

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro Zdeněk R A D O S T 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: Vliv parametrů laserového ozáření na výsledky TZ
povrchových vrstev uhlíkové oceli ozn. 12 060

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení s problémem tvorby vrstev transformačním zpevněním po ohřevu laserem na citované oceli.
2. Sledování mikrotvrdosti a struktur laserovaných vrstev.
3. Zhodnocení.

V 162/275

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

KMH/SM

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy: asi 50 stran

Seznam odborné literatury:

- /1/ PÍŠEK, RYŠ : Nauka o materiálu I/1. Academia Praha, 1966.
- /2/ RYKALIN, N.N.: Lasernaja i elektrolučevaja obrabotka materialov.
- /3/ Výzkumné zprávy KMM podle dispozic vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Miroslav Kořínek, CSc

Datum zadání diplomové práce:

15.9.1986

Termín odevzdání diplomové práce:

11.5.1987



pa hmy
Doc. Ing. Ján Alaxin, CSc

Vedoucí katedry

sohrulee
Doc. Ing. Ján Alaxin, CSc

Děkan

V Liberci dne 10.9. 1986

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci
nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

Obor 23 - 07 -8

Strojírenská technologie

zaměření

strojírenská metalurgie

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

VLIV PARAMETRŮ LASEROVÉHO OZÁŘENÍ NA VÝSLEDKY TZ
POVRCHOVÝCH VRSTEV UHLÍKOVÉ OCELI OZN. 12 060

KMM - 240

Zdeněk R a d o s t a

Vedoucí diplomové práce: Doc. ing. Miroslav Kořínek CSc
(VŠST Liberec)

Rozsah práce a příloh:

Počet stran - 76

Počet tabulek - 10

Počet příloh - 46

Počet výkresů - 0

DT:

V Liberci, dne 11, května 1987

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

V Liberci, dne 11. května 1987

Janek Kadosta

O B S A H

1.	Úvod	3
2.	Teoretická část	5
2.1.	Problematika TZ laserem	5
2.1.1.	Problematika ohřevu kovů vysokými rychlostmi	5
2.1.2.	Princip TZ laserem	6
2.1.3.	Výhody TZ laseru	7
2.1.4.	Porovnání TZ konvenčními metodami a TZ laseru	9
2.1.5.	Odlišnosti TZ konvenčními metodami od TZ laseru	10
2.2.	Struktury vzniklé teplem ovlivněné oblasti	11
2.2.1.	Struktury dosahované při TZ laserem	11
2.2.2.	Fázové a strukturní přeměny z hlediska jejich závislosti na výchozím stavu struktury	13
2.3.	Laserový ohřev kovů a slitin	13
2.4.	Současný stav využití laseru v TZ	15
2.5.	Nejdůležitější kritéria a vlastnosti pro TZ laseru	16
2.5.1.	Nejdůležitější kritéria pro TZ laserem	16
2.5.2.	Souhrn hlavních vlastností TZ laseru	16
2.6.	Mikrotvrdost	17
3.	Experimentální část	22
3.1.	Chemická analýza materiálu	22
3.1.1	Ocel 12060	22
3.1.2.	Ocel 12020	23
3.2.	Příprava vzorků	24
3.2.1.	Vzorky pro ozáření laserem	24
3.2.2.	Vzorky pro měření mikrotvrdosti na povrchu	26
3.2.3.	Vzorky pro optickou mikroskopii	26

3.2.4. Vzorky pro měření mikrotvrlosti v příčném řezu	27
3.3. Měření mikrotvrlosti a tvrdosti	27
3.3.1. Měření mikrotvrlosti na povrchu	27
3.3.2. Měření mikrotvrlosti v příčném řezu	28
3.3.3. Měření tvrdosti	29
3.4. Vyhodnocení výsledků měření mikrotvrlosti	30
3.5. Metalografické pozorování vzorků TZ laserem	34
3.5.1. Struktura výchozího materiálu	34
3.5.2. Struktura po TZ laserem	36
4. Výsledky a zhodnocení	51
4.1. Výsledky mikrotvrlosti	51
4.1.1. Grafické vyjádření tvrdosti v závislosti na šířce pro kalené vrstvy	51
4.1.2. Grafické vyjádření tvrdosti v závislosti na hloubce pro kalené vrstvy	57
4.1.3. Grafické vyjádření tvrdosti v závislosti na rychlosti ozáření laserem	67
4.1.4. Grafické vyjádření hloubky pro kalené vrstvy v závislosti na rychlosti ozáření laserem	68
4.2. Porovnání vzorků oceli 12060	69
4.3. Porovnání vzorků oceli 12060 s ocelí 12020	69
5. Diskuze výsledků	70
6. Závěry a doporučení pro další výzkum	72
7. Seznam použití literatury	74
Seznam příloh	

1. Ú V O D

V současné době se zavádí do praxe mnoho poznatků z vědy a výzkumu. Důraz je mimo jiné kladen na těsnější sepjetí vývoje s výrobou. To se týká nejen výzkumných pracovišť v rámci výzkumných ústavů jednotlivých rezortů, ale i práce našich nejvyšších vzdělávacích zařízení, tedy vysokých škol. Tyto školy vychovávají odborníky, kteří musí po svém nástupu do praxe čelit mnoha ekonomickým problémům, před něž staví naše hospodářství současná ekonomická situace. Projevuje se nedostatkem surovin, paliv a energie. Tyto je nutné šetřit na každém kroku. Extenzivní cesta rozvoje není dále možná. Naproti tomu intenzivní cestu rozvoje může nastoupit naše hospodářství jedině splynutím vědy s praxí. Věda se musí stát výrobní silou a to zejména v průmyslové činnosti.

V hlavních směrech hospodářského a sociálního rozvoje ČSSR na léta 1986 - 1990 s výhledem na období do roku 2000 bylo zdůrazněno pro metalurgický komplex, že rozvoj strojírenské výroby jako nositele vědecko-technického rozvoje ve všech odvětvích národního hospodářství se musí zvyšovat. Proto i úkoly, které jsou vytyčovány pro odbornou činnost technických škol úzce souvisí s potřebami praxe. Tradici v tomto směru má i Vysoká škola strojní a textilní v Liberci. Spolupracuje s mnoha podniky a pracovišti, pomáhá řešit závažné otázky a úkoly, které jsou na náš průmysl kladeny. Proto i diplomové úkoly, které jsou zadávány, často řeší tuto problematiku a napomáhají praxi.

Jedna z progresivních technologií, která se objevuje v praxi je využívání laserové techniky a to především jako tepelné zpracování laserem (TZL). Tato technologie je už v mnoha zemích

světa s úspěchem používána v praxi. U nás se zatím provádí výzkum této technologie a předávání poznatků na československé materiály.

Jedním z úkolů, které se řeší na katedře materiálu a strojírenské metalurgie je státní výzkumný úkol č. III - 1 - 6, který se zabývá problematikou TZL. Zadání této diplomové práce bylo kocipováno jako součást tohoto úkolu, proto i výsledky této práce by měly pomoci k jeho řešení.

