků podle navržené metodiky.
5. Vyhodnocení výsledků a doporučení pro zadavatele.
6. Závěr.

KOM/DM

42 s., 24 s. příl.

V 71/96 S

Rozsah grafických prací: obrázky dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: 40 - 50 stran

Seznam odborné literatury:

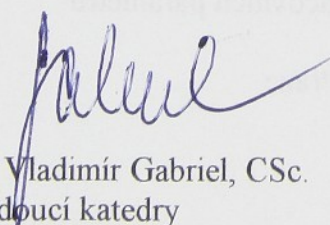
1. VRBOVÁ, M. a kol.: Úvod do laserové techniky. FJFI ČVUT Praha 1992.
2. FARNUM, G. T.: Reinventing the Lathe: In: Machining source book. ASM International, Metals Park, Ohio 1988.
3. VASILKO, K. a kol.: Nové materiály a technológie ich spracovania, 1. vyd. ALFA Bratislava 1990.

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Vladimír Gabriel, CSc.

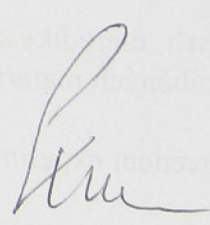
Konzultant: Ing. Jaroslav Řasa, CSc., PLS Laser Systems Praha

Zadání diplomové práce: 30. 10. 1995

Termín odevzdání diplomové práce: 24. 5. 1996


Doc. Ing. Vladimír Gabriel, CSc.
vedoucí katedry




Prof. Ing. Jaroslav Exner, CSc.
děkan

V Liberci dne 30. 10. 1995

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Obor: strojírenská technologie

Zaměření : obrábění a montáž

Jakost povrchu při mikrofrezování laserem

KOM- 884

Vítězslav Brodský

V Liberci dne 20. května 1996

Vedoucí práce: Doc. Ing. Vladimír Gabriel, CSc.

Konzultant: Ing. Jaroslav Řasa CSc, PLS Laser Systems, Praha

Počet stran: 71

Počet příloh: 7

Počet obrázků: 54

Počet tabulek: 51

Počet grafů: 44

Místopřísežné prohlášení

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

V Liberci dne 20. května 1996

.....*Václav Brodský*.....

Poděkování

Úvodem své diplomové práce bych velice rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Vladimíru Gabrielovi, CSc. za odbornou pomoc, cenné rady a připomínky k mé diplomové práci. Také bych chtěl vyjádřit poděkování Ing. Jaroslavu Lasovi, CSc. z PLS Laser Systems za seznámení s problematikou obrábění laserem.

Vítězslav Brodský

Anotace

Tato diplomová práce měla za úkol popsat a zhodnotit proces mikrofrézování (gravírování) laserem. Je zde podrobně uveden postup výroby, opracování vzorků oceli třídy 19 a následná metodika provedených zkoušek. Konkrétně se jednalo o tyto materiály : 19 312A, 19 312K, 19436A, 19 436K, 19 663K, 19 802K a 19 857K.

Většina uvedených materiálů se nacházela v zakaleném stavu mimo materiálů 19 312A a 19 436A.

Provedené zkoušky:

- ◆ měření drsnosti ,
- ◆ měření závislosti hloubky řezné spáry na počtu opakování projetí laserového paprsku,
- ◆ měření závislosti mikrotvrdosti na hloubce,
- ◆ měření zbytkového pnutí,
- ◆ měření tloušťky ovlivněné vrstvy.

Na základě výsledků daných zkoušek, se zvyšují možnosti výrobce optimalizovat a zefektivnit vlastní proces obrábění.

Klíčová slova: laser, mikrofrézování

Deset. třídění: DT 621.9

Zpracovatel: TU v Liberci

Dokončeno: 1996

Archivní označení zprávy:

Počet stran: 71

Počet příloh: 7

Počet obrázků: 54

Počet tabulek: 33

Počet grafů: 44

Obsah

1. Základní poznatky o využití laseru ve strojírenské výrobě se zaměřením na dělení materiálů a zejména gravírování a popisování laserem	10
1.1. Úvod do problematiky obrábění laserem	10
1.2. Princip činnosti laseru	11
1.3. Fyzikální podstata laserové technologie.....	13
1.4. Lasery použité pro zpracování materiálu	16
1.5. Aplikace laserů v průmyslové výrobě	18
1.6. Zhodnocení poznatků o řezání laserem	19
 2. Výběr obráběných materiálů a stanovení rozsahů použitelných pracovních parametrů	20
2.1. Výběr obráběných materiálů	20
2.2. Popis použitého laserového stroje	21
 3. Návrh metodiky zkouše, stanovení integrity povrchu při mikrofrézování laserem a výsledky měření	24
3.1. Měření drsnosti povrchu	24
3.1.1. Výsledky měření	25
3.2. Měření závislosti hloubky řezné spáry na počtu opakování projetí laserovým paprskem	31
3.2.1. Výsledky měření	32
3.3. Měření závislosti mikrotvrdosti na hloubce pod povrchem.	42
3.3.1. Výsledky měření	42
3.4. Měření zbytkového pnutí	54
3.4.1. Výsledky měření	57



3.5. Měření tloušťky ovlivněné vrstvy laserem.	57
3.5.1. Výsledky měření	58
4. Vyhodnocení	65
4.1. Měření drsnosti povrchu	65
4.2. Měření závislosti řezné spáry na počtu opakování projetí laserovým paprskem	66
4.3. Měření závislosti mikrotvrdosti na hloubce pod povrchem	67
4.4. Měření zbytkového pnutí	68
4.5. Měření tloušťky ovlivněné laserem	69
5. Závěr	70
6. Seznam použité literatury	71
7. Seznam příloh	72

Seznam použitých symbolů

A	[mm]	vzdálenost konce leptané plochy od roviny snímání deformace
c		přerušovaný cyklus
E	[Mpa]	Youngův modul pružnosti
h	[mm]	vzdálenost vpichu mikrotvrdoměru od povrchu
ΔH_n	[μm]	tloušťka odleptané n- té vrstvy
L	[mm]	délka odleptané vrstvy
p		s překrytím + přerušovaný cyklus (viz. kap. č.)
Rm	[μm]	maximální výška nerovnosti profilu
t	[mm]	tloušťka ovlivněné vrstvy
σ	[Mpa]	zbytkové pnutí (+ tahové, - tlakové)
x	[mm]	maximální hloubka řezné spáry
ΔY_n	[μm]	přírůstek deformační křivky
y	[mm]	minimální vzdálenost obrobeného profilu od povrchu
z	[mm]	vzdálenost mezi dvěma sousedními řeznými spárami

1. Základní poznatky o využití laseru ve strojírenské výrobě se zaměřením na dělení materiálů a zejména gravírování a popisování laserem

1.1. Úvod do problematiky obrábění laserem (1,3,4)

V padesátých letech byl položen základ novému oboru - kvantové elektronice. Byla realizována zařízení generující a zesilující elektromagnetické záření. Tehdy se můžeme poprvé setkat s termínem **MASER**, což je název přístroje vytvořený z počátečních písmen anglického popisného názvu „Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, v českém překladu pak „ zesilování mikrovln stimulovanou emisí záření“. O několik let později bylo zkonstruováno zařízení zesilující a generující na obdobném principu záření z optické spektrální oblasti. Proto se pro ně nejprve používal název **optický maser**, ale záhy se ustálil název **LASER**, kdy M bylo nahrazeno písmenem L podle anglického Light - světlo (3. kap. 1.1.).

Je tomu více jak 34 let od doby, kdy byl uveden do provozu první laser a víc než 29 let od chvíle, kdy byl použit laser pro zpracování materiálu. Období které můžeme označit za etapu bouřlivého rozvoje laserové techniky lze datovat od počátku 80. let a v současné době asi 450 výrobců na celém světě nabízí výrobky a služby v oblasti zpracování materiálů. Zpočátku se laseru používalo především v oblasti výzkumu a vývoje a pouze jen malá část nacházela uplatnění v průmyslové výrobě. Přelomem se stal rok 1985, kdy objem financí věnovaných na nákup laserů pro zpracování materiálů přesáhl objemem množství laserů pro výzkum.

Růst použití laserů v oblasti zpracování materiálů byl relativně pomalý až do roku 1980. První použitou aplikací bylo vrtání diamantu pro tažení drátů a další použití byla limitována výkonem v té době použitelných laserů. Proto zpočátku většina veškerých aplikací směřovala do elektrotechnického průmyslu. Vyrobením laserů větších výkonů, začal laser pronikat i do leteckého, automobilového průmyslu a

dalších odvětví strojírenství. V současné se odhaduje, že lasery našly uplatnění již ve více jak 50 průmyslových odvětví (1. kap. 1.).

Ve strojírenském a elektrotechnickém odvětví po etapě automatizace ve velkoseriové a hromadné výrobě probíhá v současnosti v seriové i kusové sféře etapa pružné automatizace. Tato etapa je charakterizována pružnými výrobními prostředky jako jsou NC a CNC stroje, průmyslové roboty, manipulátory a počítače. V tomto vývojovém stupni nachází v strojírenských výrobních procesech praktické využití i laserová technika.

Vyšším vývojovým stádiem je integrace doposud samostatných technologií. Z tohoto hlediska mají perspektivu právě technologické lasery, které jsou vhodné na řezání, vrtání, tepelné a chemicko - tepelné zpracování, sváření, ale je možné jejich využití při montážních operacích, tváření ap.. Významná je i skutečnost, že vliv druhu a jakosti materiálu je takřka zanedbatelný, takže se naskýtají velké možnosti opracování netradičních materiálů, jako jsou např. kompozity, těžkoobrobitelné materiály atd. (4. kap. 1.).

1.2 Princip činnosti laseru (4. kap. 1.1.)

Laser je představitelem přístrojů pracujících v oblasti kvantové elektroniky. Představuje zdroj světelného záření, využívající jevu zesilování světla stimulované emise záření.

Základními stavebními prvky laseru jsou optický rezonátor, aktivní materiál a budící zdroj, který tento materiál excituje.

Optický rezonátor je otevřený rezonátor, obvykle tvořený dvěma zrcadly, jedním úplně odrazujícím a jedním částečně propustným. V jejich optické ose je umístěn aktivní materiál. Zakřivení zrcadel a jejich vzájemná poloha určuje příslušnou konfiguraci rezonátoru, tedy i jeho vlastnosti.

Aktivní materiál je látka, v které jsou aktivní částice schopné svoji energii získávanou v procesu buzení odevzdat zářivým přechodem ve formě fotonů.

Energetické přechody mohou nastat u iontů i molekul a svou povahou se dělí na přechody elektronové, vibrační a rotační. Aktivní materiál může mít skupenství pevné, kapalně a plynné, resp. v ionizovaném stavu. Typickým představitelem aktivním materiálem pevné fáze je rubín, Nd : YAG a Nd : sklo. Kapalným aktivním materiálem jsou roztoky organických barviv (rhodamín, fluoresceín.. atd.). Typicky plynné aktivní materiály jsou směsi plynů : He - Ne, CO₂ - N₂ - He, apod.

Stimulovaná emise je proces ve kterém první foton způsobí vynucený přechod částice z vyšší energetické hladiny (na kterou se dostala v procesu absorpce energie) na nižší hladinu, a takto uvolňuje další foton stejných vlastností. Energie emitovaných fotonů je vždy menší než absorbovaná energie. Vlnová délka emitovaného záření je charakteristická pro daný aktivní materiál a daný energetický přechod. Proces buzení umožní přechod aktivních částic na vyšší energetickou hladinu.

Pro činnost laseru je potřebné dosáhnout inverze populace hladin, tzn. počet excitovaných částic na vyšší energetické hladině musí být větší než v základním stavu. To je potřebné proto, aby pravděpodobnost toho, že foton příslušné frekvence si vynutí emisi dalšího fotonu stejných vlastností, byla větší, než pravděpodobnost absorpce prvního fotonu.

Umístěním aktivního prostředí mezi zrcadla rezonátoru se zavádí do systému pozitivní vazba ve směru osy rezonátoru. Při dostatečně vysokém zisku aktivního prostředí nastává jev zesílení a rychlý lavinovitý nárůst počtu fotonů se stejnou frekvencí a fází jakou měl první foton. Výsledkem v tomto procesu je monochromatické a koherentní záření, které vystupuje řez zrcadlo s částečnou propustností. Vysoká spektrální intenzita je výsledkem degenerativního procesu zesílení laserem, které způsobuje vzrůst výkonu laseru.

Laserové technologie je vhodné rozdělit do základních skupin podle dosažené teploty materiál:

1. Technologie s ohřevem materiálu na teploty nižší než solidus: laserové tepelné zpracování (žihání, kalení, popouštění, atd.), laserové chemicko - tepelné zpracování.

2. Technologie s ohřevem materiálu na teplotu vyšší než solidus a nižší než teplota vypařování materiálu: natavení povrchu, povrchové legování, naváření, sváření, stříkání atd.

3. Technologie s ohřevem materiálu na teplotu vyšší než teplota tavení materiálu, tzn. na teplotu vyšší než je teplota vypařování materiálu: vrtání, gravírování, řezání, atd..

Laserové záření je monochromatické, to znamená, že každý laser vyzařuje obvykle pro dané aktivní prostředí na jedné nebo několika vlnových délkách. Existují lasery, jejichž záření je monochromatické, ale spojitě přeladitelné, takže laser může v určitém časovém intervalu vyzařovat na libovolné vlnové délce. Další vlastností laserového záření je jeho koherentnost, což znamená, že atomy aktivní látky vyzařují kooperovaně. Laserový paprsek se šíří jen jedním směrem, takže ho můžeme považovat za rovnoběžný. Jeho záření může mít ustálený výkon (kontinuální lasery), nebo může být ve formě jednotlivých opakovaných výbojů (pulzující lasery).

1.3. Fyzikální podstata laserové technologie (4. kap. 1.3.)

V této kapitole se budeme zabývat laserovými aplikacemi, ve kterých je laser využíván jako zdroj tepelné energie. Charakteristika a výhody laserových aplikací jsou přímým důsledkem vlastností zdroje tepla, které je vytvářené absorpcí laserového záření.

Absorbce laserové energie je závislá jednak na vlastnostech laserového paprsku, jednak na vlastnostech absorbujícího materiálu.

Vlivy parametrů na absorpci laserového paprsku můžeme (dle obr. 1.3.1.) rozdělit:

1) Laserový paprsek - intenzita

- vlnová délka
- délka pulzu
- rozbíhavost

2) **Čočka** - ohnisková vzdálenost

3) **Minimální průměr stopy**

4) **Povrch** - odrazivost

5) **Materiál** - absorpce

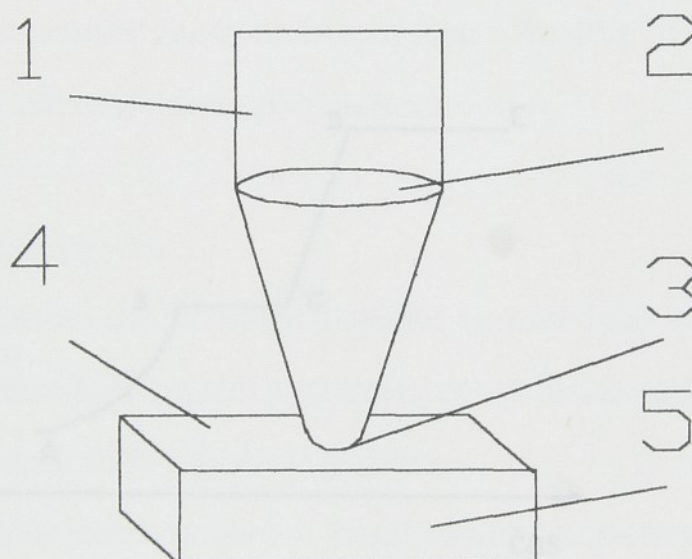
- tepelná vodivost

- tepelná difuzivita

- hustota

- měrné teplo

Obrázek 1.3.1.



Laserový paprsek je absorbovaný v tenké povrchové vrstvě a tepelná energie je potom přenášena do vnitra materiálu tepelnou vodivostí. Míra ohřevu je určena tepelným tokem, který je obvykle nižší než hustota světelného toku na povrchu. Odrazivost je funkcí vlnové délky dopadajícího laserového záření, drsnosti povrchu, teploty ohřáté povrchové vrstvy.

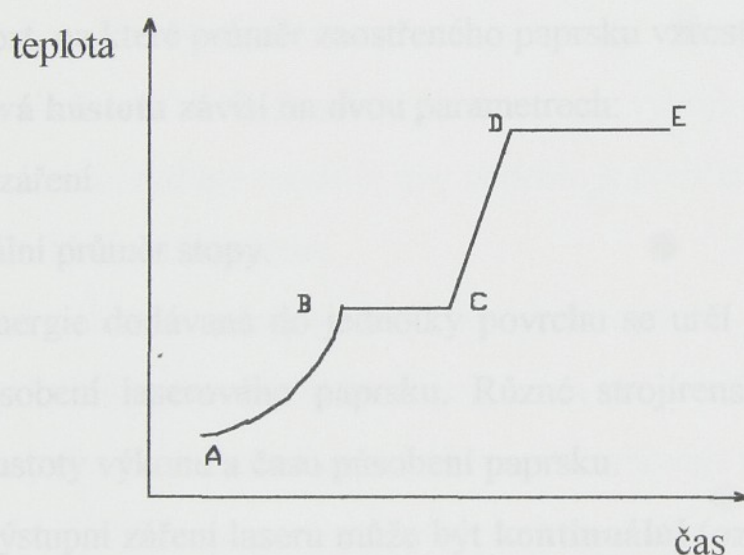
Potřebná energie při ohřívání kovových a nekovových materiálů se může určit na základě tepelných vlastností materiálu.

Vlastní proces ohřívání kovového materiálu lze rozdělit do tří etap (viz. obr. 1.3.2.) :

- ◆ v prvním intervalu se kov nachází v tuhém stavu (interval A- B)
- ◆ druhý interval je specifický vlastním tavením kovu (interval B- C)
- ◆ ve třetím intervalu probíhá ohřívání v tekutém stavu (interval C- D)

čtvrtý interval je charakteristický odpařováním roztaveného kovu (interval D- E).

Obrázek 1.3.2. Proces ohřívání kovového materiálu při obrábění laserem



Technologický proces je ovlivněn charakteristikami laserového paprsku mezi kterými jsou nejdůležitější:

- ◆ minimální průměr stopy
- ◆ divergence (rozbíhavost)
- ◆ hloubka ostrosti
- ◆ výkonová hustota

Konvenční světelné zdroje září více nebo méně rovnoměrně do všech směrů a intenzita záření klesá se čtvercem vzdáleností. Jejich použití na vytvoření

rovnoběžného svazku pomocí čočkovitého nebo zrcadlového kolimátoru není nejvhodnější. Konečné rozměry světelných zdrojů způsobují, že světlo mimo ohniska kolimátoru se nezobrazí na ose kolimátoru. Druhým zdrojem **divergence je difrakce** (ohyb), která nastává na rozhraní aparatur a která existuje v každém reálném systému. **Divergence** je závislá na použitých optických prvcích systému. Sférická zrcadla vykazují větší divergenci než rovinná.

Minimální průměr stopy je průměr paprsku měřený v ohnisku zaostřovací optiky a určuje výkonovou hustotu zaostřeného laserového paprsku.

Hloubka ostrosti určuje přesnost zaostření paprsku a je definována jako vzdálenost, na které průměr zaostřeného paprsku vzroste o 5%.

Výkonová hustota závisí na dvou parametrech:

- výkon záření
- minimální průměr stopy.

Energie dodávaná do jednotky povrchu se určí jako součin hustoty výkonu a času působení laserového paprsku. Různé strojírenské aplikace vyžadují rozdílné relace hustoty výkonu a času působení paprsku.

Výstupní záření laseru může být **kontinuální** (označované jako CW - continuos wave), nebo **pulzní**. Pulzní výstup může být od jednoho pulzu až po sériově opakované pulzy s vysokou opakovací frekvencí. Vzhledem k velmi krátkému trvání pulzů může být pulzní výkon vysoký, řádově MW.

1.4 Lasery používané pro zpracování materiálu (1,3)

Lasery na zpracování materiálu dělíme do tří skupin :

♦ **plynové lasery**, které využívají CO_2 jako aktivní plyn ve směsi s He a N a které jsou čerpány některým typem elektrického výboje. Pracovní plyn proudí mezi

elektrodami v nejrůznějších konfiguracích a podle toho jsou tyto lasery dále děleny. Vystupující záření patří do střední infračervené oblasti.

♦ **Nd : YAG** lasery pracují s krystalem Ytrium - Aluminium granátu synteticky vyrobeného, do jehož krystalické struktury je ještě přidán čistý Neodym. Takovýto krystal je osvětlován kontinuálně nebo pulzně výbojkami a výsledkem je, že z krystalu vychází záření v oblasti blízkého infračerveného světla. **Protože vlastní obrábění se provede na laseru pracující na stejném principu, je této aplikaci věnována zvláštní pozornost.**

Laser Nd : YAG může poskytnout kontinuální výkony záření převyšující 1 kW. K získání takových výstupních výkonů je ovšem zapotřebí budit výbojkou celkovým výkonem kolem 30 kW. Převážná část energie výbojky se však transformuje na teplo, které je nutno efektivně odvádět aby nedošlo k přehřátí krystalu i výbojky. Na kvalitu výbojek se klade velký důraz.

Vnitřní části laseru v prostoru systému pro optické buzení jsou obvykle vyplněny chladicí kapalinou, která musí být propustná pro budící záření a měla by mít velkou měrnou tepelnou kapacitu. Pro své vlastnosti vyhovuje např. voda.

Nd : YAG laser se často provozuje s vnitřní modulací rezonátoru. Pro řízení tvaru a velikosti impulsu se nejčastěji používá elektrooptického modulátoru. Pro řízení tvaru a velikosti impulzu se často používá elektrooptického modulátoru. Přestože technologie výroby krystalu Nd: YAG je poměrně obtížná, jsou dnes komerčně dostupné YAG - lasery s velkými výstupními výkony až několik stovek wattů.

♦ **Excimetrové lasery** jsou plynové lasery čerpané příčným doutnavým silnoproudým výbojem a jako pracovní plyn používáme He, do kterého je přimíchán např. krypton -fluor. Podle použitého plynu vzniká záření odpovídající vlnové délky ležící obvykle v oblasti ultrafialového světla.

1.5. Aplikace laserů v průmyslové výrobě (1,3)

V této kapitole se budeme věnovat pouze laserovým aplikacím, které se přímo dotýkají procesu obrábění materiálu. Mezi nejzákladnější můžeme zařadit následující operace:

a) pro řezání

- nepůsobí silou na pracovní předmět
- malá tepelně ovlivněná plocha
- malá šíře řezu
- schopnost řezat různé druhy mat.
- neopotřebovatelnost nástroje
- neznečištění řezné spáry

b) pro vrtání

- nepůsobí silou na pracovní předmět
- malá tepelně ovlivněná plocha
- vrtání malých otvorů
- vrtání šikmo k povrchu
- zpracování těžkoobrobitelných mat.
- velká rychlost vrtání
- neopotřebování nástroje

c) pro svařování

- vysoká kvalita sváru
- vysoká rychlost svařování
- schopnost svařovat pouze z jedné strany
- práce bez plnidla a tavidla
- velký poměr hloubky k šířce sváru

d) pro tepelné zpracování

- velká rychlost

- malé nebo žádné zkroucení mat.,
- říditelný profil zpevnění,
- možnost selektivního zpevnění

e) pro značkování a gravírování

- žádné prostorové porušení materiálu
- neovlivnění základního materiálu
- velká pracovní pružnost
- velká rychlost popisu
- popis nekonstrukčních mat.

Přednosti laseru v průmyslových technologických aplikacích v porovnání s jinými známými a používanými zdroji energie:

- ♦ extrémní koncentrace energie, velká hustota energie, velká hustota výkonu, výhodný přenos energie
- ♦ jednoduchá regulace výkonu laseru a energetického účinku laseru na materiál
- ♦ lehké ovládání laserového paprsku
- ♦ nepřítomnost opotřebení nástroje
- ♦ laserová technologie se provádí bez potřeby vakua
- ♦ automatizace technologického procesu, robotizace výrobních operací, zařazení do výrobních operací, automatické kontrolní systémy.