2. T E O R E T I C K Á Č Á S T

2.1. Problematika TZ laserem

Při využití laseru k teplotním úpravám materiálu plní laser úlohu lokálního teplotního zdroje, jenž umožňuje lokálně zvýšit teplotu na povrchu obrobku nad eutektický bod, ale pod bod tání (někdy až nad bod tání - natavení). Po přerušení zahřívání zprostředkuje chladný materiál ve spodních vrstvách zchlazení rozehrátého povrchu a způsobí transformační vytvrzení (kalení).

2.1.1. Problematika ohřevu kovů vysokými rychlostmi

Při velmi vysokých rychlostech ohřevu může dojít k lokálnímu natavení materiálu na hranicích zrn. Toto lokální natavení způsobuje přeměny poblíž hranicích zrn. Toto lokální natavení způsobuje přeměny poblíž hranic zrn a tím i změny tvrdosti těchto ocelí po transformačním vytvrzení. Rozměry takto zasažených oblastí řádově převyšují koeficient difuze. Na strukturu povrchové vrstvy materiálu má také vliv tlak par, který působí při dostatečně vysokých teplotách (vyšší než je teplota tavení daného materiálu), takže dochází k chemické změně povrchové vrstvy.

Na výslednou strukturu mají vliv i chemické reakce. K natavení materiálu dojde nejdříve na hranicích zrn. Při vysokých teplotách a vypařování kovů dochází také k hoření jednotlivých prvků. U uhlíkových slitin dochází k vyhoření uhlíku. Při rychlých ohřevech může dojít k plastickým a elastickým změnám krystalové mřížky. To je spojeno se zvýšením hustoty dislokací a dalšími s tím spojenými jevy.

2.1.2. Princip TZ laserem

Technologie tepelného zpracování paprskem laseru (TZL) zaznamenala v posledních dvaceti letech prudký rozmach. Hlavním cílem je pomocí paprsku laseru dosáhnout transformačního zpevnění vybraných částí povrchu. Je nutné připomenout, že pro objemový ohřev součástí je použití laseru neúčinné.

Základním principem je tedy to, že paprsek laseru ozařuje povrch materiálu a jeho infračervené záření je pohlcováno tenkou vrstvou materiálu. Teplo je potom z povrchu materiálu odváděno do celého objemu součástí.

Hloubka tepelně zasažené oblasti je určena zákony o vedení tepla v pevné látce. Povrchová teplota vzrůstá až na hodnotu, která je úměrná druhé mocnině času.

Přívodu tepla během laserového ohřevu se dosahuje tzv. inverzním efektem. Povrchová teplota i hloubka zasažené oblasti mohou být ovládány nastavením velikosti paprsku, rychlostí pohybu paprsku, výkonem použitého laseru.

Ochlazení povrchové oblasti je dosaženo samovolným odvodem tepla do hloubky materiálu. Přesto jsou rychlosti odvodu tepla velmi vysoké. Jestliže může dosáhnout rychlost ohřevu až 10^8 Ks^{-1} potom rychlost ochlazování je buď srovnatelná, nebo je o řád nižší. Podmínkou pro zpevnění povrchové vrstvy odvodem tepla do materiálu je, aby byla minimální tloušťka materiálu asi 4x větší než hloubka zpevněné vrstvy (platí pro nízkolegované nebo uhlíkové oceli). U tenkých součástí (plechy) musíme zabezpečit odvod tepla jiným způsobem, např. podkládáním součástí tepelně vodivým materiálem.

2.1.3. Výhody TZ laserem

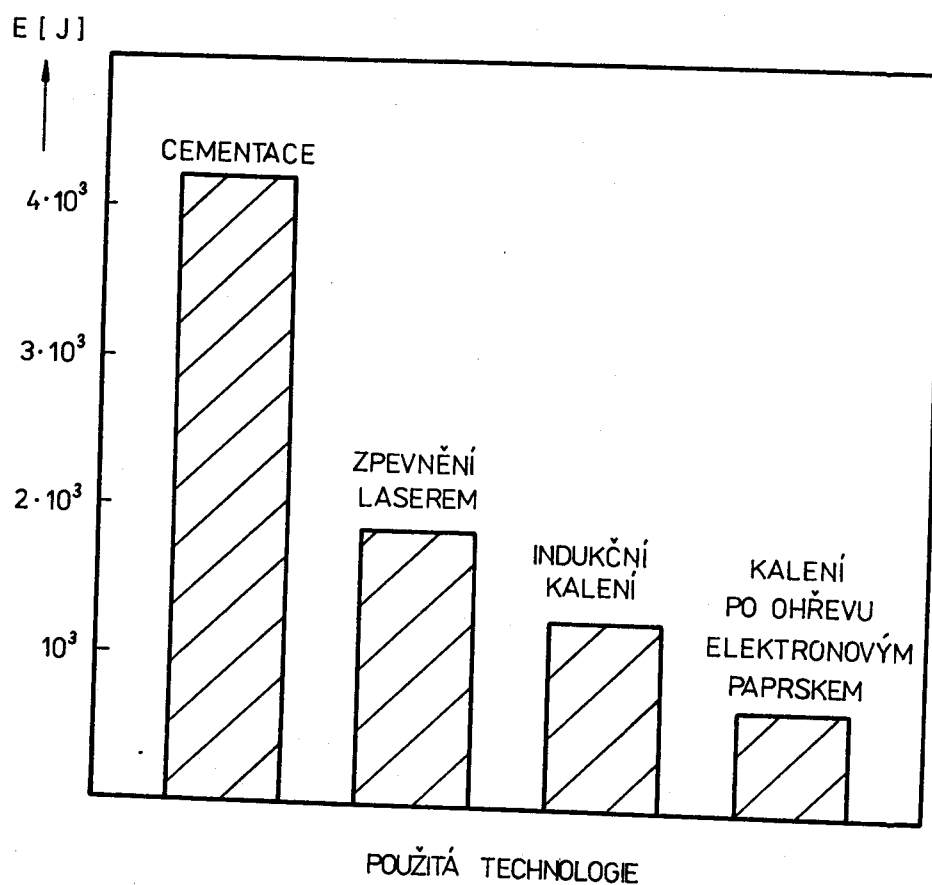
Povrch součástí tepelně zpracovaný laserem má celou řadu výhodných vlastností. Mnohdy lze použít méně jakostních materiálů při stejné či dokonce vyšší životnosti součástí oproti klasickým způsobům tepelného zpracování.

Mezi výhody laserové technologie patří dále vysoká tvrdost, otěruvzdornost a chemická stálost povrchové vrstvy materiálu. Tuto vrstvu lze vytvořit v přesně stanovené oblasti a to jak na vnějším, tak i na vnitřním povrchu součásti. Životnost součástí se zvýší až na několiknásobně, odpadá další opracování povrchů. Celý proces lze celkem snadno automatizovat, čímž je dosahováno velké efektivnosti výroby.

Další výhodou je rozměrová stálost součástí, což umožňuje jejich tepelné zpracování až po montáži. Zanedbatelnou výhodou není ani možnost přenosu paprsku na velké vzdálenosti (do 100 m). Instalace laserového zařízení je náročná na plochu, ale podmínkou je zamezení vibrací od okolních strojů, protože přesná nastavení aranžované plochy může být těmito vibracemi ztíženo.

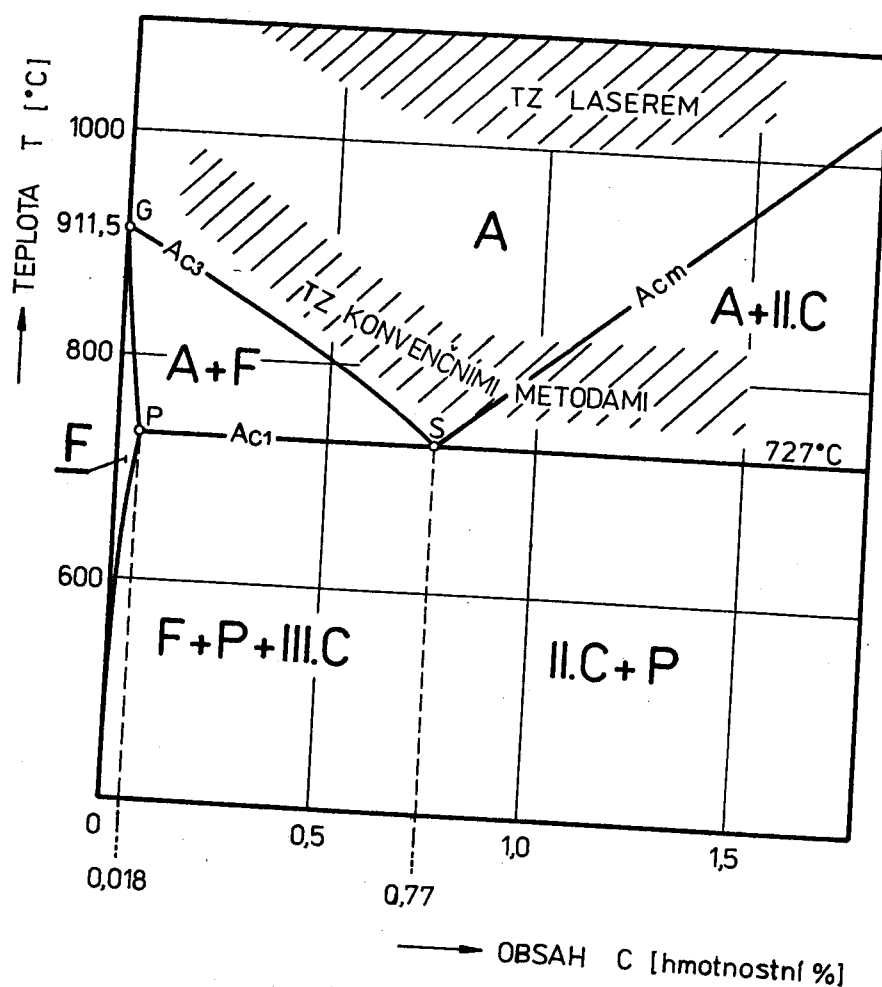
Nevýhodou je stále ještě pořizovací cena zařízení, náročnost na kvalifikaci obsluhy, kterou lze však částečně eliminovat automatizací provozu. TZ paprskem laseru někdy také ne zcela správně označované jako povrchové kalení, není ale univerzální metodou a vzhledem k vysoké pořizovací ceně zařízení nachází výhodné uplatnění pouze tehdy, je-li plně využito specifických vlastností takto získaných povrchových vrstev.

Porovnání účinnosti tepelného zpracování laserem a běžnými metodami je na obr. č.1



Obr. č. 1 - Porovnání účinnosti TZ laserem a běžnými metodami /14/

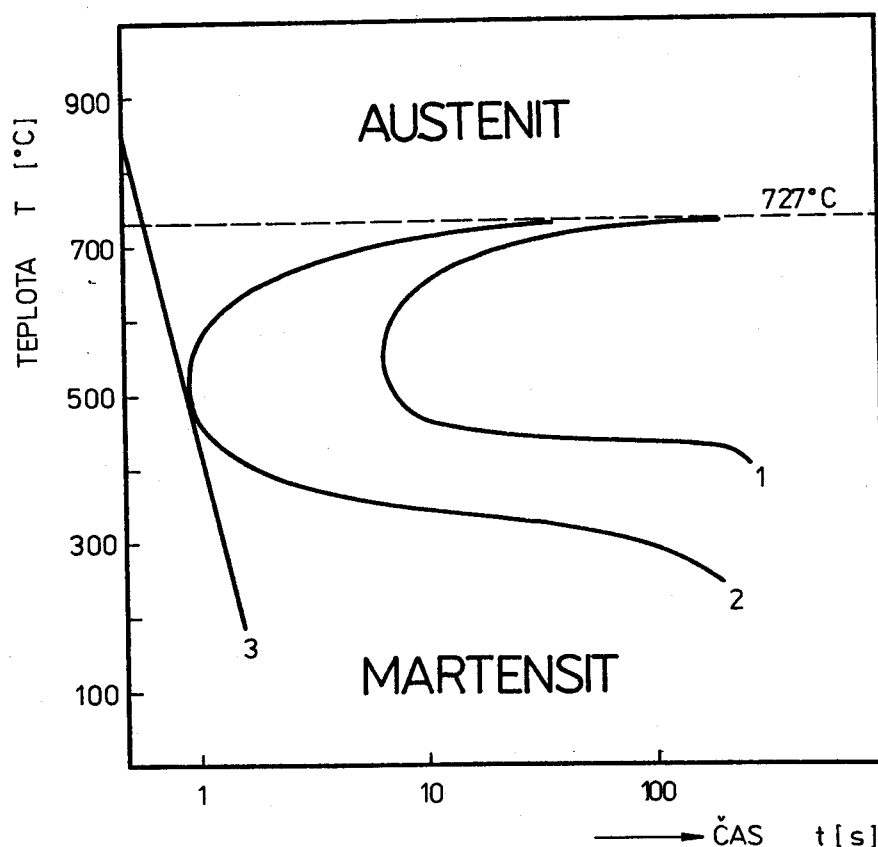
2.1.4. Porovnání TZ konvenčními metodami a TZ laserem



Obr. č.2 - Porovnání TZ konvenčními metodami s TZ laserem /11/

Na obrázku č. 2 je část diagramu Fe - Fe₃C metastabilní soustavy. Vyšrafované části udávají rozsahy teploty pro TZ konvenčními metodami a metodami laserem. U TZ konvenčním způsobem je výchozí struktura ohřátá na 30 - 60°C nad A_{C3} a A_{C1}. U TZ laserem leží teploty o 300 - 400°C výše. Na základě vysoké výkonové hustoty a s ní svázanými ohřívacími a ochlazovacími rychlostmi se přivede struktura do nerovnovážného stavu. Následující ochlazení vede k velmi tvrdé jemnojehlíkové martenzitické

struktury. Na obrázku č. 3 je ukázána křivka ochlazení z austenitu na martenzit (křivka 3).



Obr. č. 3 - Diagram IRA s křivkou přechodu austenitu na martenzit

/1/

1, 2 - začátek a konec strukturního přechodu z austenitu na perlit

3 - přechod z austenitu na martenzit

2.1.5. Odlišnost TZ konvenčními metodami od TZ laserem

Extrémně vysoké rychlosti ohřevu a ochlazování, které jsou laserovému ohřevu vlastní, usnadňují zpevnění nízkouhlíkových ocelí - snižují se rozdíly v nakalitelnosti uhlíkových a legovaných ocelí, protože rychlost ochlazování je značně vyšší než u konvenčního kažení.