1.6 Zhodnocení poznatků o řezání laserem (4. kap. 1.4.3.6.)

V případě, že shrneme zkušenosti o řezání laserem, můžeme vyvodit následující závěry:

- ♦ technologie umožní vyhotovení velmi přesných a kvalitních řezů, nepotřebujících další opracování
- ♦ řezání laserem lze aplikovat pro extrémně tvrdé, ale i velmi měkké hmoty a je jedinou vhodnou technologií pro řezání nekovových materiálů

- ◆ tepelně ovlivněná oblast vzniklá při řezání je velmi úzká a malá tepelná difúze nevyvolává deformaci řezaných materiálů
- ◆ z termických metod řezání (plazmové řezání, řezání kyslíkem a pod.), jediné laserová technologie je vhodná pro řezání materiálů hloubky do 1 mm, rychlost řezání kovových materiálů, která je závislá na výkonu laseru, se pro hloubky do 10 mm dá srovnávat s rychlostmi dosažených jinými technologiemi.

2. Výběr obráběných materiálů a stanovení rozsahů použitelných pracovních parametrů.

2.1. Výběr obráběných materiálů

Materiály pro výrobu vzorků byly vybrány zadavatelem PLS Laser Systems. Konkrétně se jednalo o oceli třídy 19.: 19 312 A, 19 312 K, 19 436 K, 19 436 A, 19 663 K, 19 802 K a 19 857. Všechny uvedené materiály, mimo 19 312 A a 19 436 A byly tepelně zpracovány. Podrobný popis složení materiálů a jejich tepelného zpracování je uveden v příloze č.1. Pro tento popis byla použita databáze Steel App, In Part Bratislava.

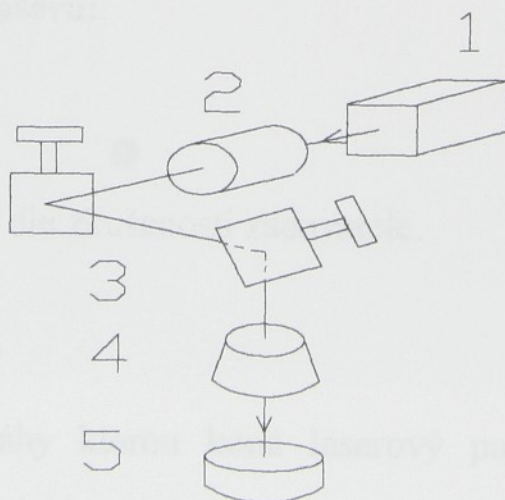
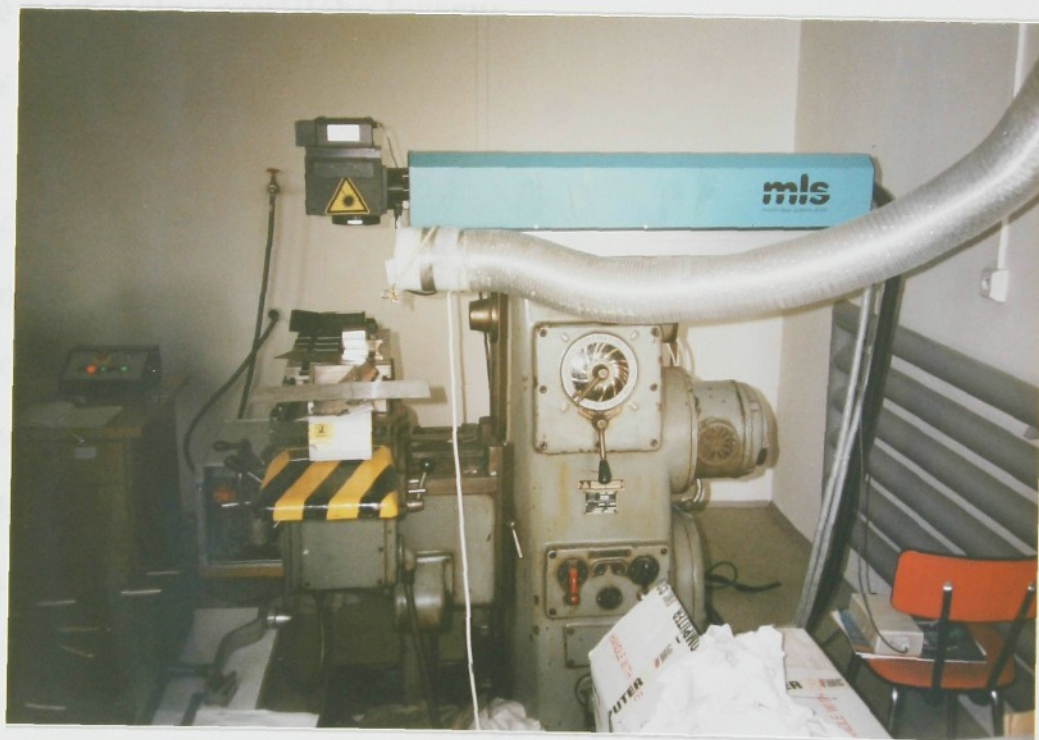
Výroba vzorků:

1. nařezání polotovarů na strojní pile
2. soustružení
2. frézování
3. broušení
4. tepelné zpracování - podrobné popsání tohoto postupu je uvedeno v příloze č.1.

2.2 Popis laserového stroje

Zařízení na kterém proběhlo obrobení vzorků, vznikl kompletací upravené standardní frézky Typ: FA2U a laserového agregátu (obr. 2.2.1.). Toto zařízení je určeno pro obrábění malých součástí formou gravírování (rytí).

Obrázek 2.2.1. Vlastní laserový stroj



Obrázek 2.2.2. Schéma principu laserového agregátu

1- zdroj laserového paprsku, 2- vedení paprsku, 3- zrcátko, 4- objektiv, 5- obrobek.

Laserový paprsek vysílaný ze zdroje je usměrněn pomocí vedení na soustavu zrcátek. Směr pohybu paprsku je v obr. 2.2.2. znázorněn šipkou. Po té je veden prostřednictvím objektivu následuje jeho zfokusování. Takto upravený paprsek po styku s povrchem vzorku způsobí jeho natavení a následné odpaření základního materiálu.

Technické parametry použitého laseru:

Parametry laseru

Typ	Nd : YAG
Pracovní rozsah	100 x 100 mm
Přesnost	5 μ m
Pracovní rychlost	max. 180 m/s

Způsob řízení

Počítač	PC
Zadávací systém	klávesnice, myš
Výstup	tiskárna

Napájení	3 x 380 V; 5 kVA
-----------------	------------------

Použité pracovní parametry laseru:

- výstupní výkon 50W
- pracovní rychlost 50 m/s

Pracovní podmínky byly voleny dle zkušenosti zadavatele.

Režimy mikrofrézování:

bez překrytí - trajektorie dráhy kterou koná laserový paprsek je při vlastním opracování ve směru posuvu lineární,

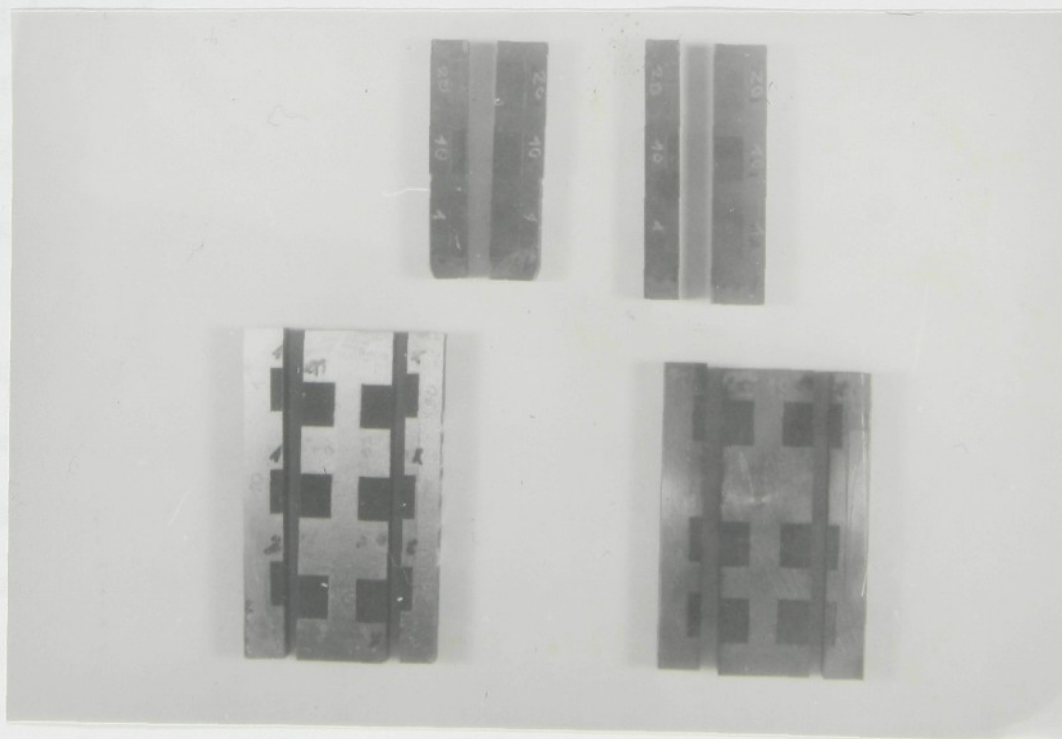
s překrytím (p)- laserový paprsek vykonává při obrábění krouživý pohyb ve směru posuvu,

přerušovaný cyklus (c)- mezi projetím laserového paprsku jsou časové prodlevy,
cyklus bez přerušení - v tomto případě není pracovní cyklus přerušen, časové prodlevy jsou nulové.

Dané vzorky byly opracovány v režimu bez překrytí, bez překrytí + přerušovaný cyklus a s překrytím + přerušovaný cyklus. Použité počty opakování 1x, 10x, 20x a 30x.

Před vlastním měřením byly vzorky nařezány. Tato operace byla nutná z hlediska provedení zkoušek. Nařezání vzorků se uskutečnilo na řezacím stroji v místním závodě PLS Liberec. Obr. 2.2.4. představuje jak byl daný řez proveden.

Obrázek 2.2.4. Řezy vzorků



3. Návrh metodiky zkoušek stanovení integrity povrchu při mikrofrézování laserem a výsledky měření

Návrh metodiky zkoušek byl zhotoven na základě požadavků zadavatele

Ing. Jaroslava Řasy, CSc. z PLS Laser Systems v Praze.

Metodika zkoušek zahrnuje:

- ◆ měření drsnosti
- ◆ měření závislosti řezné spáry na počtu opakování laserovým paprskem
- ◆ závislosti mikrotvrdosti na hloubce
- ◆ měření zbytkového pnutí
- ◆ měření tloušťky ovlivněné vrstvy.

3.1. Měření drsnosti

Měření drsnosti povrchu vzorků bylo provedeno na dotykovém profilometru HOMEL TESTER s použitím snímače TFE 100/ 666.

Dotykový profilometr nebo profiloměr, někdy také drsnoměr, se skládá z mechanické části (měřicí jednotky) a elektronické části (vyhodnocovací jednotky).

Mechanickou část tvoří stůl na který se ukládá měřená součást a stojan, po kterém je možno svisle posouvat zařízením, v němž je uchyceno rameno se snímačem. Po měření povrchu se posouvá rovnoměrnou rychlostí snímač. Detail daného zařízení je zobrazen na obr. 3.1.1.

Obrázek 3.1.1. Měření drsnosti



Elektronická část provádí transformaci mechanického signálu generovaného pohybem snímacího hrotu, sledujícím nerovnosti povrchu měřené plochy na elektrický signál. Tento signál slouží po zpracování jako grafický záznam nerovností povrchu. Před vlastním měřením byl snímač ocejchován pomocí etalonu.

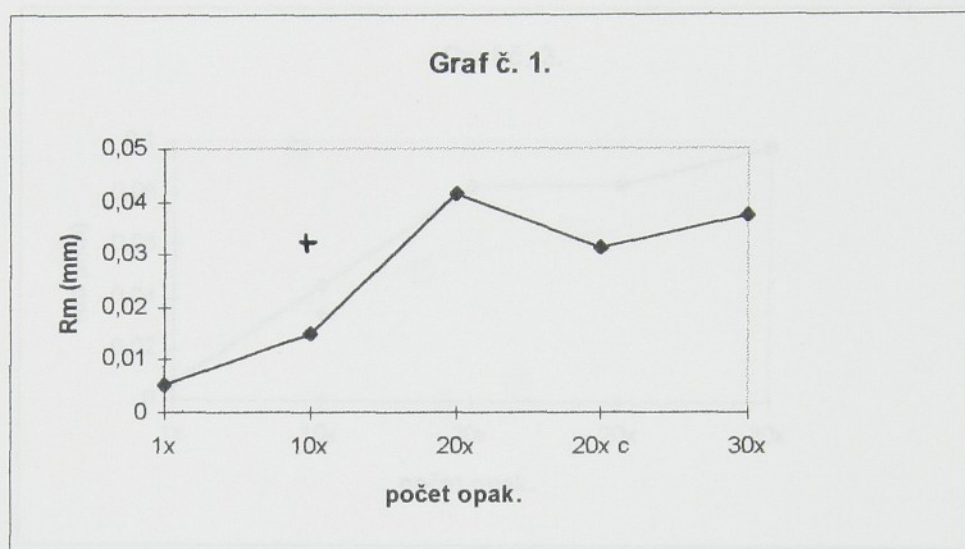
Pracovní parametry:

- dráha pohybu snímače 6.3 mm
- mezní rozteč CUT OFF 0.75
- rychlost pohybu vystupujícího grafického záznamu- $v = 16 \text{ mm/s}$
- zvětšení 2:1

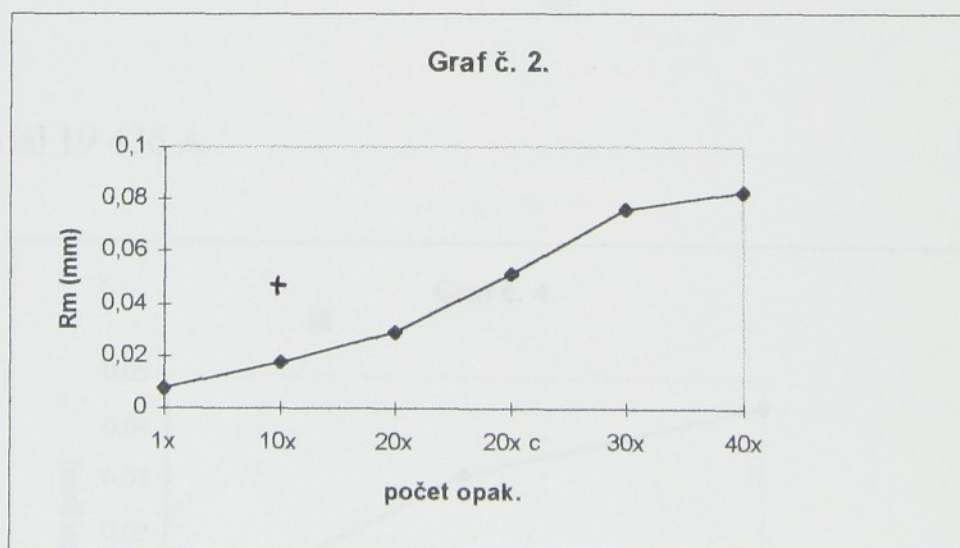
3.1.1 Výsledky měření

Na základě naměřených hodnot byly zhotoveny grafy popisující závislosti R_m na počtu opakování. Křížkem je v grafech označen režim s překrytím + přerušovaný cyklus. Tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze č.2.

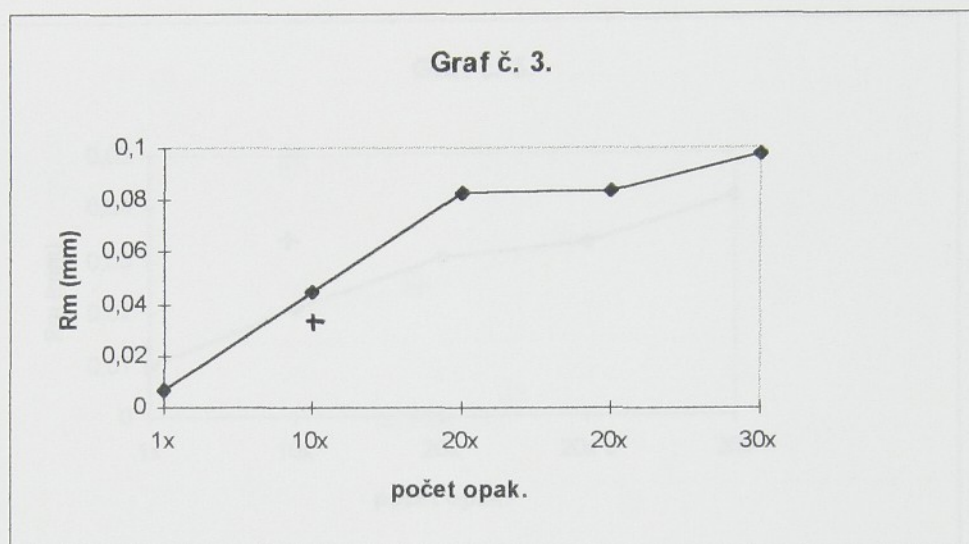
Materiál 19 312 A



Materiál 19 312 K

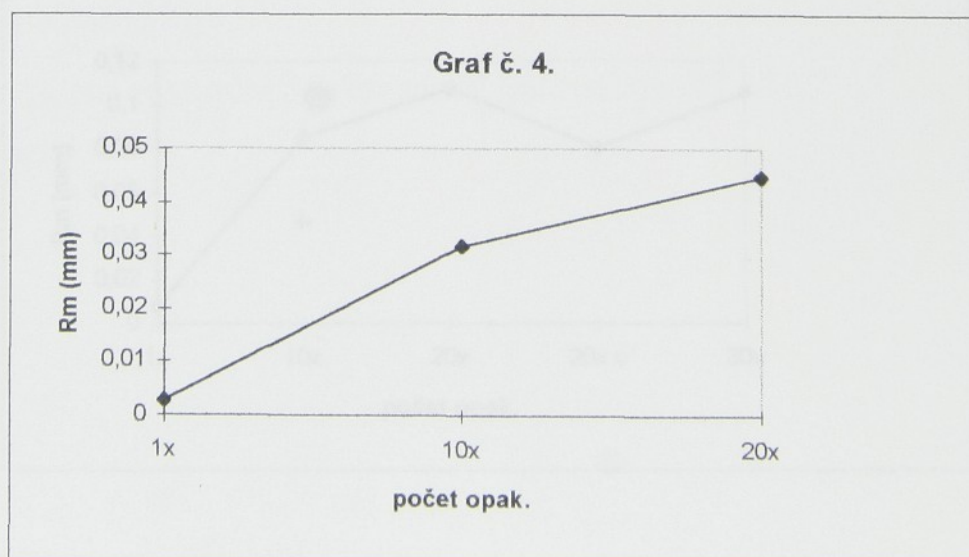


Materiál 19 436 K

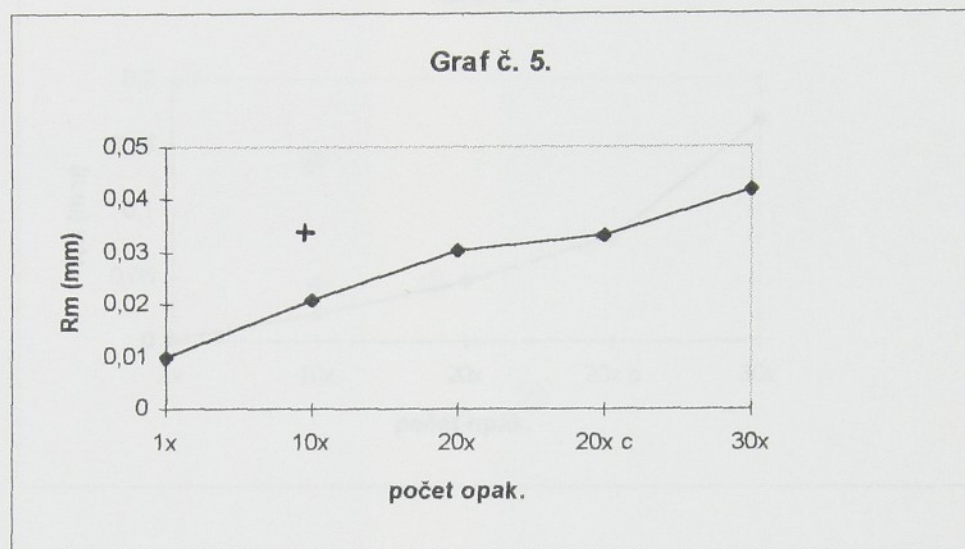


Materiál 19 802 K

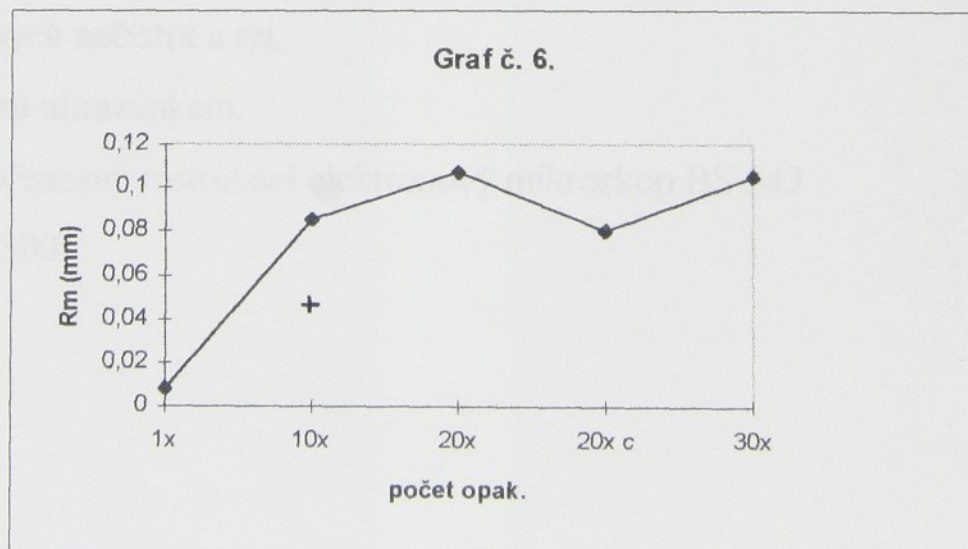
Materiál 19 436 A



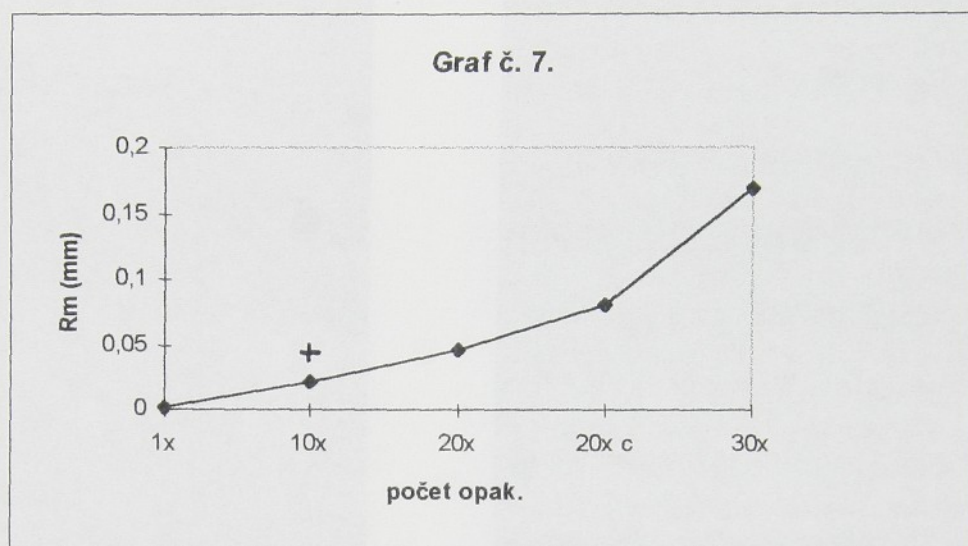
Materiál 19 663 K



Materiál 19 802 K



Materiál 19 857 K



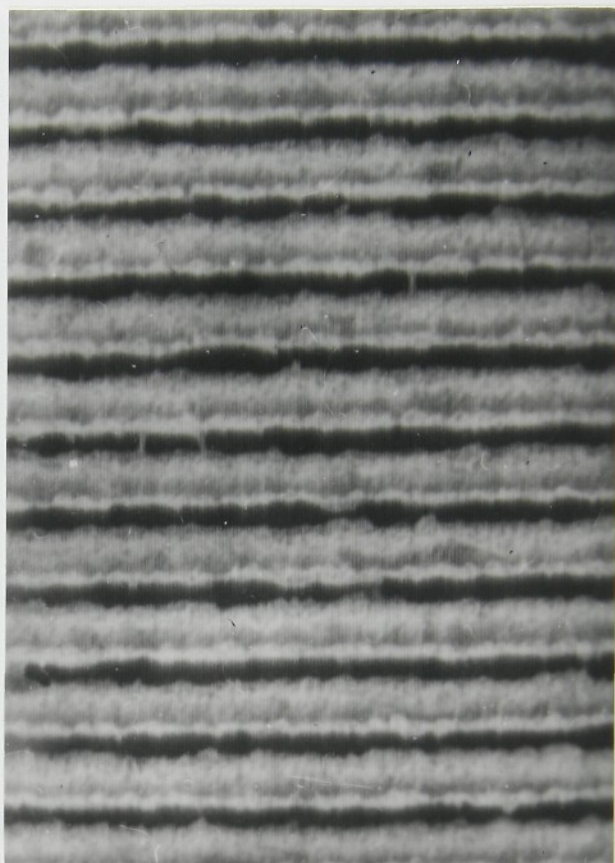
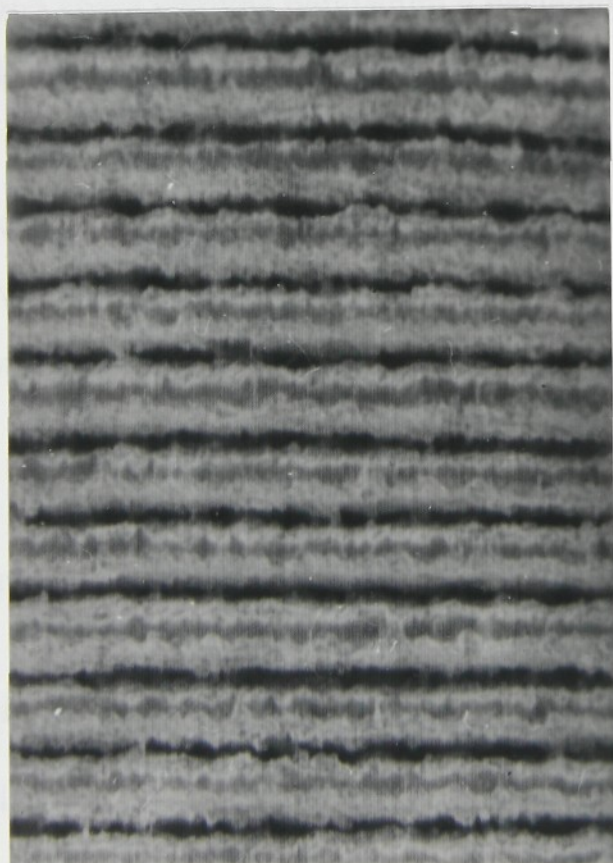
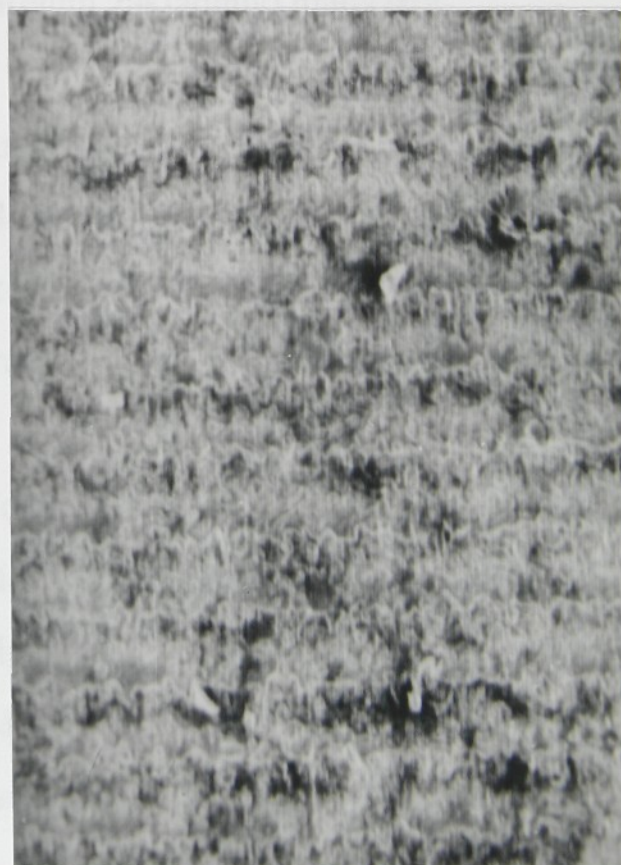
Pouze pro doplnění poznatků o této technologii, byly vyhotoveny fotografie na přenosném rastrovacím elektronovém mikroskopu. Na tomto přístroji byly zhotoveny snímky zobrazující povrch obrobeného vzorku. Zvolené materiály byly určeny na přání zadavatele. Jednalo se o tyto materiály 19 436 A a 19 436 K.

Příprava vzorků měla dvě etapy :

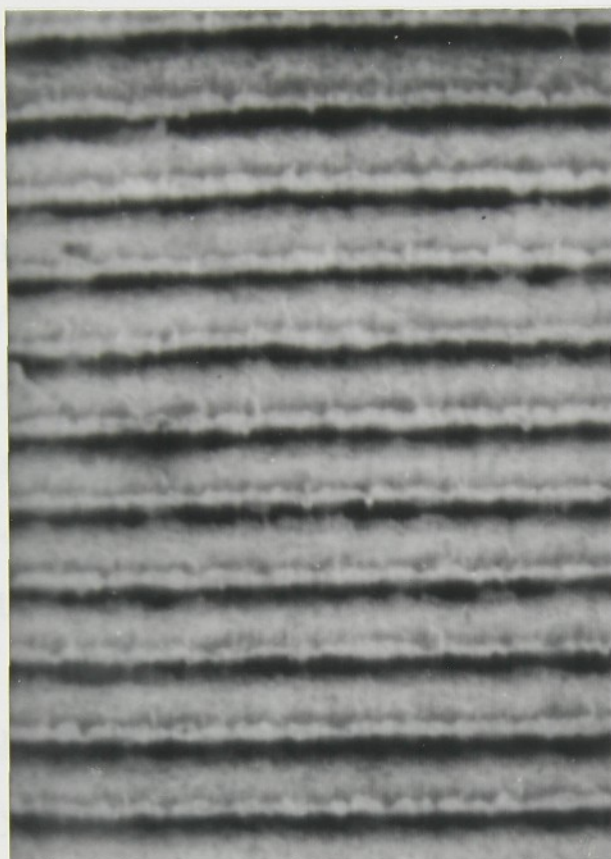
1. očištění od hrubých nečistot a rzi,
2. dokonalé očištění ultrazvukem.

Použitý přístroj: přenosný rastrovací elektronový mikroskop BS 343

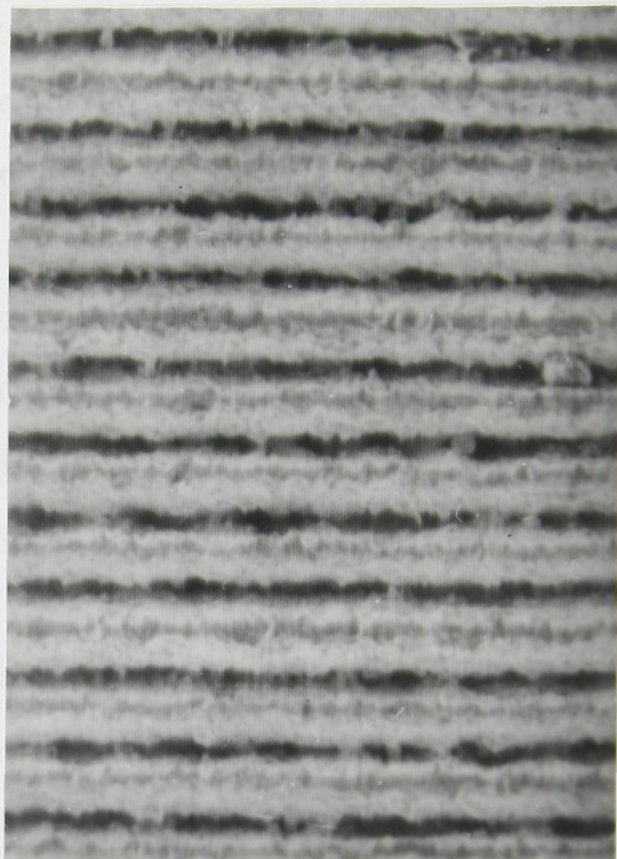
Použité zvětšení: 300x

Obrázek 3.1.2. 19 436 A 1x**Obrázek 3.1.3. 19 436 A 10x****Obrázek 3.1.4. 19 436 A 20x****Obrázek 3.1.5. 19 436 K 1x**

Obrázek 3.1.6. 19 436 K 10x



Obrázek 3.1.7. 19 436 K 20x



3.2. Závislost hloubky řezné spáry na počtu opakování

Řezná spára vznikne natavením a následným odpařením základního materiálu prostřednictvím laserového paprsku.

Před vlastním měřením bylo nutné provést u vybraných vzorků vybroušení a vyleštění jejich povrchové vrstvy. V našem případě se dříve provedlo sletování vzorků obrobenými plochami na sebe, aby se zachovala kolmost vyhodnocované plochy při broušení. Hrozilo zde riziko zaoblení testované hrany a tím i k nepřesnosti měření.

Postup při opracování vzorků byl následovný:

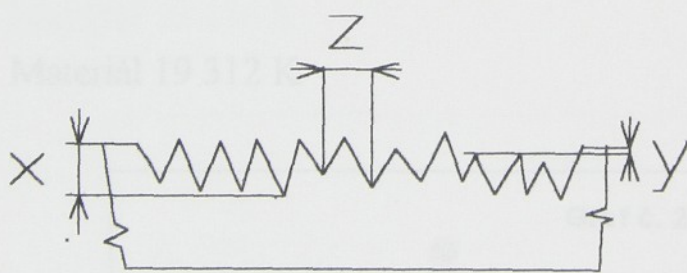
Daný vzorek se brousí postupně na několika druzích brusných papírů, které se od sebe liší velikostí brusných zrn. Brousí se od nejhrubšího po nejjemnější papír a je nutné, aby se vzorek pohyboval. Tím je zajištěn rovnoměrný odběr materiálu. Použité zařízení 4- kotoučová bruska. Při přechodu z jednoho brusného kotouče na druhý, je nutno vzorek opláchnout proudem vody.

Dalším bodem bylo leštění. Provádělo se na rotujícím kotouči potaženým sukнем a přívodu leštící emulze. Pomocí proudu vody se vzorek očistil od leštící emulze a vložil se do kádinky s lihем. Pak následovalo dokonalé osušení fénem.

Na takto upraveném vzorku můžeme provést dané měření. Pro vyhodnocování hloubky řezné spáry na počtu opakování byl použit univerzální přístroj Zwik 3212. Vlastní zařízení se skládá z metalografického mikroskopu, mikrotvrdoměru a vyhodnocovací jednotky (počítač). Metalografický mikroskop můžeme rozdělit na měřicí aparaturu a pohyblivý stůl. Pohyb stolu je možno regulovat ve směru příčném a podélném. Měřicí aparatura má horní mez zvětšení 600:1. Naměřené hodnoty byly stanoveny s přesností 0.0001 mm.

Nejdříve bylo provedeno seřízení přístroje (vynulování) a upnutí vzorku. V okuláru jsou umístěny dvě pohyblivé rysky, jejichž difference je přenášena na vyhodnocovací jednotku. Jedna z rysek je nastavena rovnoběžně s neobrobeným povrchem a druhá ryska je paralelně posouvána do místa měření. Na display počítače se odečetla naměřená hodnota. Na všech vzorcích byly změřeny hodnoty x, y, z viz. obr. 3.2.1.(příloha č. 3.).

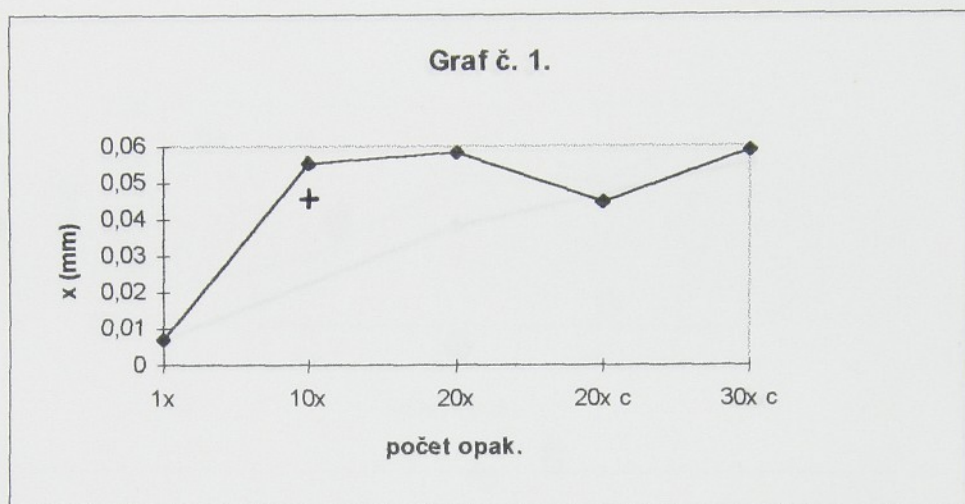
Obrázek 3.2.1.



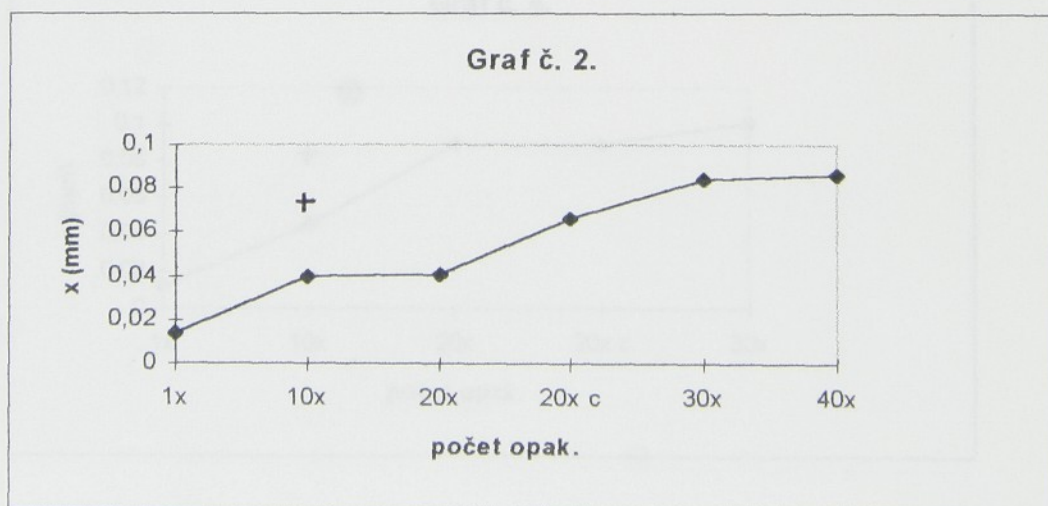
3.2.1 Výsledky měření

Na základě naměřených hodnot (viz. příloha č.3.) byly zkonstruovány grafy závislosti hloubky řezné spáry na počtu opakování. Křížkem je v grafech označen režim s překrytím + přerušný cyklus.

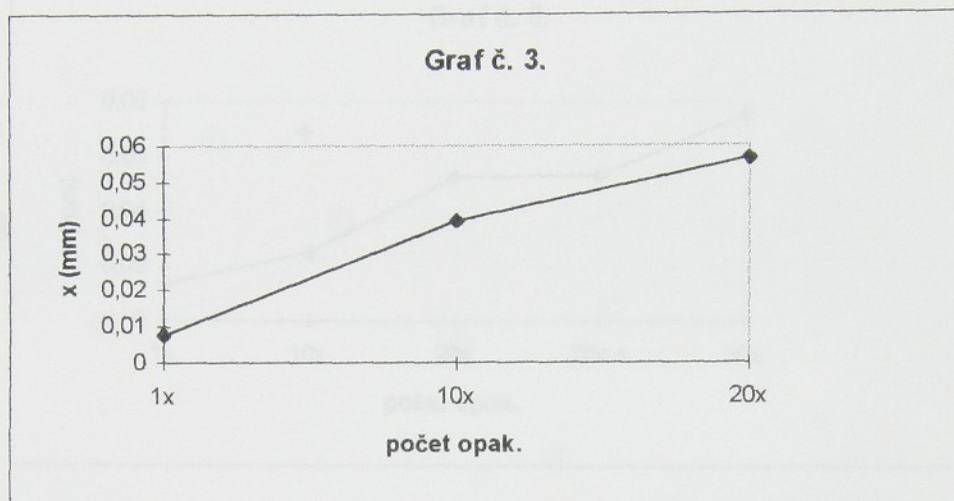
Materiál 19 312 A



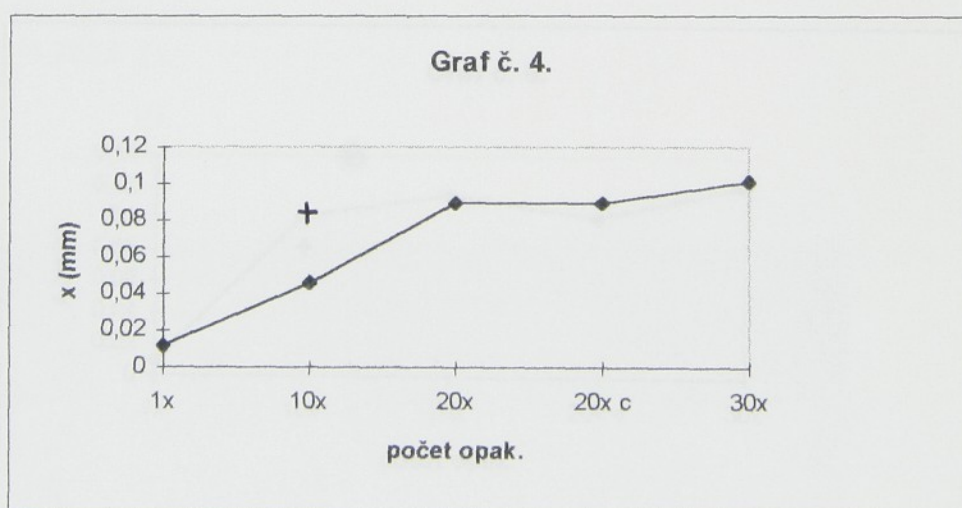
Materiál 19 312 K



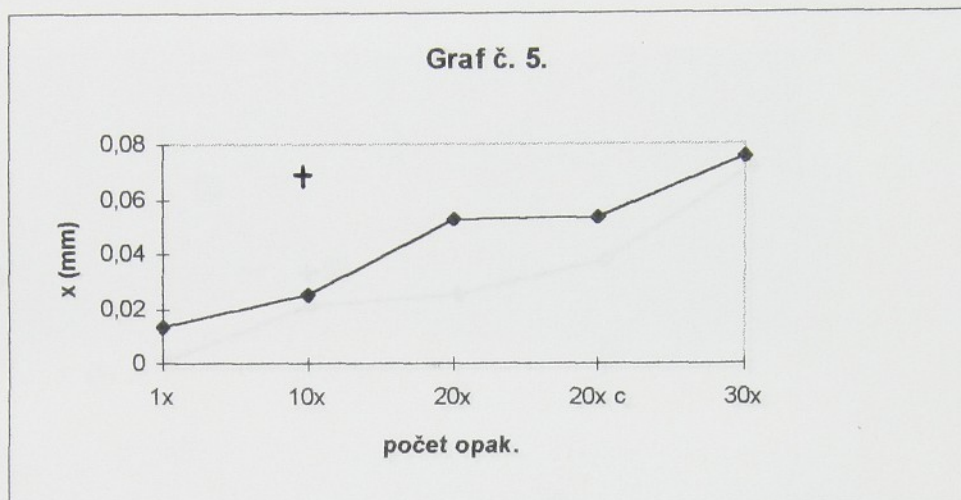
Materiál 19 436 A



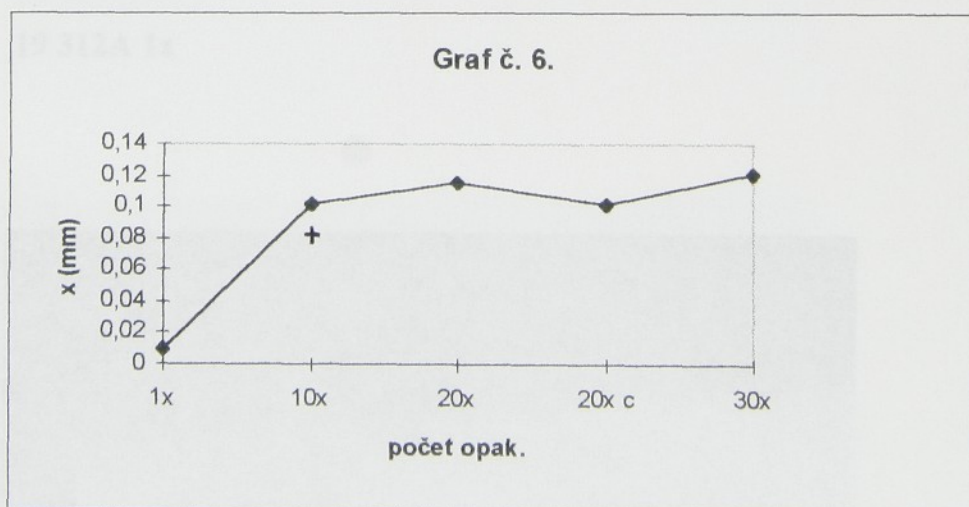
Materiál 19 436 K



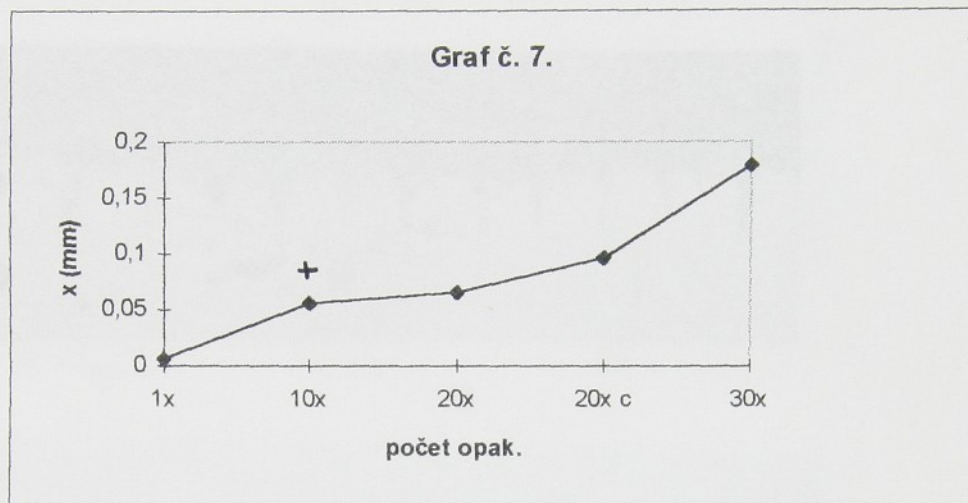
Materiál 19 663 K



Materiál 19 802 K



Materiál 19 857 K



Pro obsáhlejší popsání tohoto měření, byla zhotovena fotodokumentace.