2.2. Struktury vzniklé v teplem ovlivněné oblasti

Struktury vzniklé v teplem ovlivněné oblasti vznikají v závislosti na parametrech paprsku. Obecně lze říci, že je stopa působení paprsku tvořena dvěma zónami a to v centrální zóně jsou porovnatelné stopy .natavení, v periferních zónách dochází pouze k tepelnému ovlivnění materiálu.

V důsledku různých podmínek ohřevu a ochlazování v závislosti na vzdálenosti od povrchu jsou struktury vzniklé v zóně působení paprsků nehomogenní.

Tato zóna má kulovitý tvar a je tvořena 4. vrstvami, které se podstatně liší svou mikrostrukturou a mikrotvrdostí.

2.2.1. Struktury dosahované při TZ laserem /13/

PRVNÍ (BÍLÁ) VRSTVA je umístěna v centrální zóně bezprostředně u povrchu vzorku. Je charakterizována zvýšenou mikrotvrdostí a odolností proti leptání. Mikrotvrdost se pohybuje kolem čtyřnásobku tvrdosti původní struktury a dosahuje vyšších hodnot než při klasickém způsobu TZ. Mikrostruktura vrstvy vyvolané leptáním je tvořena martenzitem a zřejmě obsahuje malé množství zbytkového austenitu. Zvýšená odolnost proti leptání se vysvětluje vysokým napětím ve struktuře a faktem, že vzhledem ke krátkému časovému impulsu nemohlo dojít k redistribuci atomů příměsí a poruch krystalické stavby podél hranic zrn nově vzniklé struktury. Vysoká tvrdost bílé vrstvy může být podmíněna:

1. Výrazným stupněm přesycení tuhého roztoku
2. Zvýšenou hustotou defektů krystalické stavby
3. Jemnědispersní stavbou martenzitu

DRUHÁ (PŘECHODOVÁ) VRSTVA je umístěna bezprostředně pod bílou, má vyhovující leptatelnost a ve srovnání s bílou má sníženou tvrdost. Její struktura je tvořena jehlicovitým martenzitem, s jehlicemi $2x \div 4x$ většími než u martenzitu první vrstvy. Svým charakterem je struktura přechodové vrstvy bližší strukturám oceli po klasickém TZ. Zvláštnost struktury je podmíněna změnou rychlosti ohřevu a ochlazení. Rychlosti ochlazení jsou u druhé vrstvy poněkud nižší než u první. Druhá vrstva je rozložena mezi více ohřátou první a méně ohřátou třetí. Ta pak brání rychlému odvodu tepla. V důsledku toho se rychlost ochlazení blíží kritické rychlosti. Nastává nedostatečně ostré kalení doprovázené samopopouštěním a relaxací vnitřního napětí.

TŘETÍ VRSTVA je zónou neúplného kalení a její struktura je tvořena martenzitem, jemným perlitem (dříve označován jako troostit) a feritem. Martenzit vzniká na místě původních perlitických zrn. Ferit se pak zachoval na místě feritického síťoví výchozí struktury. Vlivem tepelného a tlakového rázu se síťoví rozpadlo, ale krátká doba byla nedostatečná k rozpuštění zrn feritu. Zvýšená tvrdost martenzitu této vrstvy je podmíněna zvýšením stupně dispersnosti, což je spojeno s růstem rychlosti odvodu tepla do hloubky kovu. Množství feritu u této vrstvy je $8x$ menší a tvrdost této vrstvy $1,5x$ větší než u výchozí struktury. Zvýšená tvrdost feritu může být vysvětlena jeho rozpadem v podmínkách všestranného tlaku.

ČTVRTÁ VRSTVA leží v přímé blízkosti zóny nevystavené ohřevu a má sníženou leptavost. Tato vrstva stejně jako třetí je úplně zakalená, ale neobsahuje jemný perlit (troostit). Je v ní zachováno feritické síťoví struktury a vyznačuje se vyšší tvrdostí.

Slabě se leptající struktura je tvořena martenzitem s nejmenšími jehlicemi. Tvrdost martenzitu je vysoká, což je podmíněno nejvyšší rychlostí ochlazování v této vrstvě. Rozložení feritického síťoví se udržuje stejně jako bylo ve výchozí struktuře. Závěrem můžeme shrnout, že:

1. Povrchová vrstva a přechodová jsou zcela zakaleny, ve vrstvách třetí a čtvrté probíhá neúplné zakalení.
2. Nejvyšší tvrdostí je charakterizována první a čtvrtá vrstva.
3. Vyskytující se odlišnosti ve struktuře a tvrdosti vrstev jsou vysvětleny různými podmínkami ohřevu a ochlazování.

2.2.2. Fázové a strukturní přeměny z hlediska jejich závislosti na výchozím stavu struktury

Strukturní dědičnost přeměněných oblastí ve struktuře je charakterizována právě pro ohřev laserem. Ohřev pomocí laseru je objasňován pomocí efektu - krystalizace na podložce. Podložkou pro krystalizaci může být, jak rychlým ohřevem martenzitu obnovený austenit, tak i rekrystalizovaný austenit. Jestliže výchozí struktura byla jemnozrnná, tak i struktura po laserovém zásahu je tvořena jemnozrnným martenzitem. Rovněž pokud vzniká přetavená, litá struktura, platí i v tomto případě též strukturní dědičnost.

2.3. Laserový ohřev kovů a slitin

Na povrch materiálu se přivádí velké množství energie (10^7 Jmm^{-2} a více) a to ve velmi krátkém čase (řádově 10^{-3} s). Množství energie je o tři řády větší než při konvenčních technologiích /3/.

Záření je pohlcováno tenkou vrstvou materiálu a to je možné popsat vztahem Bugera (1):

$$I(x) = I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot x) ; \quad (1)$$

kde $I(x)$ je intenzita světelného toku v hloubce x

I_0 je intenzita světelného toku

α je koeficient pohltivosti světla v kovu

Prakticky pro většinu kovů platí, že světelná energie se pohlcuje v hloubce menší než $0,1 \mu\text{m}$. Přenos této energie je způsoben tepelnou vodivostí /3/.