Použitý přístroj: Metalografický mikroskop, NEOPHOT CARL ZEISS JENA

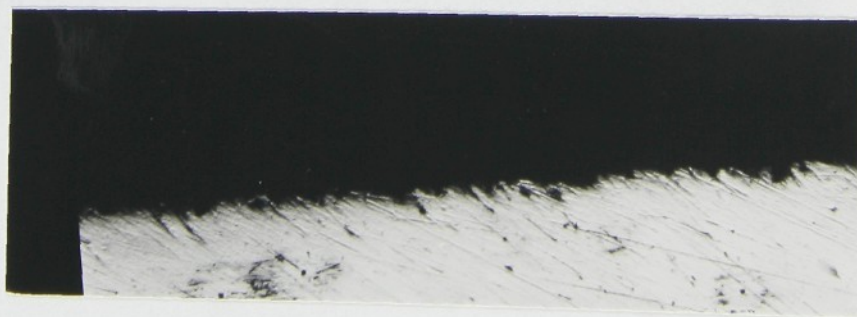
Objektiv: 12,5 x 0,25

Zvětšení: 150x

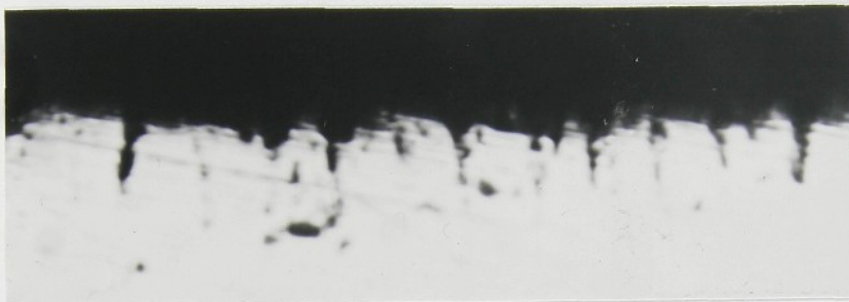
Z hlediska velkého počtu zhotovovaných fotografií, byl volen pouze výběr z celkového počtu opakování projetí laserovým paprskem u jednotlivých materiálů.

Obrázek 3.2.2.

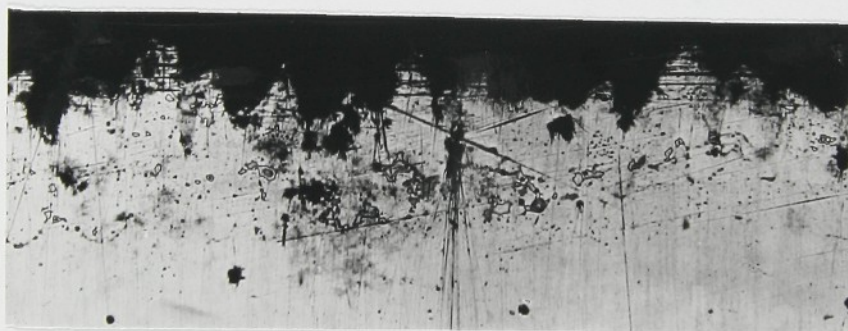
19 312A 1x



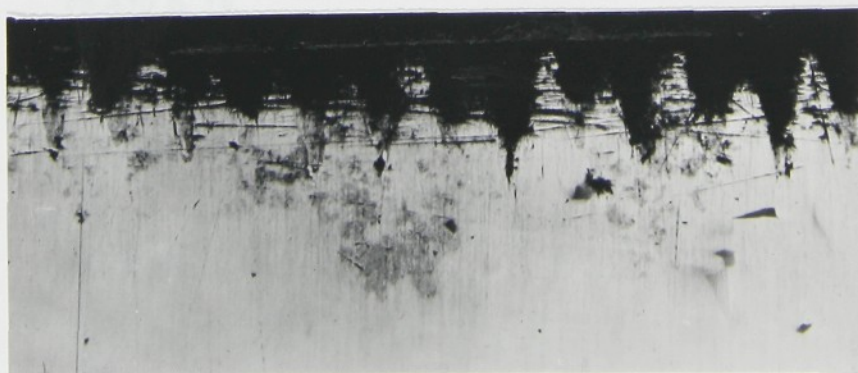
Obrázek 3.2.3. 19 312 A 20x c



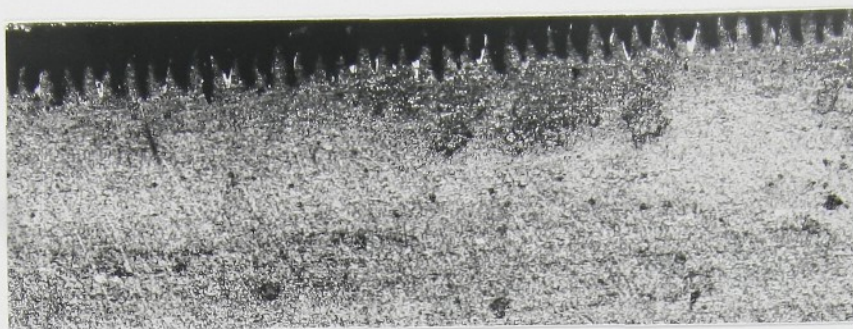
Obrázek 3.2.4. 19 312 K 10x



Obrázek 3.2.5. 19 312 K 30x



Obrázek 3.2.6. 19 312 K 40x



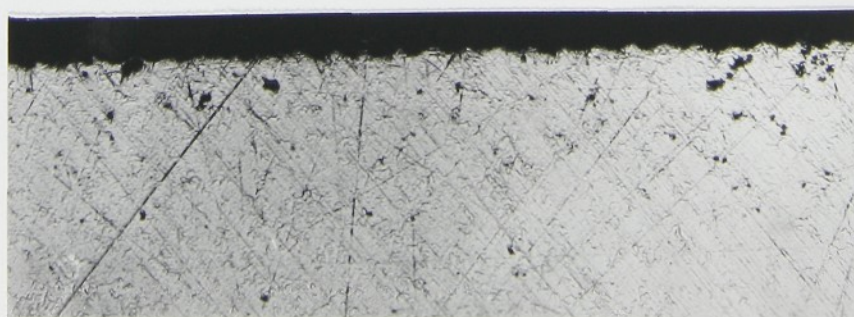
Obrázek 3.2.7. 19 436 A 1x



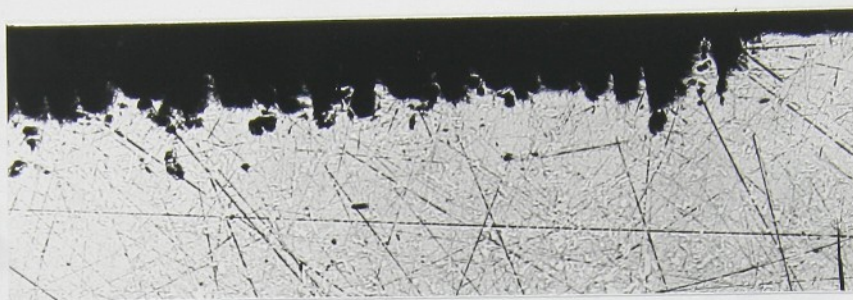
Obrázek 3.2.8. 19 436 A 20x



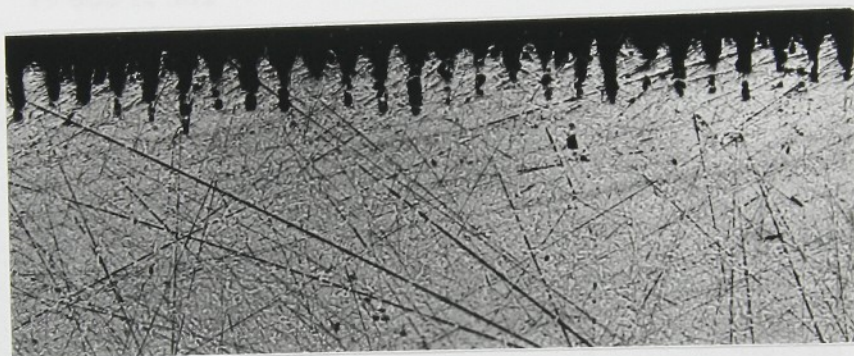
Obrázek 3.2.9. 19 436 K 1x



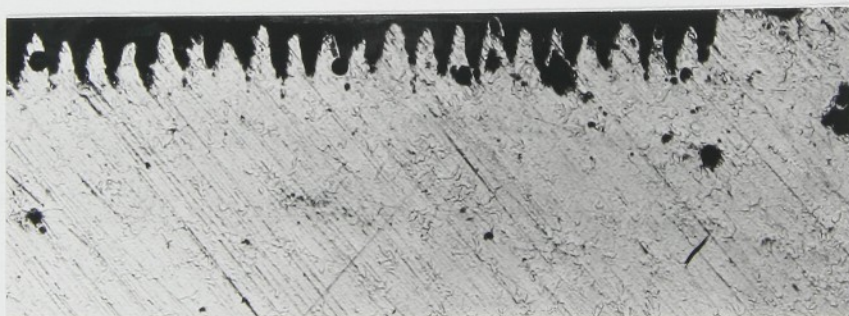
Obrázek 3.2.10. 19 436 K 10x



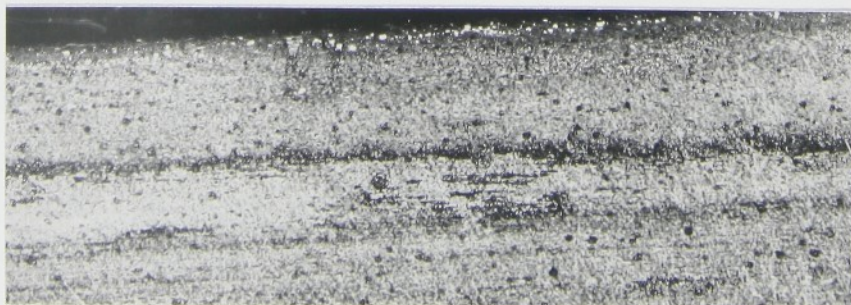
Obrázek 3.2.11. 19 436 K 20x



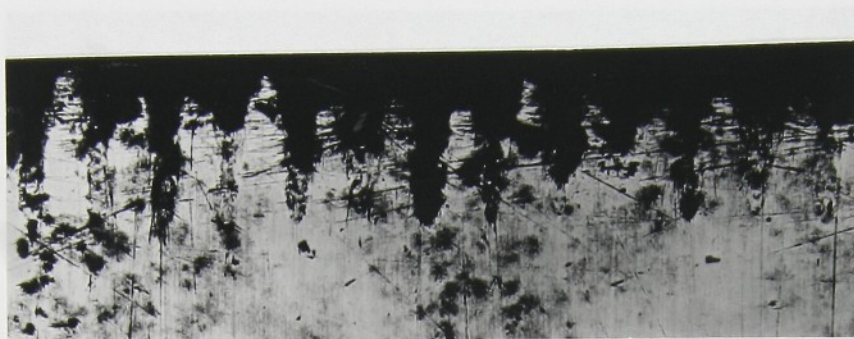
Obrázek 3.2.12. 19 436 K 30x



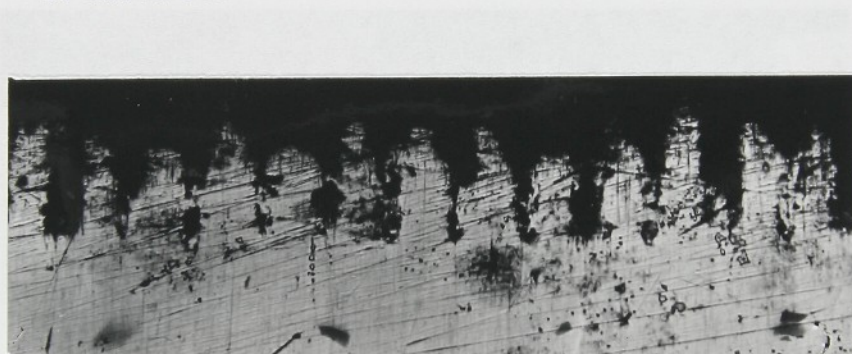
Obrázek 3.2.13. 19 663 K 10x



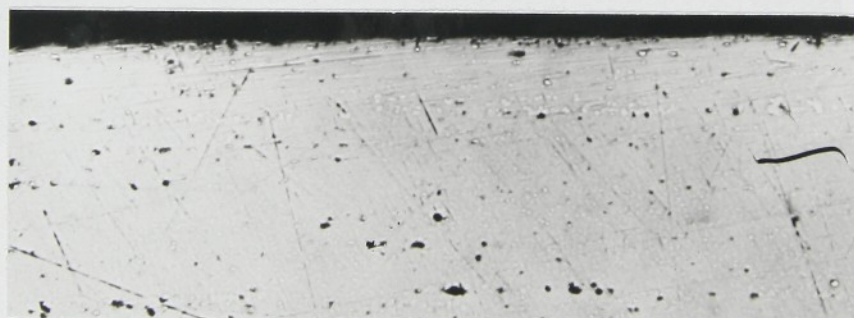
Obrázek 3.2.14. 19 663 K 10x p



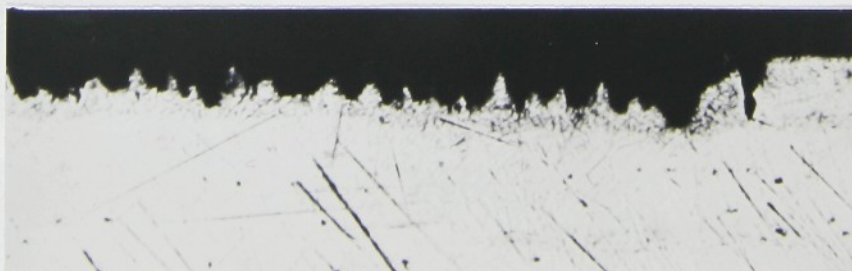
Obrázek 3.2.15. 19 663 K 30x

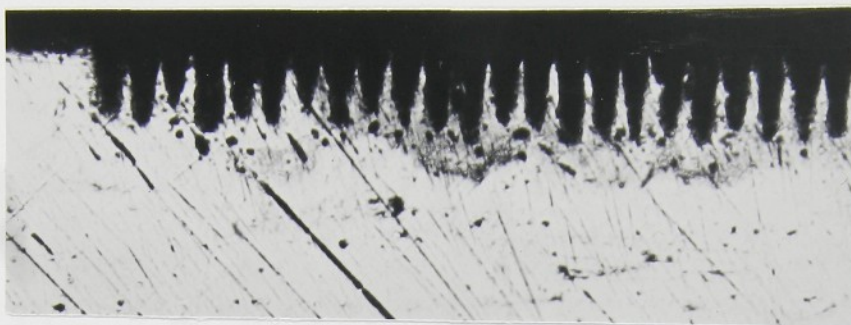
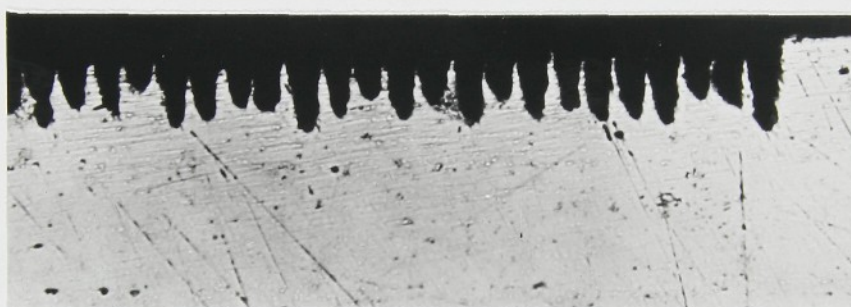
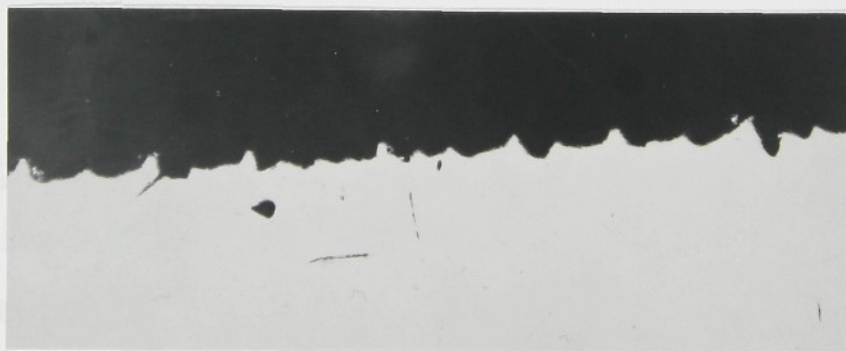
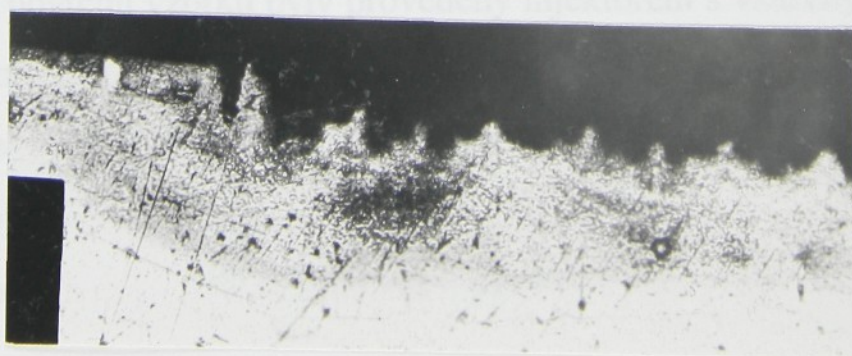


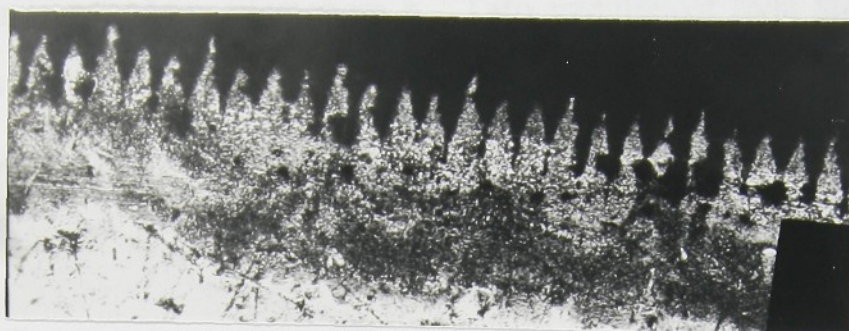
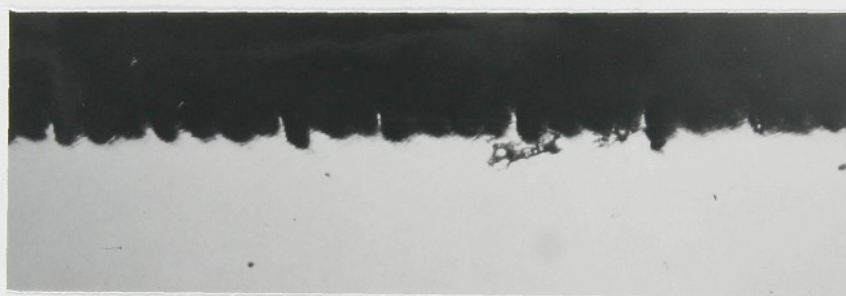
Obrázek 3.2.16. 19 802 K 1x



Obrázek 3.2.17. 19 802 K 10x p



Obrázek 3.2.18. 19 802 K 20x**Obrázek 3.2.19. 19 802 K 30x****Obrázek 3.2.20. 19 857 K 10x****Obrázek 3.2.21. 19 857 K 10x p**

Obrázek 3.2.22. 19 857 K 20x**Obrázek 3.2.23. 19 857 K 30x**

3.3. Závislost mikrotvrdosti na hloubce pod povrchem

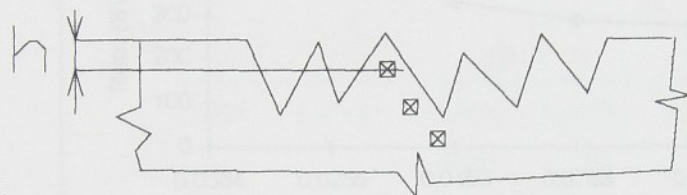
Měření mikrotvrdosti bylo uskutečněno na stejném přístroji Zwik 3212. Daná úloha se uskutečnila ve dvou etapách:

- provedení vtisku do povrchu vzorku mikrotvrdoměrem,
- určení vzdálenosti vtisku od povrchu vzorku.

Vtisky do povrchu vzorku byly provedeny injektorem s vsazeným diamantovým hrotem. Hmotnost použité zátěže 0.05 kg. Rozmístění vtisků je uvedeno na obr., počet vtisků byl 5. Na základě změřených úhlopříček daného vtisku lze odečíst na počítači připojeném na měřicí přístroj hodnotu mikrotvrdosti v HV. Toto měření bylo provedeno jen u několika vybraných materiálů a pro určitý počet opakování.

Dalším krokem se určila vzdálenost jednotlivých vtisků od povrchu vzorku. V daném obrázku je označena písmenem h . Tato vzdálenost byla stanovena stejnou metodou jako v kapitole 2.1.2.

Na přání zadavatele se dodatečně provedlo měření závislosti mikrotvrdosti na hloubce v místě tepelně neovlivněného materiálu. Na základě porovnání hodnot mikrotvrdosti je možno stanovit velikost tepelného ovlivnění materiálu.



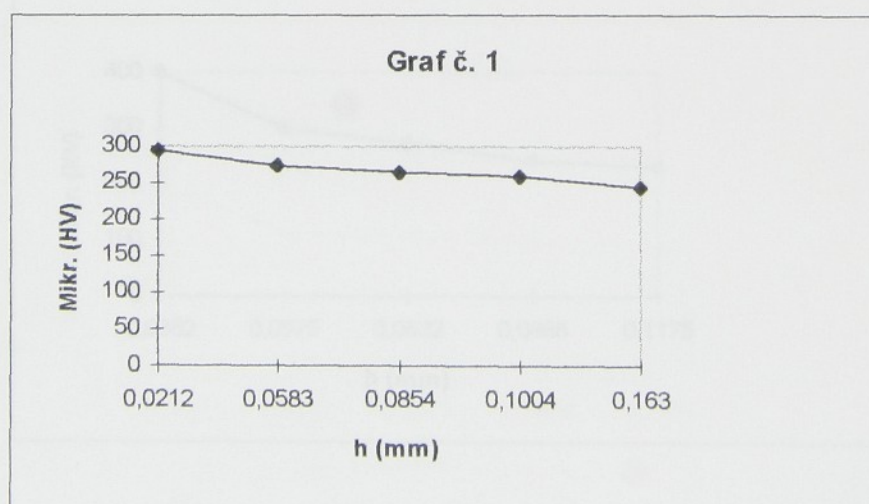
Obrázek 3.3.1.

3.3.1 Výsledky měření

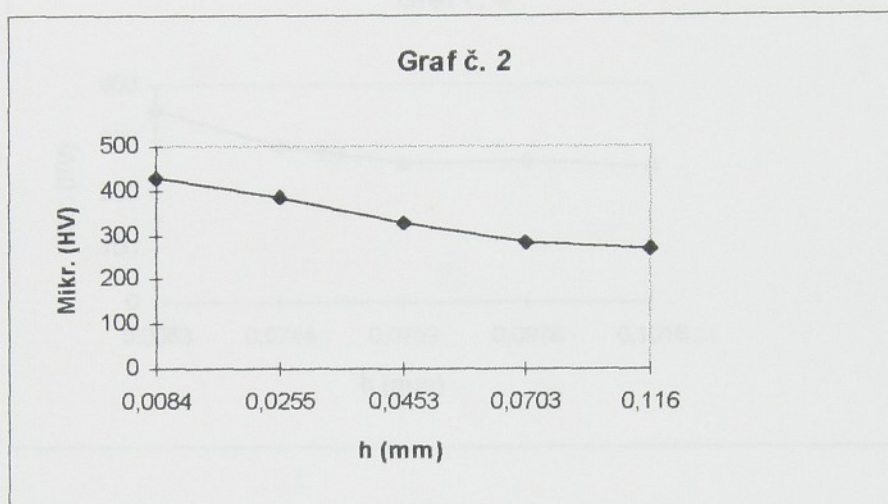
Na základě naměřených hodnot byly zkonstruovány grafy závislosti mikrotvrdosti na hloubce měřené od povrchu vzorku. Křížkem je v grafech označen režim s překrytím + přerušovaný cyklus. Tabulky příslušných měření jsou uvedeny v příloze č. 4.

Materiál 19 312 A

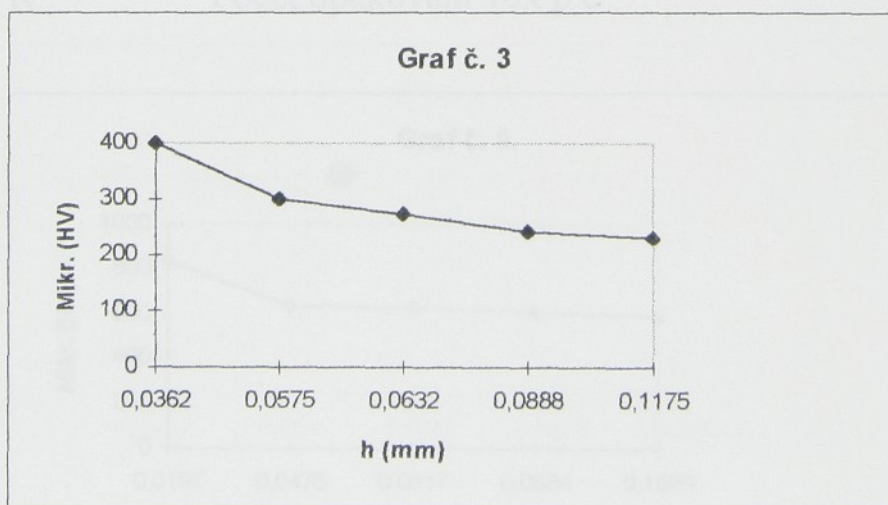
Počet opakování 10x



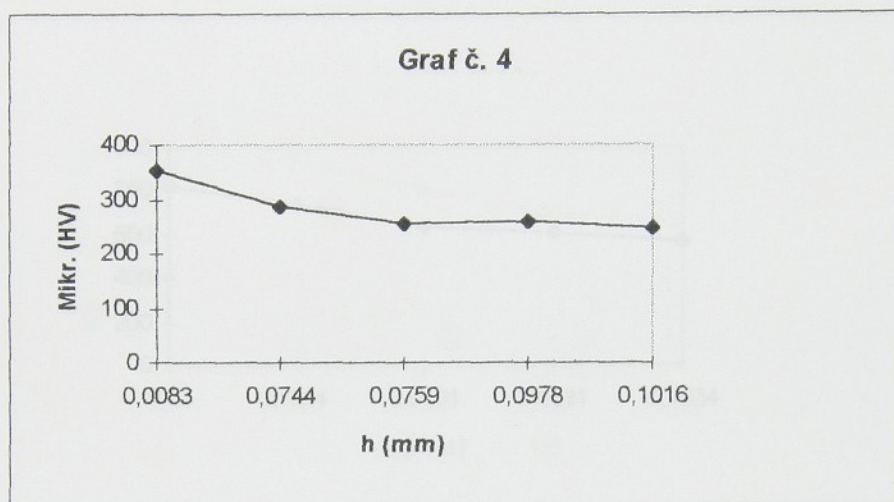
Počet opakování 20x



Počet opakování 20x c

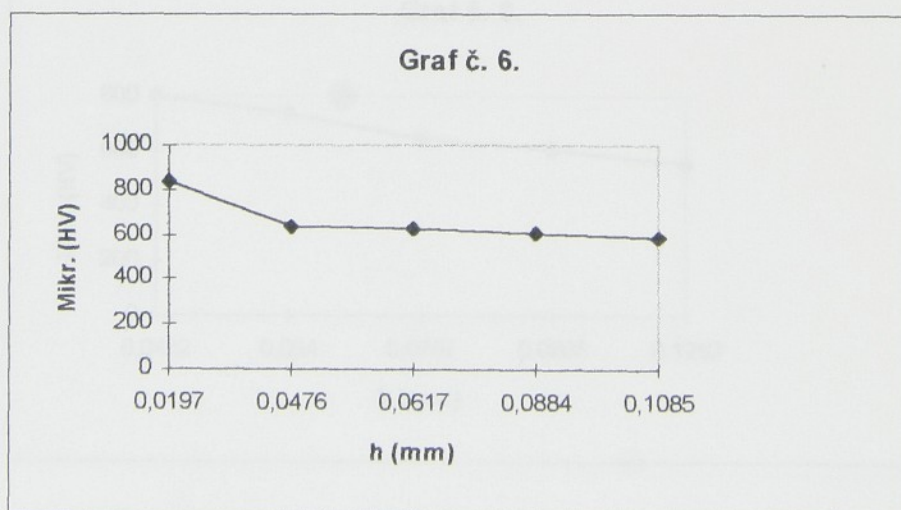


Počet opakování 30x

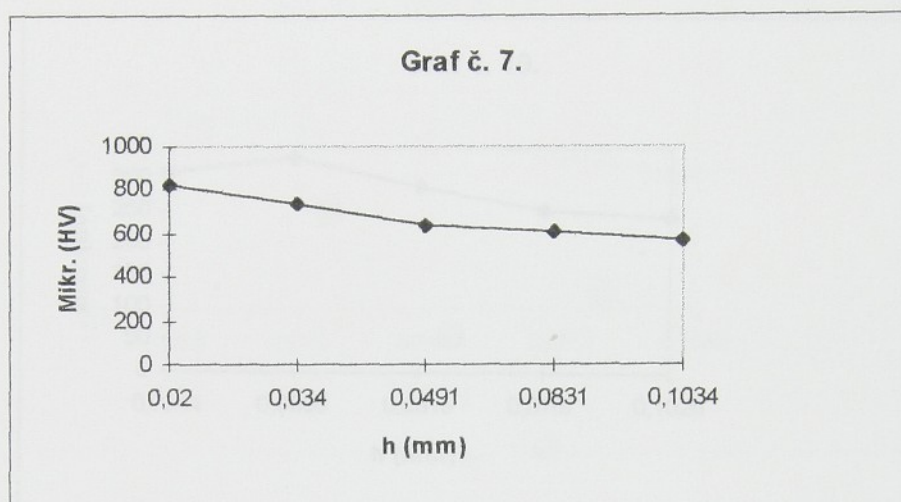


Materiál 19 312 K

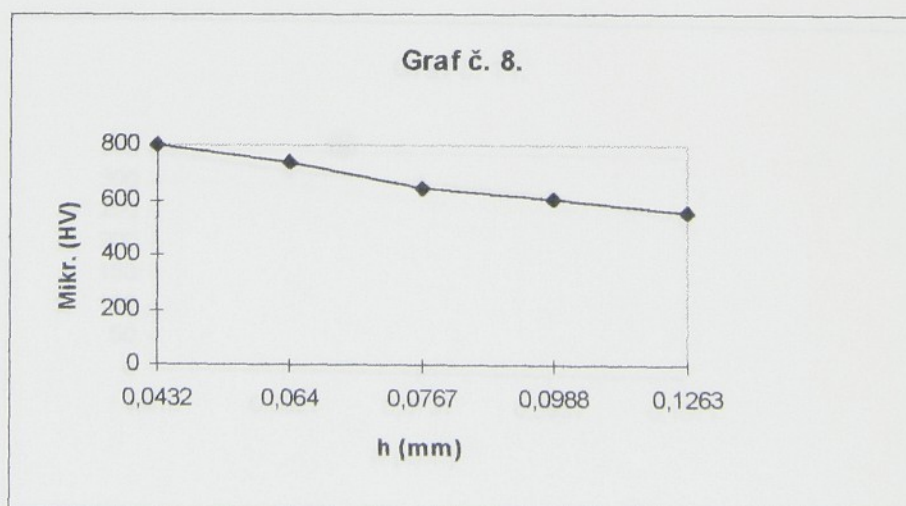
Počet opakování 10x p c



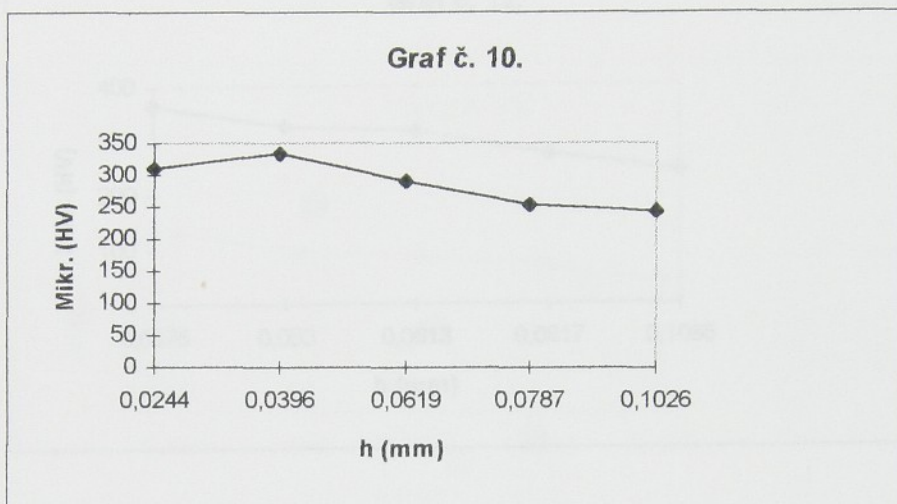
Počet opakování 20x



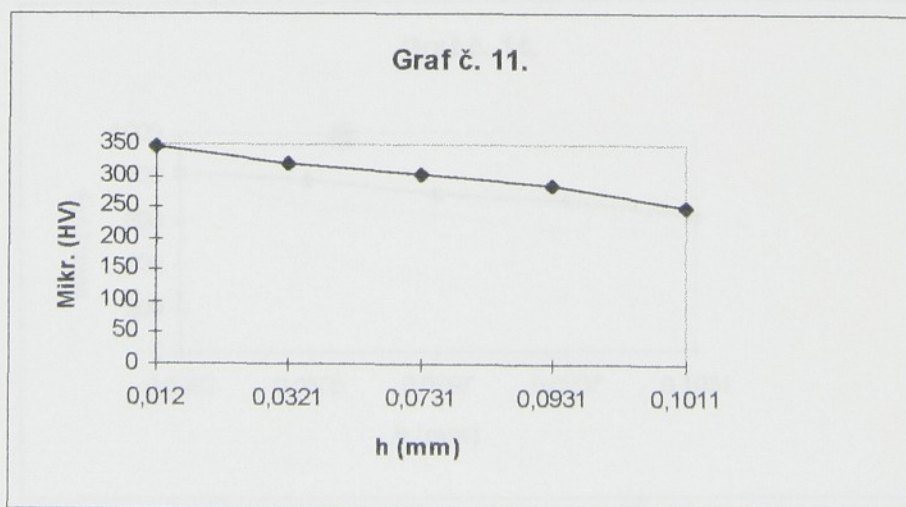
Počet opakování 30x



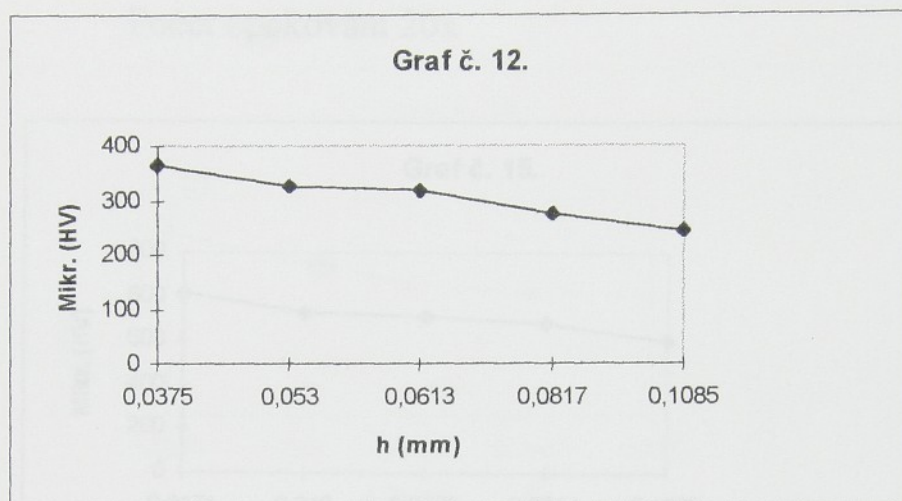
Materiál 19 436 A Počet opakování 1x



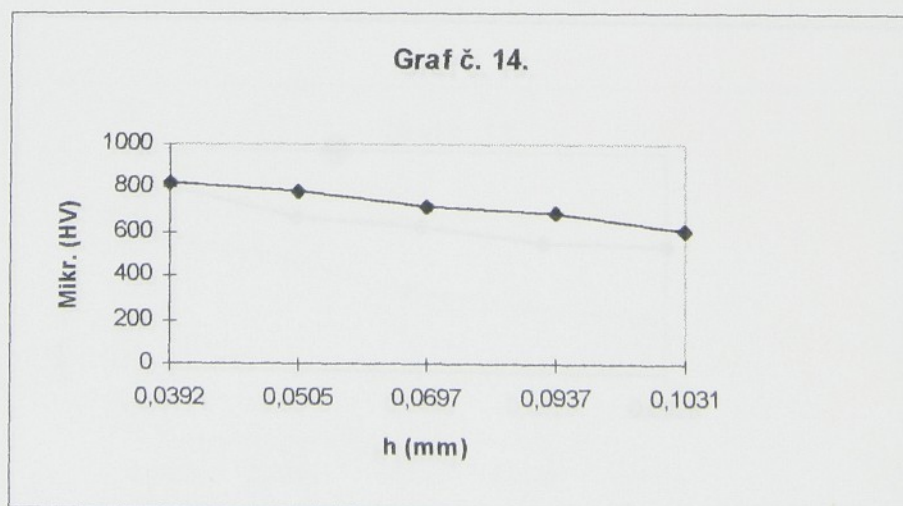
Materiál 19 436 K Počet opakování 10x p c



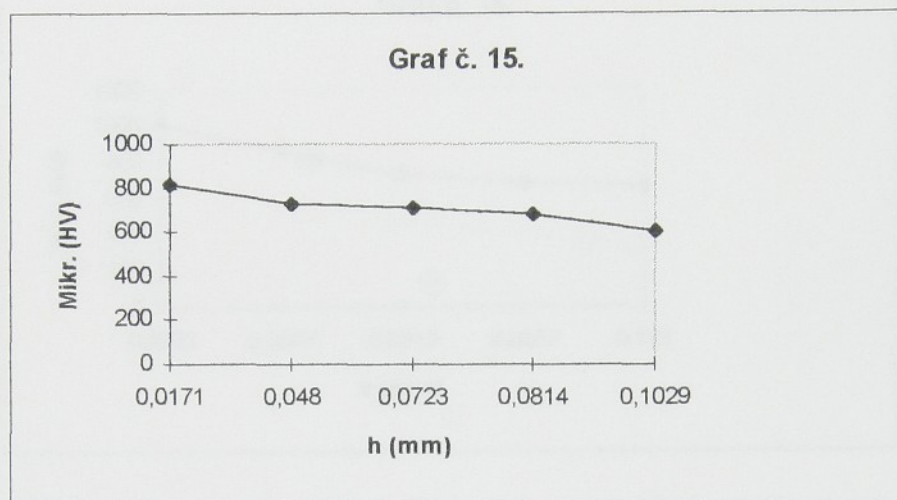
Počet opakování 20x



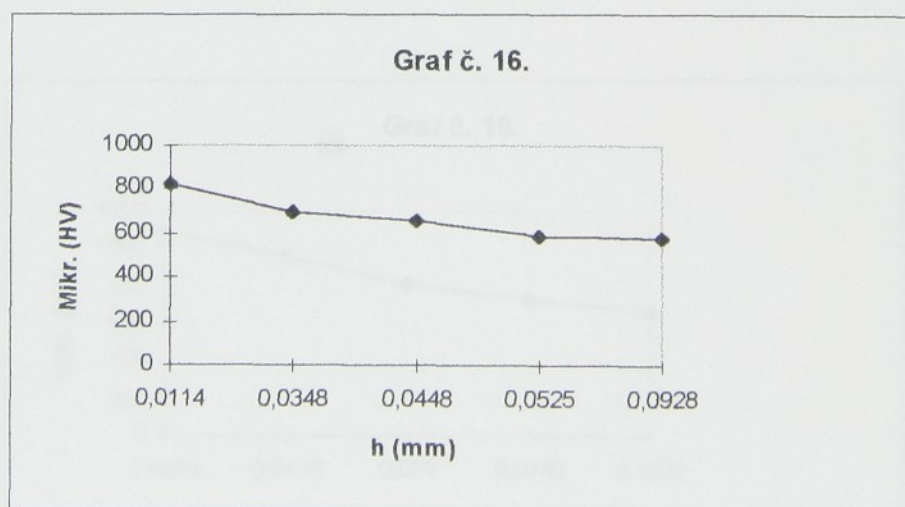
Materiál 19 436 K Počet opakování 10x p c



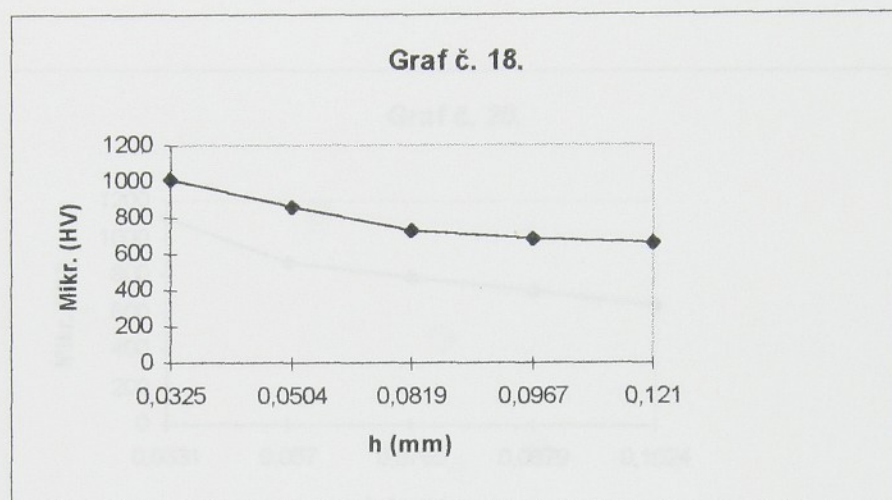
Počet opakování 20x



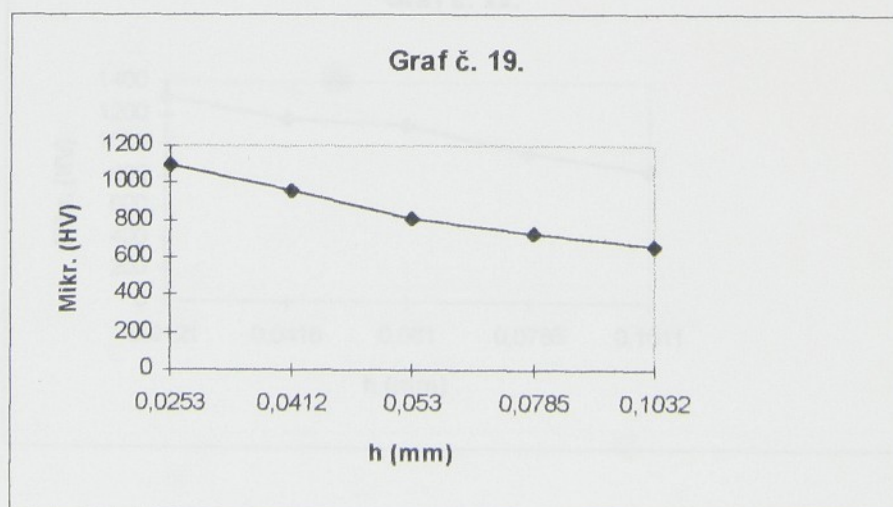
Počet opakování 30x



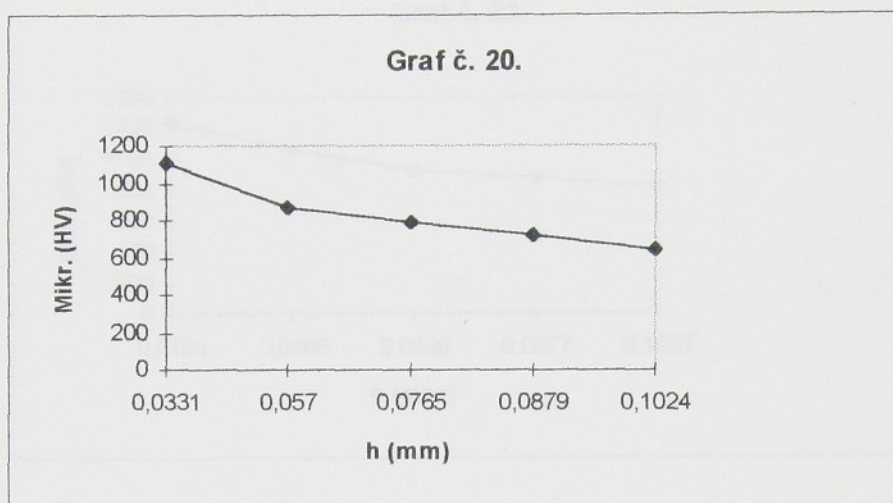
Materiál 19 663 K Počet opakování 10x p c



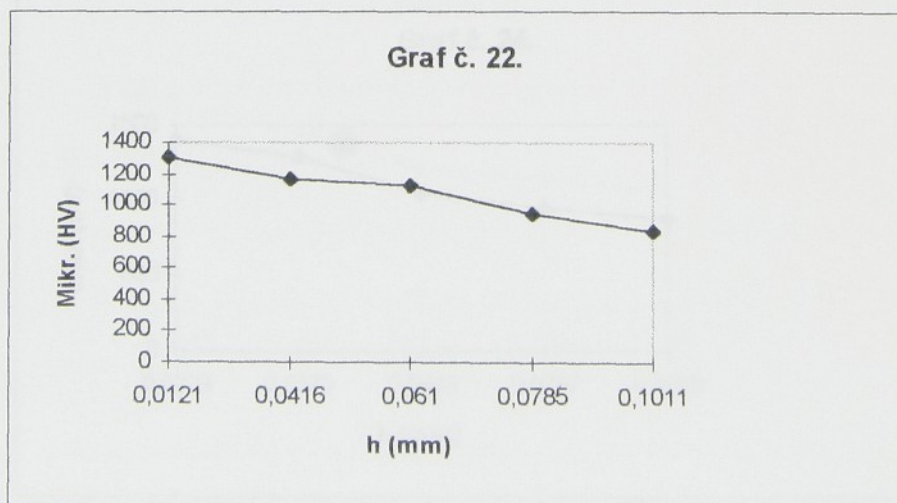
Počet opakování 20x



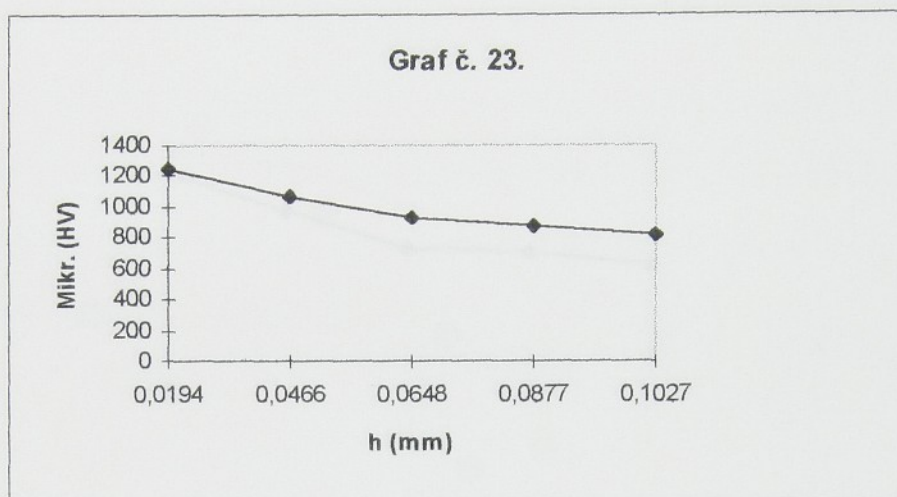
Počet opakování 30x



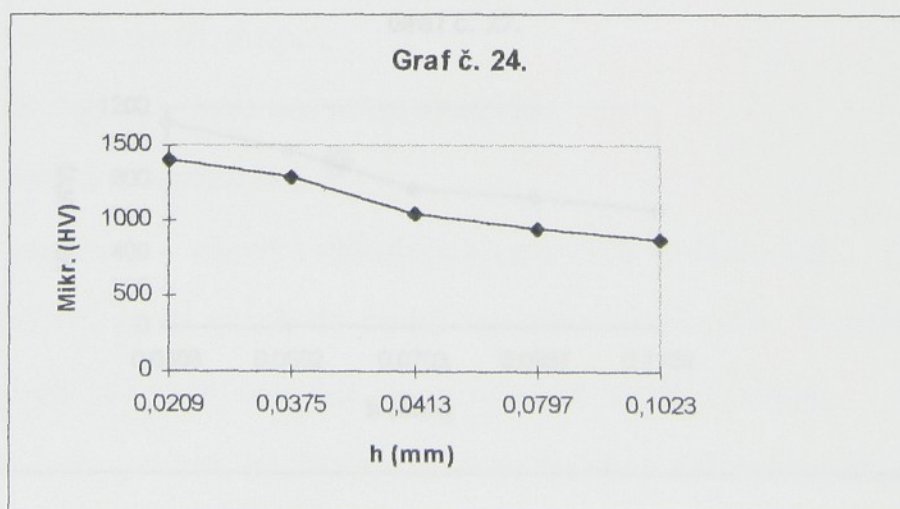
Materiál 19 802 K Počet opakování 10x p c