Ovšem rovnice (1) platí, jak již bylo uvedeno pouze pro tenkou vrstvou. Pro další šíření tepla celým objemem materiálu můžeme popsat Fourierovou rovnicí (2) vedení tepla tuhým látkou /9/:

$$\frac{\partial(\rho c_v T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_z ; (2)$$

kde T je teplota v určitém časovém okamžiku v místě vzorku [K]

t je čas [s]

x, y, z souřadnice místa jež popisuje teplotní a časovou závislost [m]

c_v je měrné teplo [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]

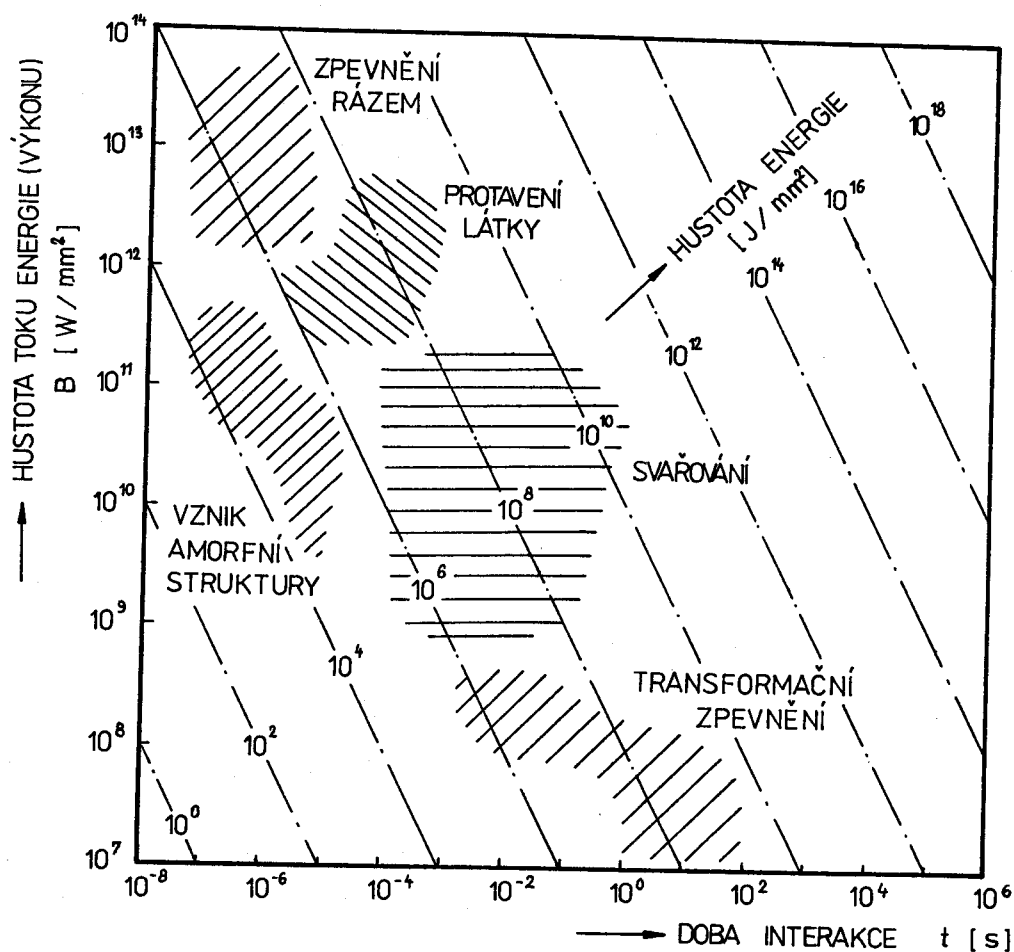
ρ je měrná hmotnost [kg m^{-3}]

q_z je energie vnitřních zdrojů [J]

λ je součinitel tepelné vodivosti [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]

2.4. Současný stav využití laseru v TZ

Současné možnosti technologického využití ohřevu laserem CO_2 ukazuje následující diagram na obr. č. 4



Obr. č. 4 - Oblasti použití laserové techniky v TZ /11/
/Readyův diagram/

Zcela nevhodné pro TZ je oblast diagramu v níž dochází k protavení látky. Nejvhodnější pro TZ laserem je oblast transformačního zpevnění.

Vlastnosti zpracovaného kovu je možné zlepšit v zásadě dvěma způsoby:

1. Pouze účinkem ohřevu laseru a následujícím rychlým ochlazením. Tímto způsobem může dojít ke zlepšení vlastností
 - a) transformační zpevnění
 - b) vznikem amorfni struktury
 - c) vytvrzováním tepelným rázem
2. Zpevnění povrchu cestou natavení povrchu a dodáním legur do roztavené vrstvy.

2.5. Nejdůležitější kritéria a vlastnosti pro TZ laserem

2.5.1. Nejdůležitější kritéria pro TZ laserem /10/

1. Teplota zpevněné vrstvy musí dosahovat hodnoty austenitizace.
2. Mezi cykly ohřevu a ochlazování musí být materiál na austenizační teplotě dostatečně dlouho z důvodu difuze uhlíku.
3. Materiál by měl mít dostatečnou hmotnost a dostatečně velký objem, takže rychlost samoochlazování je taková, že vyhovuje požadavkům kritické rychlosti ochlazování.

2.5.2. Souhrn hlavních vlastností TZ laserem

Shrneme-li všechny údaje lze konstatovat, že hlavní výhody TZ kovů paprskem laseru jsou:

1. Tepelná energie laseru působí pouze v oblasti, kde má být tato technologie realizována a tudíž neovlivňuje materiál celého výrobku. Tento fakt je příčinou toho, že lze dosáhnout kratších výrobních časů a vynikajících vlastností zpracovaného výrobku.
2. Při této technologii dochází k extrémně vysokému toku energie, který je převeden na povrch opracovaného předmětu.

3. Velká účinnost převedené energie, která je mnohonásobně vyšší, než u konvenčních způsobů ohřevu.
4. Snaha manipulace s laserovým paprskem a tím i snadná ovladatelnost z hlediska časové odezvy.
5. Laser pracuje ze vzdáleností a tím je možno opracovat i taková místa, která jsou běžnými konvenčními způsoby velice těžko zpracovatelná nebo vůbec nezpracovatelná.
6. Nezpůsobuje žádné mechanické odezvy obrobku, t.j. že se obrobek nechvěje ani nevybruje a proto odpadá upínání výrobku.
7. Odpadá potřebná kupa, skladování a udržování často velmi finančně nákladných nástrojů.
8. Tato technologie vyhovuje požadavkům na hygienu a kvalitu pracovního prostředí při dodržování bezpečnostních předpisů.

Nesmíme ovšem zapomínat ani na negativní stránky při použití laserové techniky. V současné době je to značná pořizovací cena a také ne zcela úplné znalosti a využití tohoto zdroje energie. Další nevýhodou je prozatím dosti značná složitost celého zařízení. Ovšem tato otázka by se měla v příštích letech vyřešit.

Z uvedeného je vidět, že přednosti laserové techniky jsou nesporné a bezesporu se jedná o jednu z metod budoucnosti, která ještě najde uplatnění i v ostatních oblastech lidské činnosti.

2.6. Mikrotvrdost /7, 8/

Na měření tvrdosti velmi malých předmětů a tenkých vrstev jako jsou vrstvy po TZ laserem se používá metoda měření mikrotvrdosti. Princip měření je shodný s Vickersovou metodou, ale

s mnohem menším zatížením. Identorem při této zkoušce je čtyřboký diamantový jehlan (pyramida) s vrcholovým úhlem $\alpha = 136^\circ$, takže vznikají čtyřhranné vtisky. Tento úhel volen proto, aby tření co nejméně ovlivňovalo výsledek. Po provedení vtisku se měří jeho úhlopříčka u . Měřicím zařízením pro zkoušku mikrotvrdosti je mikrotvrdoměr, který je vybaven mikroskopem. Výpočet mikrotvrdosti je pak podle vzorce (3):

$$HV = \frac{F}{A} ; \quad (3)$$

kde F je podíl síly [N]

A je povrch vtisku [mm^2]

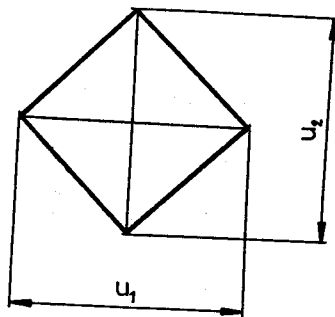
$$A = \frac{u^2}{2 \cos 22^\circ} = \frac{u^2}{1,8544} ; \quad (4)$$

pokud je síla dosazena v [N] dostaneme

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{u^2} ; \quad (5)$$

kde U je úhlopříčka vtisku [mm] vyjádřená jako střední hodnota

$$u = \frac{u_1 + u_2}{2} ; \quad (6)$$



Obr. č.5 - Vtisk mikrotvrdomosti

Výhodou této zkoušky je, že výsledky mikrotvrdomosti teoreticky nezávisí od velikosti zatěžující síly, protože různě velké vtisky jsou navzájem geometricky podobné, proto jsou v určitém rozsahu hodnoty HV od velikosti dopružení, respektive deformačního zpevnění zkoušeného vzorku.