Počet opakování 20x c

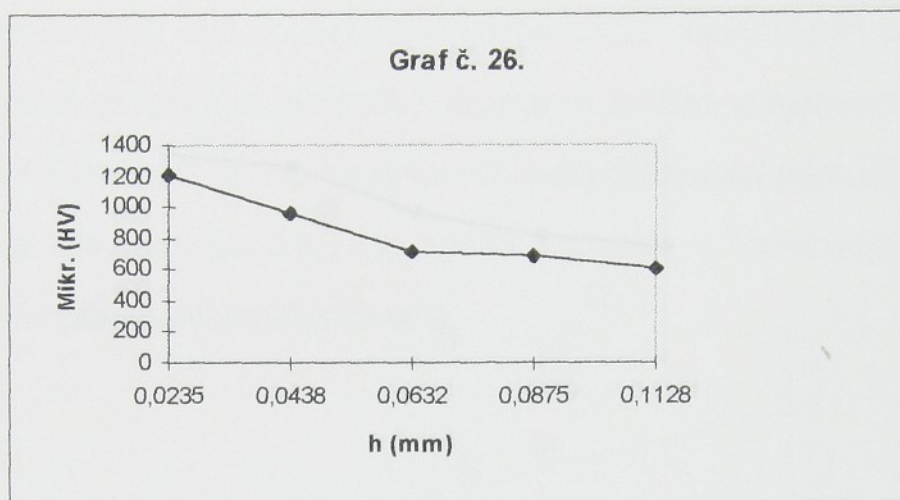


Počet opakování 30x

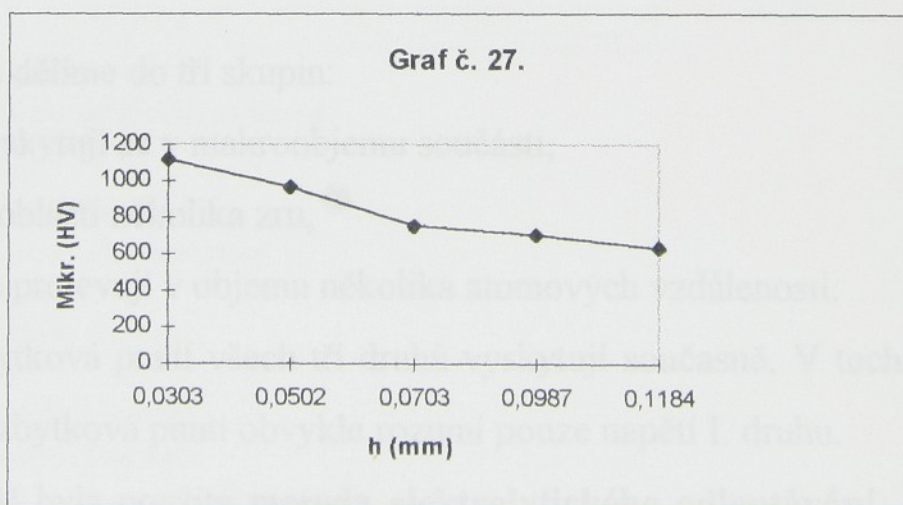


Materiál 19 857 K

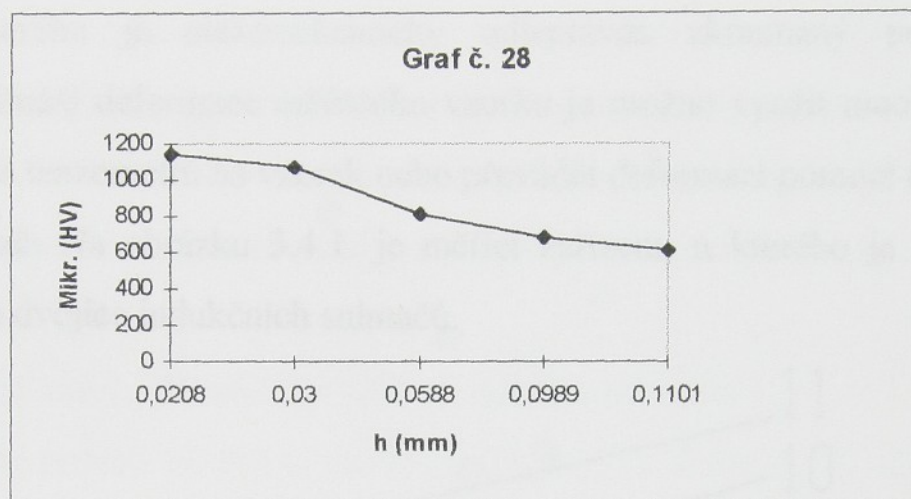
Počet opakování 10x p c



Počet opakování 20x



Počet opakování 30x



3.4. Měření zbytkového pnutí (5,6)

Vnitřní napětí zůstávající v součásti i po odstranění příčin, které je způsobily se nazývají **zbytková pnutí**. Vložená nebo vnějšími příčinami vyvolaná napětí musí přesáhnout mez kluzu materiálu nerovnoměrně pouze v určitém objemu vrstvě vzorku.

Zbytková napětí dělíme do tří skupin:

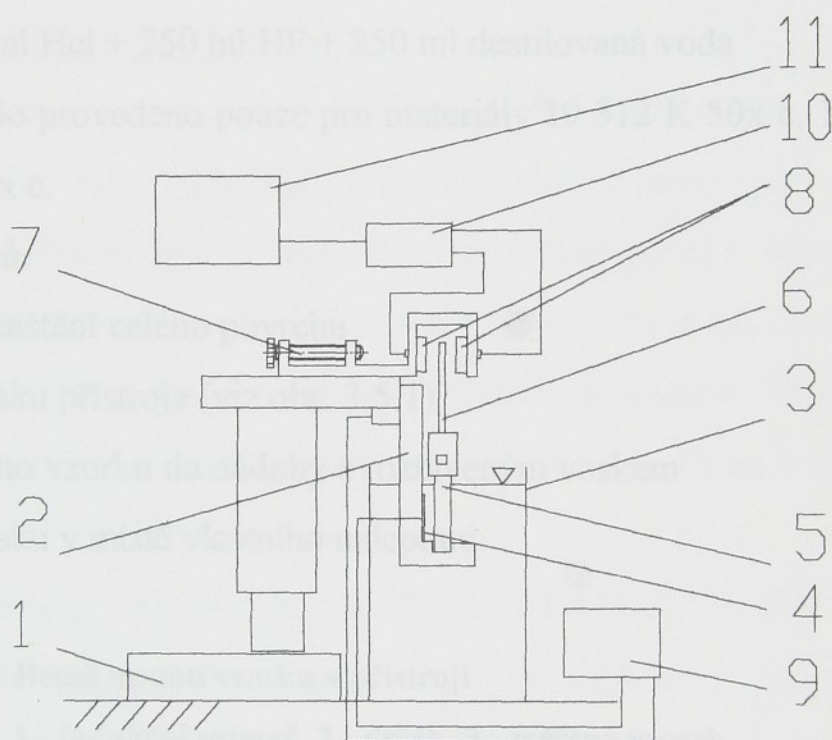
- I. druhu - vyskytují se v makroobjemu součásti,
- II. druhu - v oblasti několika zrn,
- III. druhu - se projevují v objemu několika atomových vzdáleností.

Zpravidla se zbytková pnutí všech tří druhů vyskytují současně. V technické praxi se pod pojmem zbytková pnutí obvykle rozumí pouze napětí I. druhu.

V našem případě byla použita **metoda elektrolytického odleptávání**. Její princip spočívá v odstraňování určitých objemů- vrstev, které obsahují zbytková pnutí. Porušení celistvosti vzorku vyvolá změnu rovnovážného stavu, která se projeví

deformací zbylé části. Ze změřené deformace je pak možno stanovit průměrnou hodnotu napětí, které by způsobilo stejnou deformaci.

metoda elektrolytického odleptávání spočívá v průběžném sledování deformace vzorku, ze kterého je elektrochemicky odleptáván zkoumaný povrch. Ke konkrétnímu snímání deformace měřeného vzorku je možno využít mnoho variant. Např. přilepením tenzometrů na vzorek nebo převádět deformaci pomocí třmenu na elektrický snímač. Na obrázku 3.4.1. je měřící zařízení, u kterého je deformace snímána pomocí dvojice indukčních snímačů.



Obrázek 3.4.1. : Schéma měřícího zařízení

- 1 - stojan
- 2 - upínací třmen
- 3 - nádoba s elektrolytem
- 4 - katoda
- 5 - zkušební vzorek
- 6 - kotva
- 7 - stavitelný šroub
- 8 - indukční snímače
- 9 - zdroj stejnosměrného proudu
- 10 - universální měřící můstek
- 11 - zapisovač

Signál z indukčních snímačů je dále zpracováván elektronickým můstkem, na jehož výstupu je zapojen souřadnicový zapisovač. K řízení konstantního posuvu pisátka slouží časová základna. Výsledkem je tedy časový průběh poloh měřícího členu. Zápis je pak rozdělen podle odleptané hloubky. Přírůstky (úbytky) a hodnota odleptané tloušťky slouží jako vstupní údaje pro výpočtový algoritmus.

Tyto hodnoty (příloha č.5.) byly zpracovány pomocí speciálního programu. Na základě těchto hodnot se zkonstruovaly grafy závislosti napětí na tloušťce odleptané vrstvy (viz. příloha č.7.).

Elektrolyt: 500 ml Hcl + 250 ml HF + 250 ml destilovaná voda

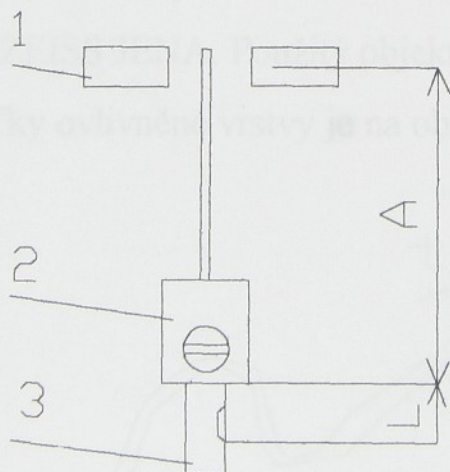
Dané měření bylo provedeno pouze pro materiály 19 312 K 50x c, 19 436 K 10x p c a 19 663 K 50x c.

Příprava vzorků:

1. dokonalé odmaštění celého povrchu
2. upnutí do držáku přístroje (viz obr. 3.5.1)
3. ponoření celého vzorku do nádoby s roztaveným voskem
4. odstranění vosku v místě vlastního naleptání

Obrázek 3.5.1 Detail upnutí vzorku v přístroji

1 - indukční snímač, 2 - držák, 3 - měřený vzorek



Pro zajištění spolehlivé funkce celého zařízení a reprodukovatelnosti výsledků měření je předpokladem, kromě kvalifikované obsluhy, i zajištění pokud možno

neměnných podmínek po dobu každého měření. Mezi tyto faktory lze zahrnout teplota a koncentrace lázně, rovnoměrný výkon stroje, spolehlivost elektrického zařízení.

3.4.1 Výsledky měření

Hodnoty naměřených hodnot a sestrojené grafy jsou uvedeny v příloze č.5 a č.6.

3.5. Měření tloušťky ovlivněné vrstvy

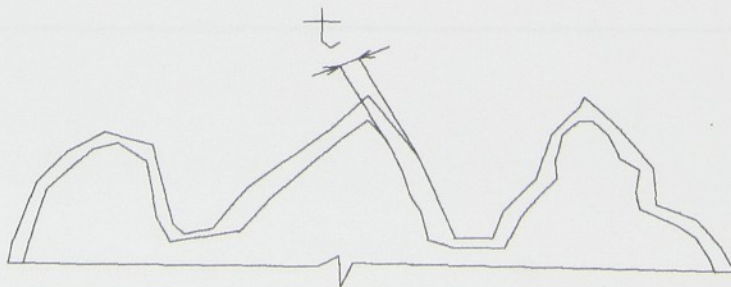
Měření se provádělo na přístroji ZWIK 3212, při zvětšení 600 : 1.

Postup byl obdobný jako v případě zjišťování hloubky řezné spáry viz. kap. 2.1.2. Před vlastním měřením bylo nutné zhotovit metalografické výbrusy vybraných materiálů. Protože povrch vzorků byl dostatečně opracován při předchozím měření (viz. kap. 3.2.) stačilo pouze daný materiál přeleštit a naleptat. Vlastní leptání bylo provedeno pomocí Italu. Opět následovalo omytí vodou a lihem a následné osušení vzorku.

Použité materiály : 19 312 A, 19 436 A, 19 436 K, 19 802 K, 1857 K. Z hlediska přesnějšího popsání tohoto úkolu byly zhotoveny fotografické snímky výbrusů. Fotografování se provedlo na metalografickém mikroskopu NEOPHOT 21 výrobce CARL ZEISS JENA. Použitý objektiv 12,5 x 0,25. Celkové zvětšení 150x.

Detail tloušťky ovlivněné vrstvy je na obr. 3.5.1.

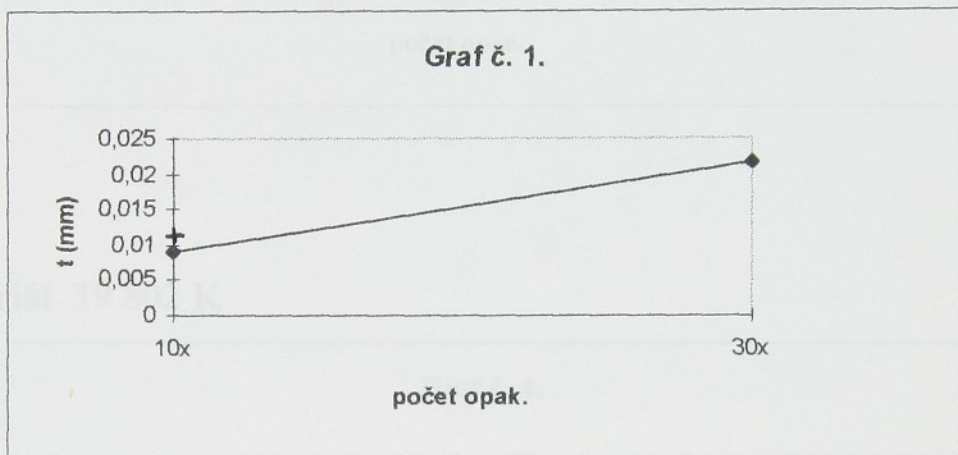
Obrázek 3.5.1.



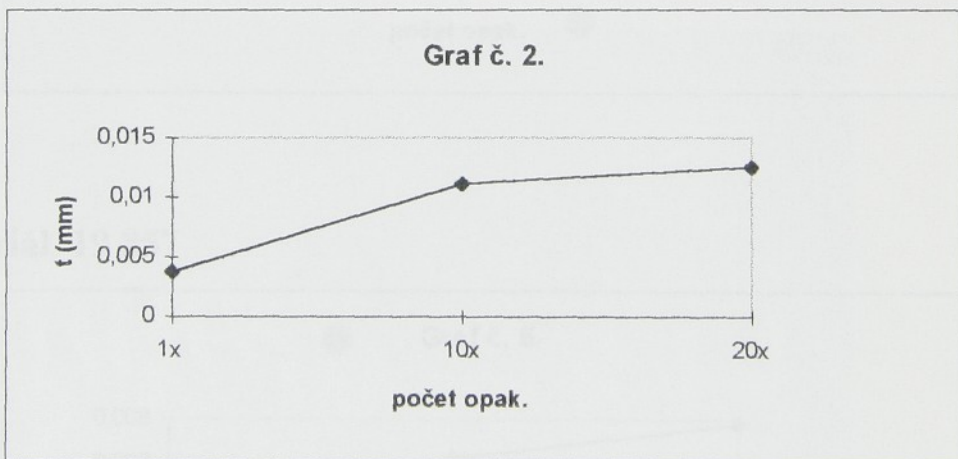
3.5.1 Výsledky měření

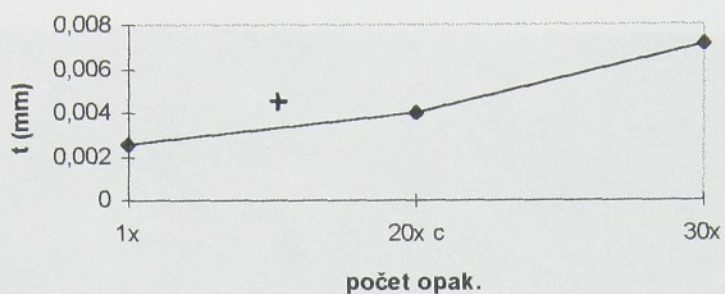
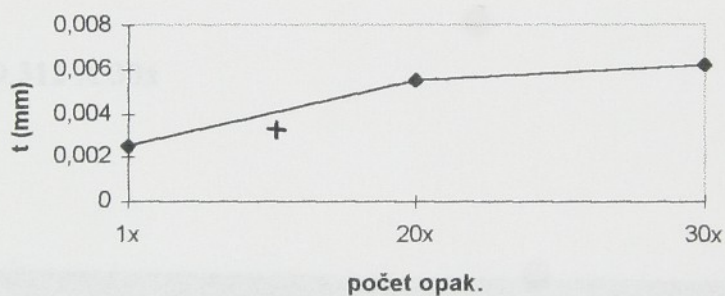
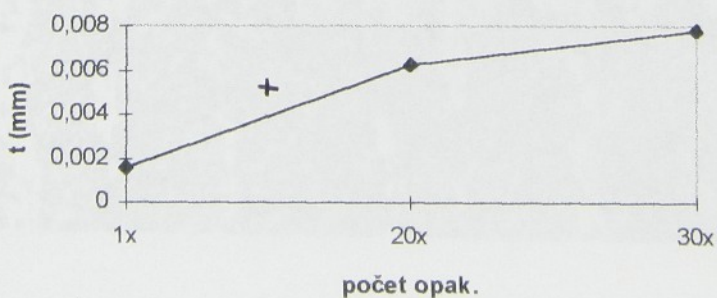
Na základě naměřených hodnot byly zkonstruovány grafy závislosti tloušťky ovlivněné vrstvy na počtu opakování. Křížkem je v grafech označen režim s překrytím + přerušený cyklus. Tabulky naměřených hodnot viz. příloha č. 6.

Materiál 19 312 A



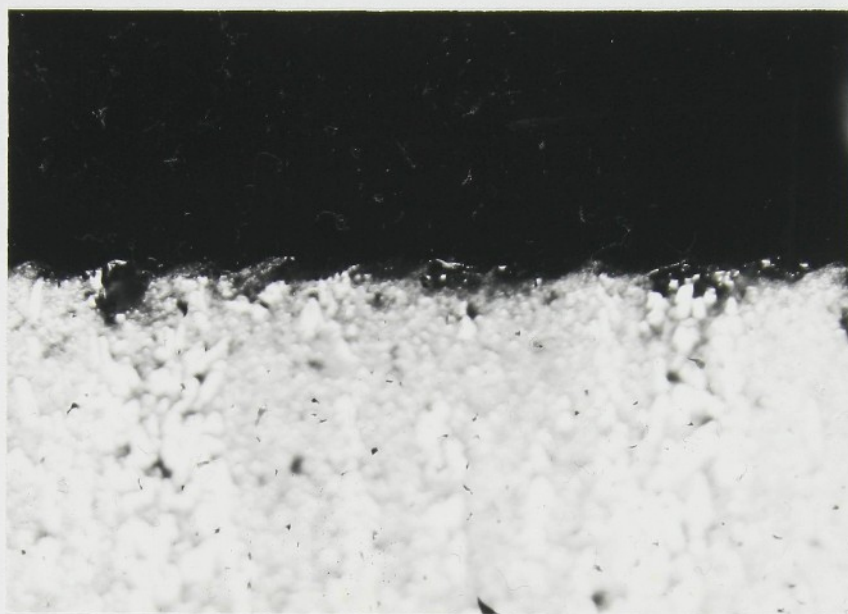
Materiál 19 436 A



Materiál 19 436 K**Graf č. 3.****Materiál 19 802 K****Graf č. 4.****Materiál 19 857****Graf č. 5.**

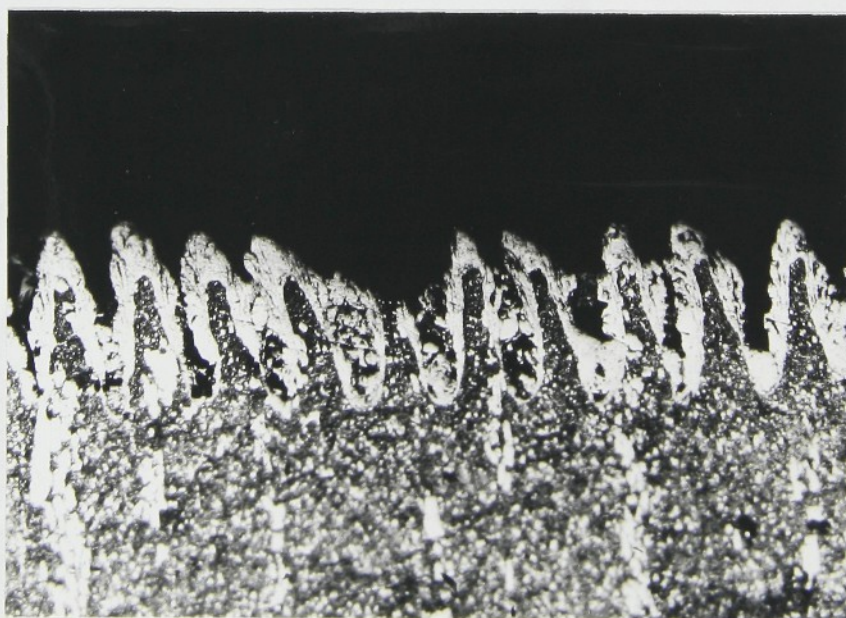
Obrázek 3.5.2.

19 312 A 10x p

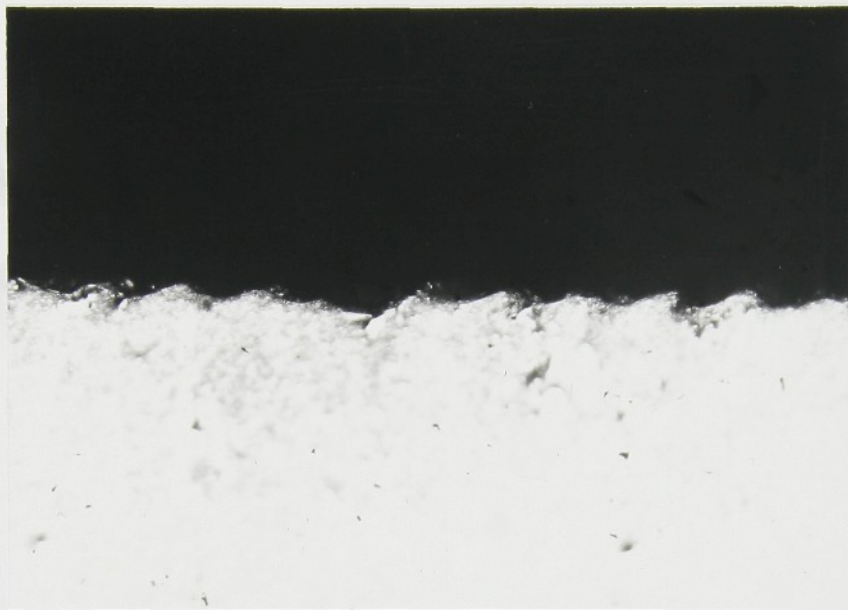


Obrázek 3.5.3.