Stálost hodnoty tvrdosti při změně zatížení F potvrzuje Kickův zákon podobnosti vtisku (7):

$$F = A_m u^2 ; \quad (7)$$

kde F je zatěžující síla

u je úhlopříčka vtisku

A_m je konstanta závislá na zkoušeném materiálu

Tento zákon ovšem neplatí pro malé zatížení. Pro mikrotvrдост platí zákon, který popsali Schulz, Mayer, Hanemann (8), /14/:

$$F = A_m e^n ; \quad (8)$$

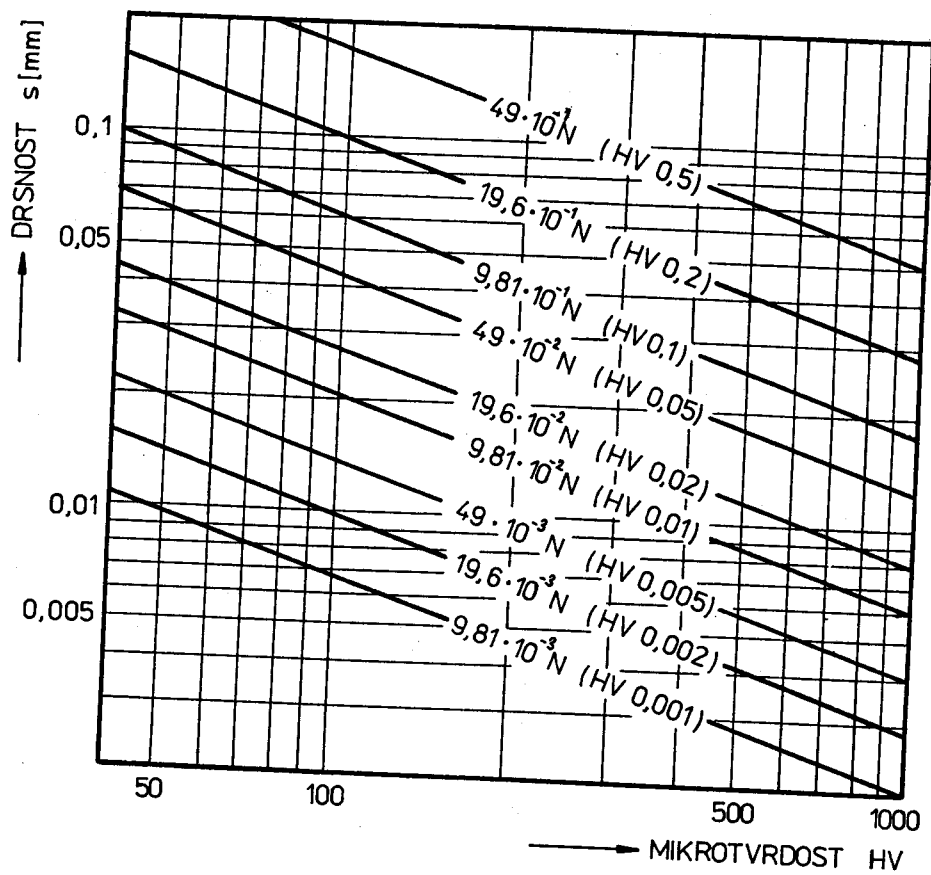
kde F je zatěžující síla

A_m je konstanta závislá na zkoušeném materiálu

n je exponent kvadratické funkce $n \in (1,7 \div 1,9)$

Hodnota n klesá se zátěžnou silou.

Hodnota mikrotvrдостi závisí na velikosti použitého zatížení, kvalitě povrchu, přesnosti odečítání, rozměrech vtisku a pod. Zkouška je normalizována podle /17/. Podle této normy se při měření mikrotvrдостi používá zatížení od $9,8 \cdot 10^{-3}$ do $49 \cdot 10^{-1} \text{ N}$ odstupňované v desítkách stupňů. Mikrotvrдост se smluvně označuje značkou HV doplněnou velikostí zatížení. Volba zatížení při měření mikrotvrдостi závisí na drsnosti a tvrdosti zkoušeného materiálu. Pro tento účel slouží nomogram znázorněný na obr. č.6.



Obr. č. 6 - Nomogram pro volbu zátěže pro měření mikrotvrdosti /7/

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1. Chemická analýza materiálu

V experimentální části vycházím z rozboru oceli 12060 a 12020. Chemická analýza byla provedena v laboratořích Poldi SONP Kladno - příloha.

3.1.1. Ocel 12060

Složení oceli 12060 je následující:

a) podle ČSN (tab. č.1) /16/

Tabulka č. 1 - Chemické složení dle ČSN oceli 12060

Chemické složení (rozbor tavby) %	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
	0,52	0,50	0,17	max.	max.	max.	max.
	až	až	až	0,25	0,30	0,04	0,04
	0,60	0,80	0,37				

b) podle chemické analýzy (tab. 2)

Tabulka č. 2 - Chemická analýza oceli 12060

Chemický rozbor %	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
	0,56	0,60	0,26	0,05	0,03	0,015	0,021

Výchozí strukturu oceli 12060 po normalizačním žihání je na obr. č. 7. Struktura je tvořena feritickými a perlitickými zrny přibližně stejné velikosti rovnoměrně rozloženými v materiálu.



Obr. č. 7 - Výchozí struktura oceli 12060

3.1.2. Ocel 12020

Složení oceli

a) podle ČSN (tab.3) /15/

Tabulka č. 3 - Chemické složení dle ČSN oceli 12020

Chemické složení (rozbor tavby) %	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
	0,13	0,60	0,17				
	až	až	až	max.	max.	max.	max.
	0,20	0,90	0,37	0,25	0,30	0,04	0,04

b) podle chemické analýzy (tab. 4)

Tabulka č. 4 - Chemická analýza oceli 12020

Chemický rozbor %	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
	0,13	0,43	0,19	0,10	0,06	0,01	0,031

Výchozí struktura oceli 12020 po normalizačním žihání je na obrázku č. 8. Struktura je tvořena feritem s ostrovy perlitu.



Nital 3 %

500x

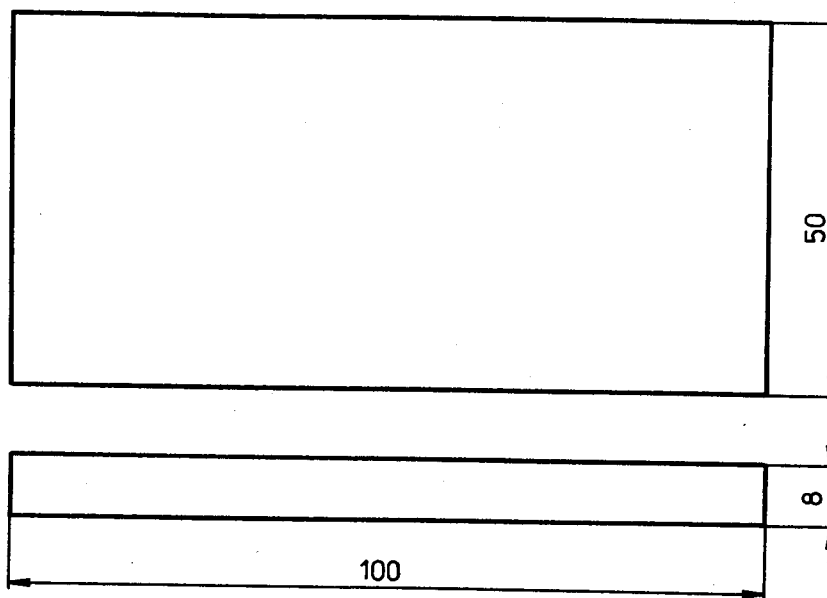
Obr. č. 8 - Výchozí struktura oceli 12020

3.2 Příprava vzorků

Vzorky byly zpracovány pro oba materiály stejným způsobem.

3.2.1. Vzorky pro ozáření laserem

Vzorky byly odebrány z pásů. Velikost vzorků před ozářením byla 100 x 50 x 8 mm (obr. č.9)



Obr. č. 9 - Rozměry vzorku pro ozáření laserem

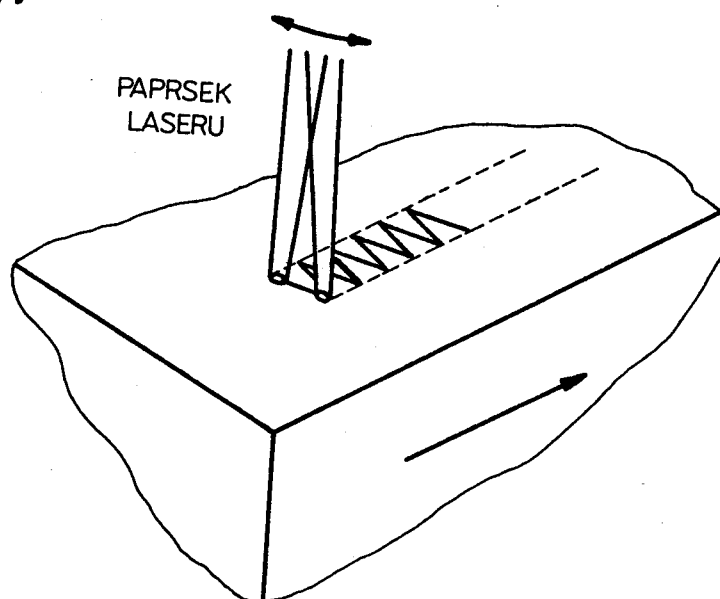
Povrch vzorku byl opracován broušením. Plocha vzorku, na kterou mělo být provedeno ozáření byla "načerněná". Úprava byla provedena nástřikem černé barvy RALYE MAT. Všechny vzorky měly vrstvu nástřiku přibližně o stejné tloušťce. Tato vrstva má za úkol pohlcovat paprsek a snižovat jeho odrazivost.

Z každé oceli bylo odebráno pět vzorků, které byly ozářeny různými rychlostmi. Rychlosti ozáření a označení vzorků jsou v tabulce 5.

Tabulka č. 5 - Rychlost ozařování a označení vzorků

Rychlost	mm/min	Mat.	Vzorek	Mat.	Vzorek
v_I	1600	12 060	61	12 020	21
v_{II}	2000		62		22
v_{III}	2400		63		23
v_{IV}	2600		64		24
v_V	2800		65		25

Vzorky byly ozářeny kontinuálním laserem, kývavým paprskem (obr. č.10).



Obr. č.10 - Způsob ozáření kývavým paprskem

Parametry laseru

Výkonový laser CONTROL LASER LTD (GB)

Jmenovitý výkon 2,5 kW

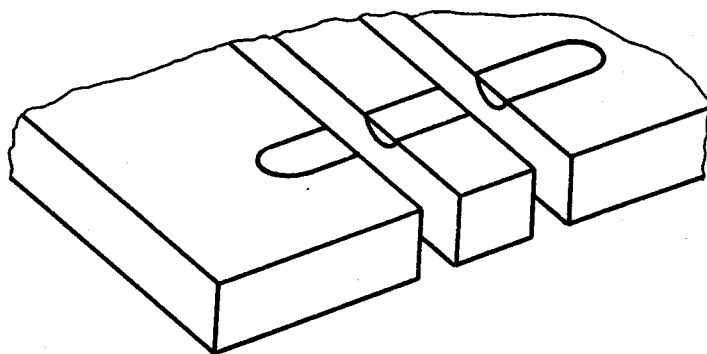
Snížený výkon 2 kW

3.2.2. Vzorky pro měření mikrotvrdosti na povrchu

Vzorky pro měření mikrotvrdosti byly na povrchu očištěny od zbylé vrstvy nástřiku pomocí acetonu a povrch přebroušen jemným brusným papírem.

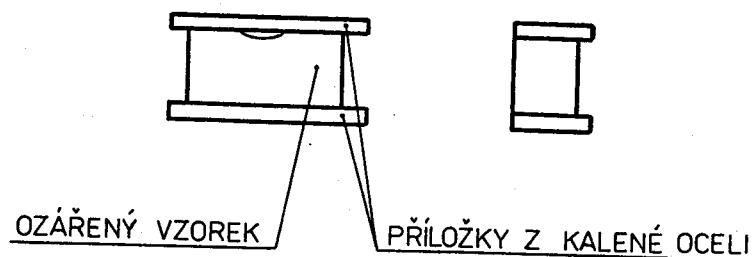
3.2.3. Vzorky pro optickou mikroskopii

Vzorky pro optickou mikroskopii byly rozřezány v rovině kolmé na stopu ozáření (obr. č. 11).



Obr. č. 11 - Dělení vzorku

Dále byly vzorky zpracovány běžným způsobem s tím rozdílem, že na vrchní plochu (ozářená plocha) a spodní plochu byly připevněny příložky z kalené oceli (obr. č. 12), jež mají zabránit zaoblování hran při leštění.



Obr. č. 12 - Vzorek pro optickou mikroskopii

Takto připravené vzorky byly zality do dentakrylu, broušeny na metalurgických bruskách a leštěny na metalurgické leštičce. Zviditelnění struktury bylo provedeno leptadlem - Nital 3 %.