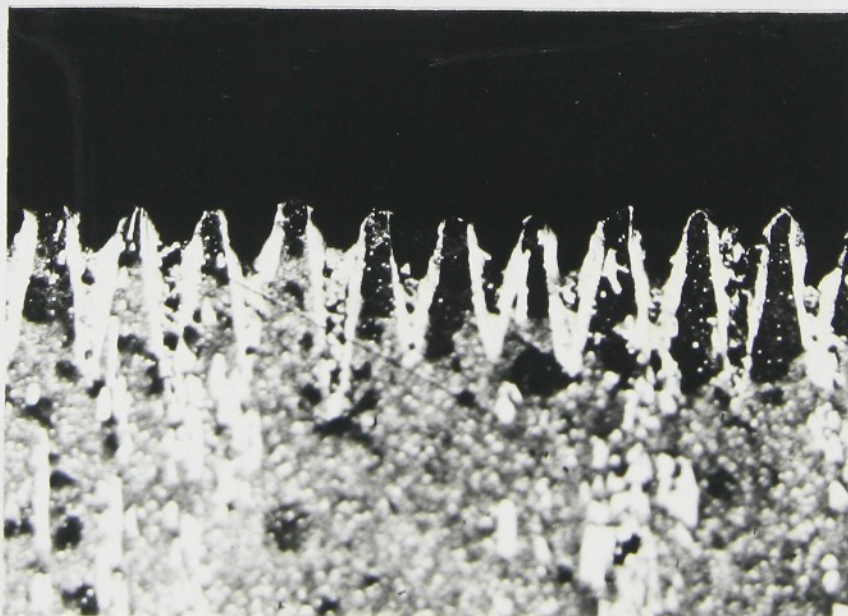
19 312 A 30x



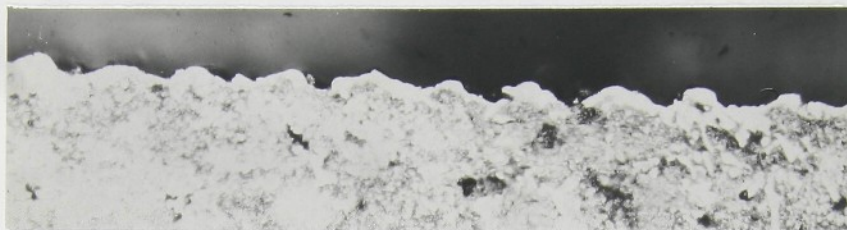
Obrázek 3.5.4. 19 436 A 1x



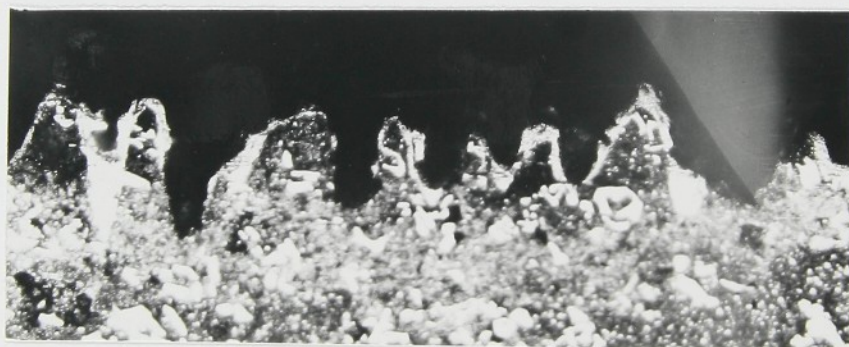
Obrázek 3.5.5 19 436 A 20x



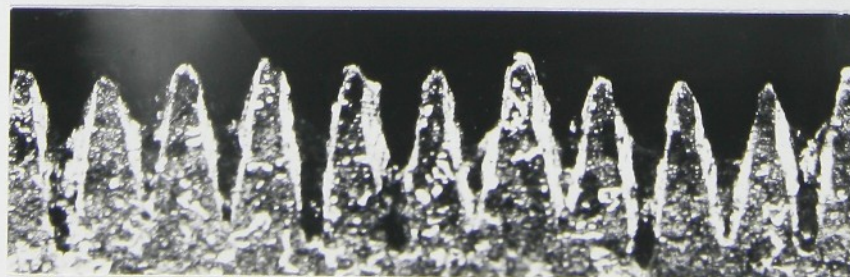
Obrázek 3.5.6 19 436 K 1x

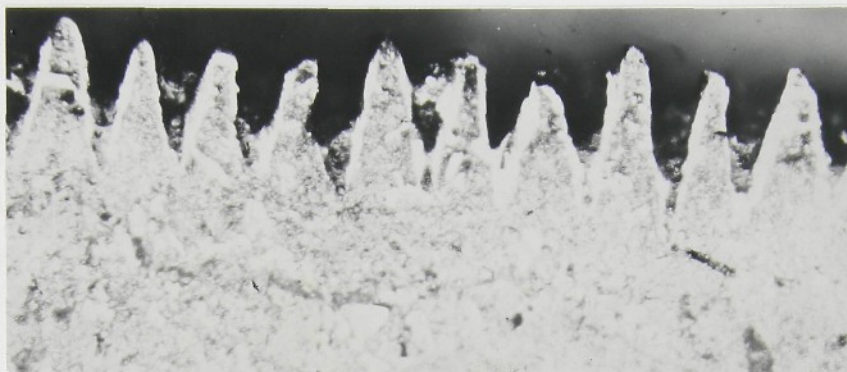
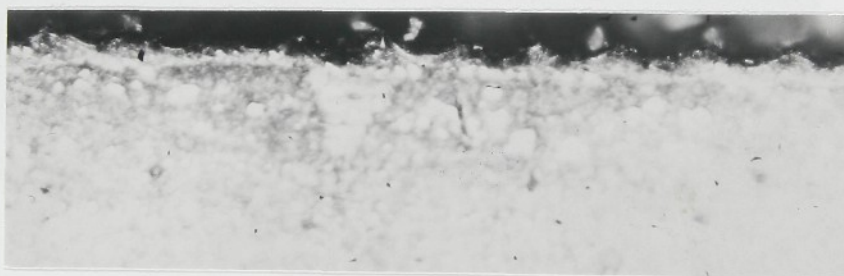
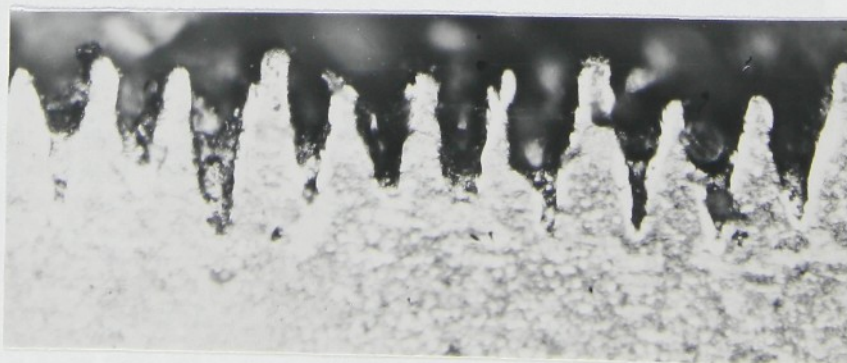


Obrázek 3.5.7. 19 436 K 10x p

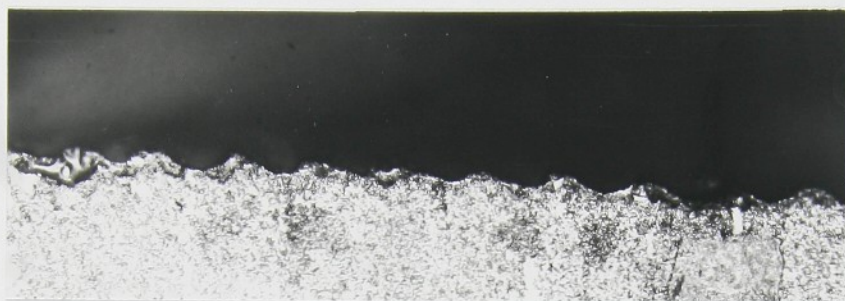


Obrázek 3.5.8. 19 436 K 20x

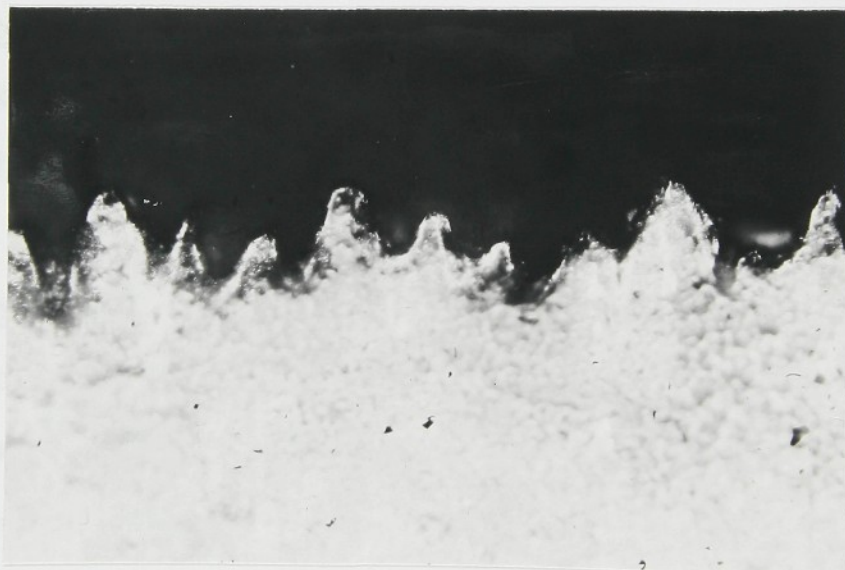


Obrázek 3.5.9.**19436 K 30x****Obrázek 3.5.10.****19 802 K 1x****Obrázek 3.5.11.****19 802 K 30x**

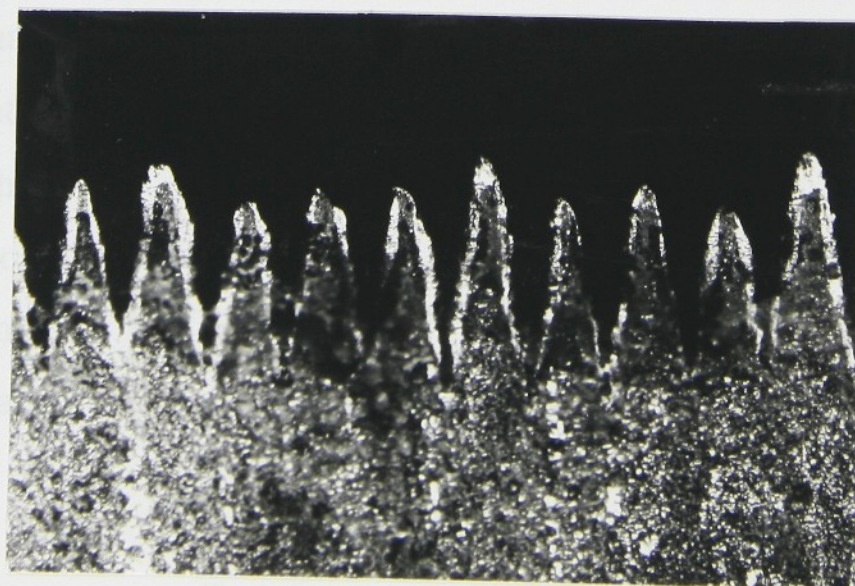
Obrázek 3.5.12. 19 857 K 1x



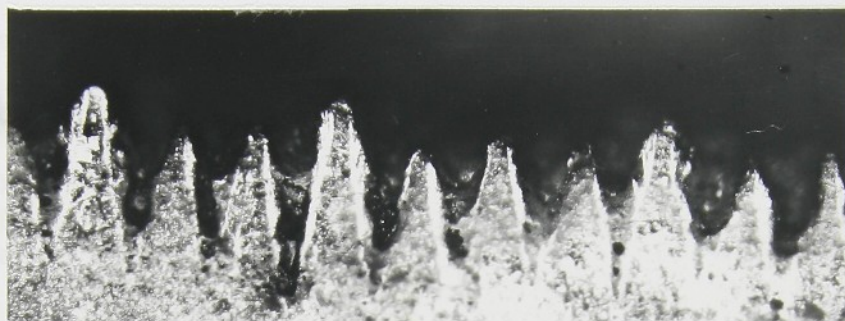
Obrázek 3.5.13. 19 857 K 10x p



Obrázek 3.5.14. 19 857 K 20x



Obrázek 3.5.15. 19 857 K 30x



4. Vyhodnocení

Závěry, které jsou v této kapitole stanoveny platí pouze v rozsahu uvedených naměřených hodnot.

4.1. Měření drsnosti

Měření drsnosti bylo provedeno na vzorcích s počtem opakování projetí laserovým paprskem 1x, 10x, 20x, 30x.

Na základě naměřených hodnot a zkonstruovaných grafů lze s určitostí říci, že hodnota veličiny R_m roste úměrně s vyšším počtem opakování projetí laserového paprsku (viz. kapitola 3.1). Následující hodnocení je provedeno pro materiál 19 436 K (viz. příloha 2. tab. 4.).

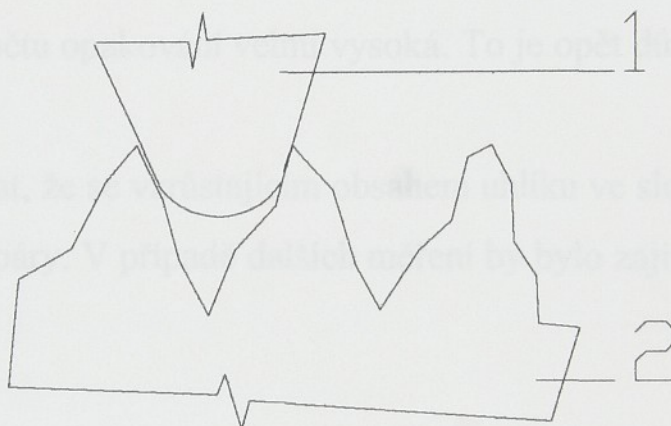
Pro počet opakování 1x **bez překrytí** je hodnota $R_m = 6,7 \mu\text{m}$. U vzorků opracovaných s opakováním 30x **bez překrytí** vzroste hodnota R_m o 90,6 μm .

Materiál obrobený v režimu **bez překrytí s přerušovaným cyklem** v porovnání s předchozím způsobem opracování vykazuje přibližně stejné hodnoty R_m . Vyhodnocovaný počet opakování byl pro tento případ 20x.

Režim s překrytím + přerušovaný cyklus (10xp c)- protože charakter tohoto obrábění je jiný nelze jej proto objektivně porovnávat s ostatními typy režimů. Z tohoto důvodu je v grafech hodnota R_m pro příslušný počet opakování označena křížkem. V tomto případě je $R_m = 37,7 \mu m$.

Z hodnot uvedených v tabulkách je zřejmé, že hodnota R_m se mění také v závislosti na obsahu uhlíku v daných materiálech. Patrný je zejména rozdíl mezi materiály tepelně zpracovanými a nezpracovanými.

Obrázek 4.1.1. 1- hrot snímače, 2- měřený povrch vzorku



Při měření profilometrem došlo k zkreslení výsledků tím, že hrot použitého snímače je příliš velký a vzhledem k velmi malé šířce řezné spáry nelze zajistit dokonalé kopírování reliéfu povrchu (viz. obr. 4.1.1). Daným přístrojem proto není možno přesně změřit hodnotu R_m . Pro její stanovení byly proto použity hodnoty naměřené z výbrusů viz. kapitola 3.2.

4.2. Měření závislosti hloubky řezné spáry na počtu opakování

Dané měření bylo uskutečněno na materiálech obrobených s počtem opakování 1x, 10x, 20x a 30x.

Z grafického znázornění této závislosti (viz. kapitola 3.2.) lze stanovit, že hloubka řezné spáry x roste úměrně se zvyšujícím se počtem opakování projetí laserového paprsku. Opět je zde jako příklad uveden materiál 19 436 K (příloha č.3 tab. 4.).

Porovnáním hodnot hloubky řezné spáry u vzorků obrobených s počtem opakování 1x a 30x oba **bez překrytí** bylo zjištěno rozdíly rozsahu několika setin milimetru (viz. příloha č.3.).

Režim opracování **bez překrytí s přerušovaným cyklem** vykazuje minimální hodnoty rozdíly hloubky řezné spáry oproti režimu **bez překrytí**. Tato skutečnost je byla ověřena pouze pro počet opakování 20x.

Při práci v režimu s **překrytím + přerušovaný cyklus (10x p c)** je hodnota x vzhledem k danému počtu opakování velmi vysoká. To je opět důsledek charakteru opracování.

Dále lze konstatovat, že se vzrůstajícím obsahem uhlíku ve složení materiálů, roste i velikost řezné spáry. V případě dalších měření by bylo zajímavé tuto závislost stanovit.

4.3. Měření závislosti mikrotvrdosti na hloubce pod povrchem

Toto měření bylo provedeno pro počty opakování projetí laserového paprsku 10x, 20x a 30x. Použité pracovní režimy: bez překrytí, bez překrytí + přerušovaný cyklus, s překrytím + přerušovaný cyklus. Z naměřených hodnot vyplývá, že s rostoucí vzdáleností od povrchu vzorku, klesá hodnota mikrotvrdosti (viz. kapitola 3.3). Jako příklad je pro toto měření uveden materiál 19 436 K (příloha 4. tab. 14 - 17).

Pro režim **bez překrytí** je charakteristická vysoká míra ovlivnění základního materiálu. Příčinou tohoto ovlivnění je že, materiál je podrobován ve velmi krátkém časovém úseku několikanásobnému tepelnému zpracování.

Na základě provedených měření lze říci, že režim **bez překrytí s přerušovaným cyklem** je vhodný pro obrábění materiálů u kterých je požadováno malé tepelné ovlivnění. Tato skutečnost je způsobena změnami v procesu obrábění.

Při práci v režimu **s překrytím + přerušovaný cyklus** dochází vlivem změny charakteru obrábění k největšímu tepelnému ovlivnění z předchozích uvedených způsobů obrábění. Tento fakt je zřejmý ze získaných naměřených hodnot.

Porovnáním hodnot mikrotvrdosti v místě opracování 30x bez překrytí a hodnot mikrotvrdosti v oblasti tepelně neovlivněného materiálu, byly zjištěny rozdíly. Tyto difference byly určovány pouze pro $h = 0.025 \text{ mm}$.

19 312 A	80 HV
19 312 K	50 HV
19 436 A	70 HV
19 436 K	52 HV
19 663 K	337 HV
19 802 K	422 HV
19 857 K	412 HV.

Z uvedených hodnot je zřejmé, že u materiálů tepelně zpracovaných dochází k většímu tepelnému ovlivnění než u materiálů tepelně nezpracovaných.

4.4. Měření zbytkového pnutí

Úkolem tohoto měření bylo zjistit velikost a druh zbytkového pnutí u opracovaných vzorků (viz kap. 3.4.). Použité materiály vzorků a počet opakování + pracovní režimy: 19 312 K 50x c, 19 436 K 10x p c a 19 663 K 50x c.

Z hlediska přesného měření musí být zajištěno plynulé a rovnoměrné naleptání vzorků. To však vzhledem k velké drsnosti opracovaných ploch není možné. Dané měření nelze proto označit jako směrodatné. Dalším faktorem, který ovlivňuje vlastní zkoušku je např. odečítání křivky ze zapisovače. Na jeho činnosti se projeví

každý výkyv elektrické energie v síti např. při vypnutí nebo zapnutí strojů s větším příkonem, které jsou umístěny ve stejné hale.

Na základě daného měření lze zjistit přítomnost nepříznivých tahových napětí v povrchu vzorků. Mikrofrézovaná plocha tvoří do profilu povrchu materiálu, ostrý vrub. Vzniklé tahové napětí proto mohou nepříznivě ovlivnit únavové vlastnosti vzorku.

Mechanismus vzniku zbytkových napětí:

V průběhu vlastního procesu opracování dochází k několikanásobnému natavení základního materiálu ve velmi krátkém časovém intervalu. Následné smršťování materiálu při jeho chladnutí je doprovázeno vznikem tahových napětí v povrchové vrstvě.

4.5 Měření tloušťky ovlivněné vrstvy

Toto měření bylo provedeno pouze pro materiály 19 312 A, 19 436 A, 19 436 K, 19 802 K, 1857 K a počty opakování 1x, 10x, 20x, 30x. Použité pracovní režimy: bez překrytí a s překrytím + přerušovaný cyklus.

Tloušťka ovlivněné vrstvy závisí na několika faktorech. Mezi některé z nich patří např. chemické složení materiálu, stupeň tepelného zpracování a způsob obrábění. Pro tento případ je vyhodnocována závislost tloušťky ovlivněné vrstvy t na počtu opakování projetí laserovým paprskem.

Na příkladu jsou uvedeny hodnoty t s ohledem na způsob opracování pro materiál 19 436 K.

bez překrytí: hodnota tloušťky ovlivněné vrstvy pro počet opakování 1x a 30x se liší o 0,0014 mm, přičemž pro 1x je $t = 0,0025$ mm.

s překrytím + přerušovaný cyklus: tloušťka této ovlivněné vrstvy je pro režim 10x 0,0058 mm.

Na základě naměřených hodnot a sestrojených grafů (viz. kap. 3.5.) je možno konstatovat, že s větším počtem opakování vzrůstá tloušťka ovlivněné vrstvy. Dále

lze stanovit, že u materiálů tepelně nezpracovaných je tato tloušťka větší na rozdíl od materiálů tepelně zpracovaných.

5. Závěr

Úkolem této diplomové práce bylo podrobně popsat a vyhodnotit jakost povrchu materiálu po mikrofrézování laserem. Je zde uveden způsob provedení daných zkoušek a jejich následné vyhodnocení. Z hlediska obsáhlejšího zdokumentování tohoto úkolu by bylo vhodnější v budoucnosti věnovat každému měření speciální pozornost.

Metodika zkoušek zahrnuje:

- ◆ měření drsnosti,
- ◆ měření závislosti hloubky řezné spáry na počtu opakování projetí laserového paprsku,
- ◆ měření závislosti mikrotvrdosti na hloubce pod povrchem,
- ◆ měření zbytkového pnutí,
- ◆ měření tloušťky ovlivněné vrstvy.

Výsledky získané z těchto měření pomohou rozšířit poznatky v oboru mikrofrézování laserem. Tato diplomová práce patří mezi první z hlediska popsání tohoto problému u nás. Dalším přínosem je možnost optimalizace technologie a následné zvýšení produktivity vlastního procesu obrábění. Laserové technologie jsou velmi progresivní lze tedy očekávat jejich další uplatnění v průmyslové výrobě. Nevýhodou dané technologie je v současné době pouze pořizovací cena daného zařízení, která je však vyvážena kvalitním a rychlým provedením příslušného opracování.

6. Seznam použité literatury

1. Ing. Schmiedberger P., CSc.: Fyzikální technologie - Aplikace laserů v průmyslu, FJFI ČVUT Praha 1987
2. Doc. Ing. Alaxin J., CSc. a kol.: Nauka o materiálu, VŠST Liberec 1990
3. Engest P. - Horák M.: Aplikace laseru, Praha 1989
4. Doc. Ing. Anna V. - Doc. Ing. Vrškový M.: Výrobní stroje, procesy a zariadenia ,III VŠT Košice 1989
5. Komenda D.: Metodika měření zbytkového pnutí, TU KOM Liberec 1989
6. Novák K.: VŠST KOM Liberec 1994

7. Seznam příloh

Příloha č.1.- Chemické složení a tepelné zpracování mat. vzorků

Příloha č.2.- Měření drsnosti

Příloha č.3.- Měření závislosti hloubky řezné spáry na počtu opakování projetí laserového paprsku

Příloha č.4.- Měření závislosti mikrotvrdosti na hloubce pod povrchem

Příloha č.5.- Měření zbytkového pnutí

Příloha č.6.- Měření tloušťky ovlivněné vrstvy

Příloha č.7.- Grafy zbytkových napětí

Příloha č. 1. - Chemické složení a tepelné zpracování materiálů vzorků

ČSN 19 312 Mn - V

JK: 125 034
Datum schválení: 12.06.68
Datum účinnosti od: 01.07.69
Skupina oceli: nástroje na stříhání a tváření za studena, ruční nástroje, formy, měřidla
Třída odpadu: 002
Barevné označení: hnědá - červená - černá
Druh oceli: elektroocel

Chemické složení oceli:

C	(0.750 - 0,850) %	+/- 0.020 %
Mn	(1.850 - 2.150) %	+/- 0.050 %
Si	(0.150 - 0.350) %	+/- 0.030 %
Cr	0.250 %	
Ni	0.350 %	
P	0.030%	
S	0.035%	
V	(0.100 - 0,200) %	+/-0.020 %

Mechanické vlastnosti oceli 19 312 A

Výrobek: tyče
Provedení: válcováno za tepla nebo kováno
Povrch: okujený
Rozměrová norma: ČSN 42 5516, ČSN 42 5519, ČSN 42 5523
Technické dodací předpisy: ČSN 42 0222
Ozn. mat. a stavu: 19 312.3 žíhaný na měkko
HB: 225

Mechanické vlastnosti oceli 19 312 K

Výrobek: tyče
Provedení: válcováno za tepla nebo kováno
Povrch: okujený
Rozměrová norma: ČSN 42 5516, ČSN 42 5519, ČSN 42 5523
Technické dodací předpisy: ČSN 42 0222
Ozn. mat. a stavu: 19 312.4 kalený
Průměr (hloubka): 20.0
HRC: 61.0

Tepelné zpracování nástrojové oceli 19 312

Tváření: 1050 °C

Kování: 850 °C

Žihání na měkko: (680 - 710) °C

Max. HB: 225

Několik hodin přehřát (podle velikosti kusu), většinou stačí 4h, a pomalu ochlazovat v peci

Žihání na odstranění pnutí: (600 - 650) °C

1-2 hodiny přehřát a pomalu ochlazovat v peci

Kalení olej: (740 - 800) °C

HRC: 63.0

Prokalitelnost: v celém průřezu do průměru (hloubky) - kalení do oleje (0.00 - 35.00) mm

ČSN 19 436 chromová

JK: 125 034

Datu schválení: 12.06.68

Datum účinnosti od: 01.07.69

Skupina oceli: nástroje na stříhání za studena, nástroje na tváření, nástroje na drcení, řezné nástroje, formy

Třída odpadu: 006

Barevné označení: hnědá - modrá - bílá

Druh oceli: elektroocel

Chemické složení oceli:

C (1.800 - 2.050) % +/- 0.020 %

Mn (0.200 - 0.450) % +/- 0.030 %

Si (0.200 - 0.450) % +/- 0.030 %

Cr (11.000 - 12.500) % +/- 0.030%

Ni 0.500 %

P 0.030 %

S 0.035 %

Mechanické vlastnosti ocele 19 436 A

Výrobek: tyče

Provedení: válcováno za tepla nebo kováno

Rozměrová norma: ČSN 42 5516, ČSN 425519, ČSN 42 5523

Technické dodací předpisy: ČSN 42 0222

Označení materiálu a stavu: 19 436.3 žíhaný na měkko
HB: 250

Mechanické vlastnosti oceli 19 436 K

Výrobek: tyče
Provedení: válcováno za tepla nebo kováno
Povrch: okujený
Rozměrová norma: ČSN 42 5516, ČSN 425519, ČSN 42 5523
Technické dodací předpisy: ČSN 42 0222
Ozn., mat. a stavu: 19 436.4 kalený v oleji
Průměr (hloubka) mm: 20.0
HRC: 61

Tepelné zpracování nástrojové oceli 19 436

Tváření: 1050 °C
Kování: 850 °C

Žíhání na měkko: (750 - 780) °C

Max. HB: 250

Několik hodin přehřát (podle velikosti kusu), většinou stačí 4h, a pomalu ochlazovat v peci

Žíhání na odstranění pnutí: (600- 650) °C

1-2 hodiny přehřát a pomalu ochlazovat v peci

Kalení: (930- 980) °C

HRC: 63.0 - 0.0

V oleji, na vzduchu, v solné koupeli 250° C , nebo (400-500) °C

ČSN 19 663 Ni-Cr-Mo-V

JK: 125 034

Datu schválení: 02.09. 69

Datum účinnosti od: 01.01.71

Skupina oceli: nástroje na stříhání, nástroje na tváření za tepla, formy

Třída odpadu: 046

Barevné označení: hnědá - černá - modrá

Druh oceli: elektroocel

Chemické složení oceli:

C	(0.500 - 0.600) %	+/- 0.010%
Mn	(0.500 - 0.900) %	+/- 0.050%
Si	(0.300 - 0.600) %	+/- 0.050%
Cr	(0.900 - 1.300) %	+/- 0.050%

Ni	(1.500 - 1.900) %	+/- 0.050%
P	0.030 %	
S	0.030 %	
Mo	(0.300 - 0.500) %	+/- 0.050 %
V	(0.100 - 0.250) %	+/- 0.020 %

Mechanické vlastnosti oceli 19 663 K

Výrobek:	tyče
Provedení:	válcováno za tepla
Povrch:	okujený
Rozměrová norma:	ČSN 42 5516, ČSN 425519, ČSN 42 5523
Technické dodací předpisy:	ČSN 42 0222
Ozn., mat. a stavu:	19 663.4 kalený v oleji
Průměr (hloubka) mm:	40.0
HRC:	52.0

Tepelné zpracování nástrojové oceli 19 663

Tváření:	1100 °C
Kování:	850 °C

Žihání na měkko: (680 - 700) °C

Max. HB: 255

Několik hodin přehřát (podle velikosti kusu), většinou stačí 4h, a pomalu ochlazovat v peci

Žihání na odstranění pnutí: (600- 650) °C

1-2 hodiny přehřát a pomalu ochlazovat v peci

Kalení v oleji: (840 - 870) °C

HRC: 56.00

Kalení vzduch: (870 - 900) °C

HRC: 49.0

Prokalitelnost: v celém průřezu do průměru (hloubky)

- kalení do oleje (0.00 - 150.00) mm

- kalení na vzduchu (0.00 - 150. 00) mm

ČSN 19 802 rychlořezná

JK: 125 882

Datu schválení: 16.04.66
Datum účinnosti od: 01.04.67
Skupina oceli: řezné nástroje
Třída odpadu: 142
Barevné označení: hnědá - červená - světlemodrá
Druh oceli: elektroocel

Chemické složení oceli:

C	(0.800 - 0.900) %	+/- 0.020 %
Mn	0.450 %	
Si	0.450 %	
Cr	(3.800 - 4.600) %	+/- 0.100 %
P	0.035 %	
S	0.035 %	
Mo	0.500 %	
V	(2.000 - 2.700) %	+/-0.050 %
W	(9.500 - 11.000) %	+ 0.300 %

Mechanické vlastnosti oceli 19 802 K

Výrobek: tyče
Provedení: broušené nebo broušené a leštěné
Povrch: lesklý
Rozměrová norma: ČSN 42 65 19
Technické dodací předpisy: ČSN 42 0134
Ozn. mat. a stavu: 19 802.4 kalený a popuštěný
Průměr (hloubka) mm: 20.0
HRC: 62.0

Tepelné zpracování nástrojové oceli 19 802

Tváření 1100 °C
Kování: 900 °C

Žihání na měkko: (770 - 810) °C

Max. HB: 265

Několik hodin přehřát (podle velikosti kusu), většinou stačí 4h, a pomalu ochlazovat v peci

Žihání na odstranění pnutí: (700 - 750) °C

1-2 hodiny přehřát a pomalu ochlazovat v peci

Kalení: (1240 - 1270) °C

HRC: 56.0

Prokalitelnost: v celém průřezu

ČSN 19 857 rychlořezná

JK:	125 882
Datu schválení:	16.04.66
Datum účinnosti od:	01.04.67
Skupina oceli:	řezné nástroje
Třída odpadu:	183
Barevné označení:	hnědá - fialová - stříbrná
Druh oceli:	elektroocel

Chemické složení oceli:

C	(0.900 - 1.000) %	+/- 0.020 %
Mn	0.450 %	
Si	0.450 %	
Cr	(3.800 - 4.600) %	+/- 0.100 %
P	0.035 %	
S	0.035 %	
Co	(9.000 - 10.500) %	+/- 0.100 %
Mo	0.500 %	
V	(2.000 - 2.700) %	+/- 0.050 %
W	(9.500 - 11.000) %	+ 0.300 %

Mechanické vlastnosti oceli 19 857 K

Výrobek:	tyče
Provedení:	válcováno nebo kováno za tepla
Povrch:	okujený
Rozměrová norma:	ČSN 42 55 16
Technické dodací předpisy:	ČSN 42 0222
Ozn. mat. a stavu:	19 857.4 kalený a popuštěný
Průměr (hloubka) mm:	20.0
HRC:	63.0

Tepelné zpracování nástrojové oceli 19 857

Tváření:	1150 °C
Kování:	900 °C
Žihání na měkko:	(780 - 820) °C
Max. HB:	280

Několik hodin přehřát (podle velikosti kusu), většinou stačí 4h, a pomalu ochlazovat v peci

Žihání na odstranění pnutí: (700 - 750) °C

1-2 hodiny přehřát a pomalu ochlazovat v peci

Kalení: (1240 -1270) °C

HRC: 56.0

Prokalitelnost: v celém průřezu

Materiál : 19 312 A						
Číslo opalování	1x	10x	10x p e	20x	20x e	30x
h ₀₂ (mm)	0,0075	0,0153	0,0335	0,0413	0,0312	0,0374

Tabulka č. 2.

Materiál : 19 312 B							
Číslo opalování	1x	10x	10x p e	20x	20x e	30x	40x
h ₀₂ (mm)	0,0075	0,0176	0,040	0,0286	0,0314	0,0752	0,0636

Tabulka č. 3.

Materiál : 19 436 A						
Číslo opalování	1x	10x	10x p e	20x	20x	30x
h ₀₂ (mm)	0,0067	0,0443	0,0377	0,0526	0,0333	0,0973

Tabulka č. 4.

Materiál : 19 436 A			
Číslo opalování	1x	10x	20x
h ₀₂ (mm)	0,0037	0,0317	0,0445

Tabulka č. 5.

Materiál : 19 643K						
Číslo opalování	1x	10x	10x p e	20x	20x e	30x
h ₀₂ (mm)	0,0057	0,021	0,0349	0,0302	0,0331	0,0416

Příloha č.2.- Měření drsnosti

Tabulka č. 1.

Materiál : 19 312 A						
Počet opakování	1x	10x	10x p c	20x	20x c	30x
Rm (mm)	0,0053	0,0152	0,0335	0,0413	0,0312	0,0374

Tabulka č. 2.

Materiál : 19 312 K							
Počet opakování	1x	10x	10x p c	20x	20x c	30x	40x
Rm (mm)	0,0075	0,0176	0,046	0,0286	0,0514	0,0758	0,0826

Tabulka č. 3.

Materiál : 19 436 K						
Počet opakování	1x	10x	10x p c	20x	20x	30x
Rm (mm)	0,0067	0,0445	0,0377	0,0826	0,0833	0,0973

Tabulka č. 4.

Materiál : 19436 A			
Počet opakování	1x	10x	20x
Rm (mm)	0,0027	0,0317	0,0449

Tabulka č. 5.

Materiál : 19 663K						
Počet opakování	1x	10x	10x p c	20x	20x c	30x
Rm (mm)	0,0097	0,021	0,0349	0,0302	0,0331	0,0418

Tabulka č. 6.

Materiál : 19 802 K						
Počet opakování	1x	10x	10x p c	20x	20x c	30x
Rm (mm)	0,0076	0,085	0,0477	0,1075	0,0803	0,1052

Tabulka č. 7.

Materiál : 19 857 K						
Počet opakování	1x	10x	10x p c	20x	20x c	30x
Rm (mm)	0,0016	0,0215	0,0444	0,0462	0,0803	0,1692

Příloha č. 3.

Měření závislosti hloubky řezné spáry na počtu opakování

Tabulka č. 1.

Materiál : 19 312A						
Počet opakování	1x	10x	10x p c	20x	20x c	30x c
x (mm)	0,007	0,0554	0,049	0,0584	0,0445	0,0589
y (mm)	0,007	0,0198	0,0155	0,0171	0,0133	0,0215
z (mm)	0,0017	0,0294	0,0482	0,0452	0,0407	0,0516

Tabulka č. 2.

Materiál : 19 312 K							
Počet opakování	1x	10x	10x p c	20x	20x c	30x	40x
x (mm)	0,0143	0,0394	0,0732	0,0406	0,0667	0,0843	0,0864
y (mm)	0,0024	0,0218	0,0449	0,012	0,0153	0,0085	0,0404
z (mm)	0,0528	0,0499	0,0545	0,0441	0,0474	0,0477	0,0826

Tabulka č. 3.

Materiál : 19 436 A			
Počet opakování	1x	10x	20x
x (mm)	0,0075	0,0395	0,0565
y (mm)	0,0048	0,0078	0,0057
z (mm)	0,0407	0,047	0,048

Tabulka č. 4.

Materiál : 19 436 K						
Počet opakování	1x	10x	10x p c	20x	20x c	30x
x (mm)	0,0119	0,0459	0,0812	0,089	0,089	0,101
y (mm)	0,0052	0,0013	0,0435	0,0064	0,0057	0,0037
z (mm)	0,0369	0,0452	0,0383	0,0486	0,0454	0,0556

Tabulka č. 5.

Materiál : 19 663 K						
Počet opakování	1x	10x	10x p c	20x	20x c	30x
x (mm)	0,0136	0,0249	0,0732	0,0529	0,0533	0,075
y (mm)	0,0039	0,0039	0,0449	0,0227	0,0202	0,0332
z (mm)	0,0415	0,0537	0,0826	0,0475	0,047	0,0473

Tabulka č. 6.

Materiál : 19 802 K						
Počet opakování	1x	10x	10x p	20x	20x c	30x
x (mm)	0,009	0,1019	0,0786	0,1147	0,1019	0,1212
y (mm)	0,0014	0,0214	0,0309	0,0072	0,0214	0,016
z (mm)	0,047	0,0531	0,0893	0,0511	0,0531	0,0537

Tabulka č. 7.

Materiál : 19 857 K						
Počet opakování	1x	10x	10x p c	20x	20x c	30x
x (mm)	0,0066	0,0558	0,084	0,0655	0,096	0,178
y (mm)	0,059	0,0343	0,0396	0,0193	0,0157	0,088
z (mm)	0,0449	0,0583	0,0487	0,0487	0,0516	0,0481

Příloha č.4 -Měření závislosti mikrotvrlosti na hloubce pod povrchem

Tabulka č. 1.

Mat. : 19 312 A		Počet opakování : 10x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0212	295
2	0,0583	273
3	0,0854	266
4	0,1004	258
5	0,163	245

Tabulka č. 2.

Mat. : 19 312 A		Počet opakování: 20x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0084	428
2	0,0255	383,2
3	0,0453	329
4	0,0703	284
5	0,116	269

Tabulka č. 3.

Mat. : 19 312 A		Počet opakování: 20x c
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0362	399,4
2	0,0575	301,5
3	0,0632	272,8
4	0,0888	243,3
5	0,1175	231,5

Tabulka č. 4.

Mat. : 19 312 A		Počet opakování: 30x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0083	354,2
2	0,0744	286,6
3	0,0759	255,8
4	0,0978	257,6
5	0,1016	246,3

Tabulka č. 5.

Mat. : 19 312 A		Počet opakování: 30x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0421	303
2	0,1064	281
3	0,16	257
4	3,7	249

Tabulka č. 6.

Mat. : 19 312 K		Počet opakování: 10x p c
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0197	840
2	0,0476	634
3	0,0617	621
4	0,0884	604
5	0,1085	588

Tabulka č. 7.

Mat. : 19 312 K		Počet opakování: 20x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,02	819
2	0,034	740
3	0,0491	636
4	0,0831	604
5	0,1034	572

Tabulka č. 8.

Mat. : 19 312 K		Počet opakování: 30x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0432	797
2	0,064	736
3	0,0767	640
4	0,0988	601
5	0,1263	554

Tabulka č. 9.

Mat. : 19 312 K		Počet opakování: 30x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,029	985,7
2	0,0707	923,6
3	0,121	850
4	3,6	822

Tabulka č. 10.

Mat. : 19 436 A		Počet opakování: 1x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0244	309
2	0,0396	333
3	0,0619	291
4	0,0787	253
5	0,1026	242

Tabulka č. 11.

Mat. : 19 436 A		Počet opakování: 10x p c
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,012	345
2	0,0321	319
3	0,0731	301
4	0,0931	285
5	0,1011	251

Tabulka č. 12.

Mat. : 19 436 A		Počet opakování: 20x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0375	363
2	0,053	326
3	0,0613	318
4	0,0817	274
5	0,1085	245

Tabulka č. 13.

Mat. : 19 436 A		Počet opakování: 20x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0325	283
2	0,0732	268
3	0,1162	254
4	3,08	239

Tabulka č. 14.

Mat. : 19 436 K		Počet opakování: 10x p c
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0392	822
2	0,0505	789
3	0,0697	719
4	0,0937	689
5	0,1031	603

Tabulka č. 15.

Mat. : 19 436 K		Počet opakování: 20x c
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0171	817
2	0,048	728
3	0,0723	706
4	0,0814	675
5	0,1029	599

Tabulka č. 16.

Mat. : 19 436 K		Počet opakování: 30x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0114	822
2	0,0348	698
3	0,0448	654
4	0,0525	590
5	0,0928	583

Tabulka č. 17.

Mat. : 19 436 K		Počet opakování: 30x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0285	770
2	0,0716	736
3	0,1215	683
4	3,5	602

Tabulka č. 18.

Mat. : 19 663 K		Počet opakování: 10x p c
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0325	1009
2	0,0504	853
3	0,0819	727
4	0,0967	688
5	0,121	658

Tabulka č. 19.

Mat. : 19 663 K		Počet opakování: 20x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0253	1099
2	0,0412	961
3	0,053	807
4	0,0785	727
5	0,1032	663

Tabulka č. 20.

Mat. : 19 663 K		Počet opakování: 30x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0331	1103
2	0,057	868
3	0,0765	794
4	0,0879	719
5	0,1024	638

Tabulka č. 21.

Mat. : 19 663 K		Počet opakování: 30x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0132	863
2	0,0738	822
3	0,1452	704
4	3,2	659

Tabulka č. 22.

Mat. : 19 802 K		Počet opakování: 10x p c
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0121	1301
2	0,0416	1173
3	0,061	1131
4	0,0785	945
5	0,1011	842

Tabulka č. 23.

Mat. : 19 802 K		Počet opakování: 20x c
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0194	1253
2	0,0466	1064
3	0,0648	923
4	0,0877	872
5	0,1027	822

Tabulka č. 24.

Mat. : 19 802 K		Počet opakování: 30x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0209	1407
2	0,0375	1288
3	0,0413	1038
4	0,0797	939
5	0,1023	868

Tabulka č. 25.

Mat. : 19 802 K		Počet opakování: 30x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,029	985
2	0,0707	923
3	0,121	850
4	3,4	822

Tabulka č. 26.

Mat. : 19 857 K		Počet opakování: 10x p c
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0235	1203
2	0,0438	962
3	0,0632	719
4	0,0875	690
5	0,1128	608

Tabulka č. 27.

Mat. : 19 857 K		Počet opakování: 20x c
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0303	1123
2	0,0502	961
3	0,0703	754
4	0,0987	702
5	0,1184	632

Tabulka č. 28.

Mat. : 19 857 K		Počet opakování: 30x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0208	1142
2	0,03	1069
3	0,0588	807
4	0,0989	686
5	0,1101	612

Tabulka č. 29.

Mat. : 19 857 K		Počet opakování: 30x
Číslo měř.	Hloubka h (mm)	Mikrotvr. (HV)
1	0,0216	780
2	0,0523	622
3	0,1862	570
4	3,08	525

Příloha č.5.- Měření zbytkových pnutí

$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ Mpa}$, $L = 15\text{mm}$, $A = 119\text{mm}$, $H_0 = 7\text{mm}$, $n = 10$

Tabulka č. 1.

Mat. : 19 312 K		Počet opakování: 50x c
Číslo měř.	ΔH_n (mm)	ΔY_n (mm)
1	0,036	0,04
2	0,016	0,038
3	0,012	0,04
4	0,014	0,035
5	0,018	0,04
6	0,024	0,05
7	0,034	0,055
8	0,028	0,05
9	0,034	0,04
10	0,09	0,039

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ Mpa} , L = 30 \text{ mm} , A = 72 \text{ mm} , H_0 = 6,225 \text{ mm}, n = 10$$

Tabulka č. 2.

Mat. : 19 436 K		Počet opakování: 10x p c
Číslo měř.	ΔHn (mm)	Δ Yn(mm)
1	0,0618	0,08
2	0,0618	0,086
3	0,0492	0,05
4	0,0652	0,055
5	0,0541	0,05
6	0,043	0,06
7	0,0541	0,08
8	0,0578	0,06
9	0,0554	0,05
10	0,0627	0,1

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ Mpa} , L = 20 \text{ mm} , A = 100 \text{ mm} , H_0 = 7 \text{ mm}, n = 10$$

Tabulka č. 3.

Mat. : 19 663K		Počet opakování: 10x p c
Číslo měř.	ΔHn (mm)	Δ Yn(mm)
1	0,1152	0,04
2	0,0304	0,05
3	0,0432	0,06
4	0,0304	0,04
5	0,0592	0,05
6	0,0496	0,04
7	0,0528	0,05
8	0,0224	0,04
9	0,032	0,04
10	0,0192	0,03

Tabulka č. 4.

Mat. : 19 312 K		Počet opakování: 50x c
Číslo měř.	σ (MPa)	Hn (μm)
1	993,94	36
2	2094,25	52
3	2938,61	64
4	2189,14	78
5	1936,07	96
6	1798,76	120
7	1373,34	154
8	1503,85	182
9	974,01	216
10	338,64	306

Tabulka č. 5.

Mat. : 19 436 K		Počet opakování: 10x p c
Číslo měř.	σ (MPa)	Hn (μm)
1	659,39	61,8
2	668,25	123,6
3	472,11	172,8
4	390,12	238
5	419,09	292,12
6	633,06	335,17
7	656,56	389,29
8	440,28	447,1
9	379,08	502,45
10	670,12	565,18

Tabulka č. 6.

Mat. : 19 663 K		Počet opakování: 10x p c
Číslo měř.	σ (MPa)	Hn (μm)
1	261,84	145,2
2	1211,84	145,2
3	1003,59	188,8
4	937,02	219,2
5	590,27	278,4
6	550,34	328
7	643,71	380,8
8	1215,76	403,2
9	840,52	435,2
10	1048,65	454,4

Příloha č. 6 .-Měření tloušťky ovlivněné vrstvy

Tabulka č. 1.

Materiál:	19 312 A		
Počet opakování	10x	10x p c	30x
t (mm)	0,005	0,0089	0,0217

Tabulka č. 2.

Materiál:	19 436 A		
Počet opakování	1x	10x	20x
t (mm)	0,0037	0,0111	0,0125

Tabulka č. 3.

Materiál:	19 436 K			
Počet opakování	1x	10x p c	20x c	30x
t (mm)	0,0025	0,0052	0,004	0,0071

Tabulka č. 4.

Materiál: 19 802 K				
Počet opakování	1x	10x p c	20x	30x
t (mm)	0,0025	0,0032	0,0055	0,0062

Tabulka č. 5.

Materiál: 19 857 K				
Počet opakování	1x	10x p c	20x	30x
t (mm)	0,0016	0,005	0,0062	0,0078

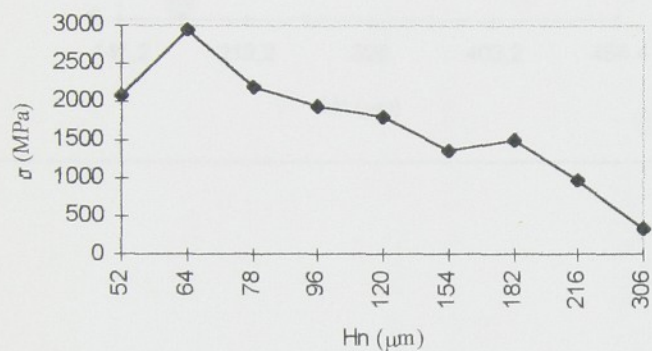
Materiál: 19 436 K, 10x p c



Příloha č. 7. - Grafy zbytkových pnutí

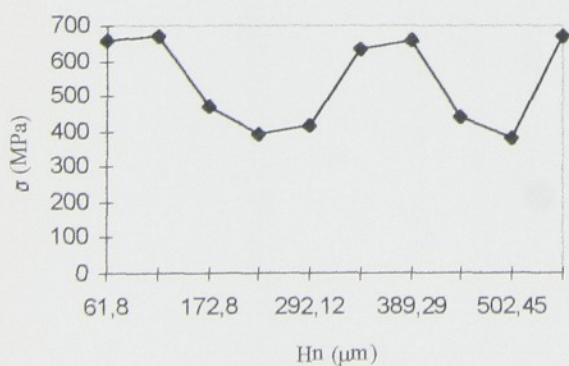
Materiál: 19 312 K 50x c

Graf č. 1.



Materiál: 19 436 K 10x p c

Graf č. 2.



Materiál: 19 663 K 50x c