3.2.4. Vzorky pro měření mikrotvrdosti v příčném řezu

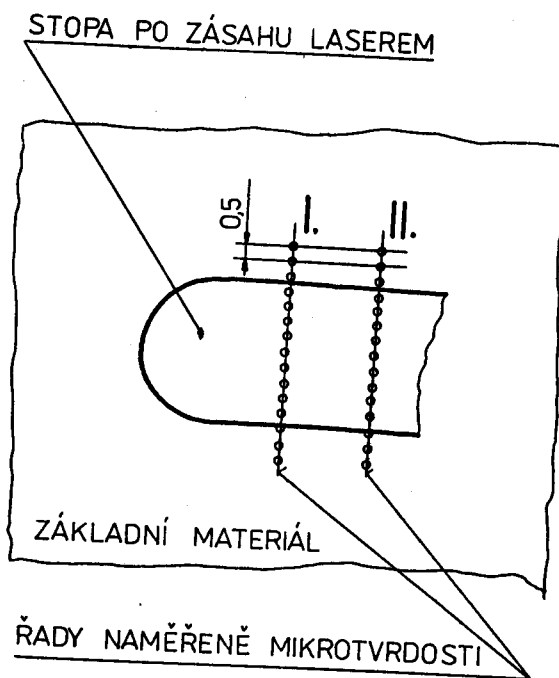
Pro měření mikrotvrdosti v příčném řezu byly použity stejné vzorky jako pro optickou mikroskopii.

3.3. Měření mikrotvrdosti a tvrdosti

Měření mikrotvrdosti (na povrchu a v příčném řezu) bylo provedeno na mikrotvrdoměru PMT 3 vybaveným mikroskopem.

3.3.1. Měření mikrotvrdosti na povrchu

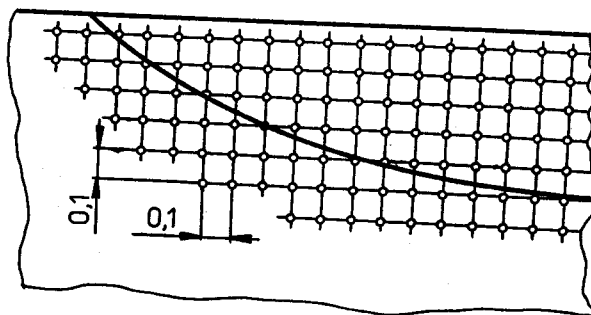
Měření mikrotvrdosti na povrchu se provádělo na již popsaných vzorcích. Mikrotvrdost byla měřena u každého vzorku ve dvou řadách (obr. č. 13).



Obr. č. 13 - Měření mikrotvrdosti na povrchu
Bylo použito zatížení 1,96 N (HV 0,2). Vzdálenost mezi vtisky byla 0,5 mm (obr. č.13).

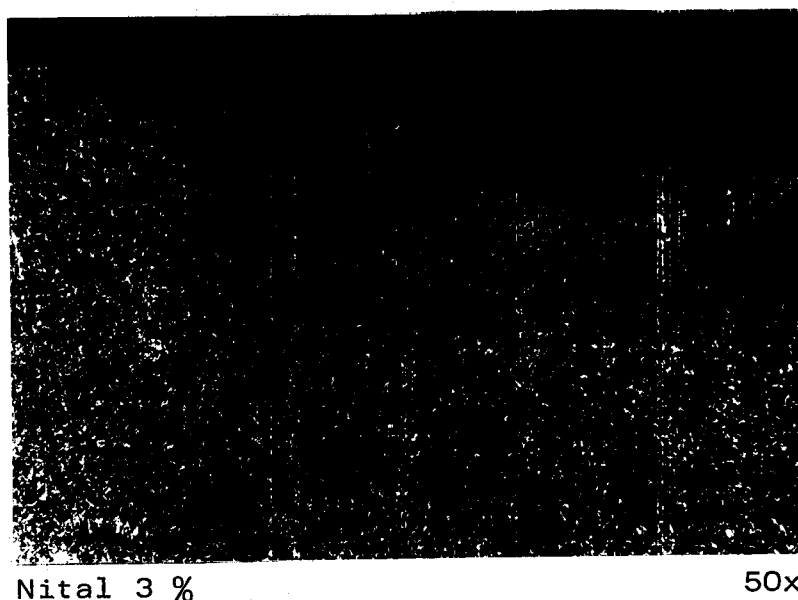
3.3.2. Měření mikrotvrdosti v příčném řezu

Pro měření mikrotvrdosti byla vytvořena síť vtisků. Vzdálenost mezi jednotlivými vtisky byla 0,1 mm a to jak v šířce ozářené stopy, tak i do hloubky této stopy (obr.č. 14).



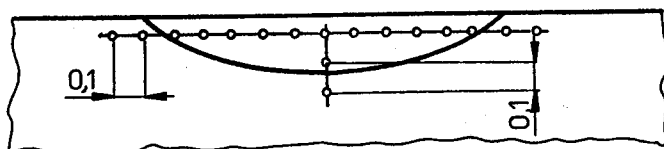
Obr. č.14 - Síť mikrotvrdosti v příčném řezu

Na obr. č.15 je znázorněna síť mikrotvrdosti při měření mikrotvrdosti vzorku č. 61.



Obr. č.15 - Síť mikrotvrdosti vytvořená u vzorku č.61

U materiálu 12020 byla mikrotvrdost v příčném řezu měřena pouze pod povrchem a ve středu stopy do hloubky prokalené vrstvy (obr. č.16).



Obr. č.16 - Měření mikrotvrdosti v příčném řezu u oceli 12020

Pro měření mikrotvrdosti v příčném řezu bylo použito zatížení $9,81 \cdot 10^{-1} \text{ N}$ (HV 0,1),

3.3.3. Měření tvrdosti

Pro kontrolu tvrdosti základního materiálu bylo provedeno měření makrotvrdosti na Vickersově tvrdoměru. Vtisk byl proveden v rohu vzorku, kde nebyl materiál ovlivněn od zásahu laserem. Bylo použito zatížení 294 N (HV 30).

Dále bylo provedeno měření tvrdosti přibližně ve středu stopy ozáření laserem, bylo použito rovněž zatížení 294 N.

3.4. Vyhodnocení výsledků měření mikrotvrdosti

Pro vyhodnocení výsledků měření mikrotvrdosti byla navržena "METODA S ROZDÍLNOU HUSTOTOU DAT, ZÁVISLOU NA MNOŽSTVÍ ZMĚN".

Při této metodě byla požadována ideální křivka, která by měla vycházet jako křivka homogenního materiálu. Pro tento materiál by platilo, že mikrotvrdost není závislá na tvaru krystalových elementů, jemnosti krystalizace, teplotě, cizích příměsí, vnitřním pnutí a dalších činitelích ovlivňujících kolísání mikrotvrdosti.

Ideálem je křivka:

- a) plynulá (monotonní), mající neměnnou první derivaci více než dvakrát (na počáteční hodnotě a ve vrcholu - maximu),
- b) vycházející a vcházející do hodnoty počáteční tvrdosti plynule,
- c) měla by být souměrná podle maxima.

Tato metoda vychází z několika dílčích programů:

1. Z naměřených hodnot mikrotvrdosti byl nejprve proveden sloupcový diagram. Tento diagram vychází z předpokladu, že vždy do jednoho intervalu (sloupce) zařazujeme stejný počet hodnot, z kterých vypočteme aritmetický průměr podle vzorce (9).

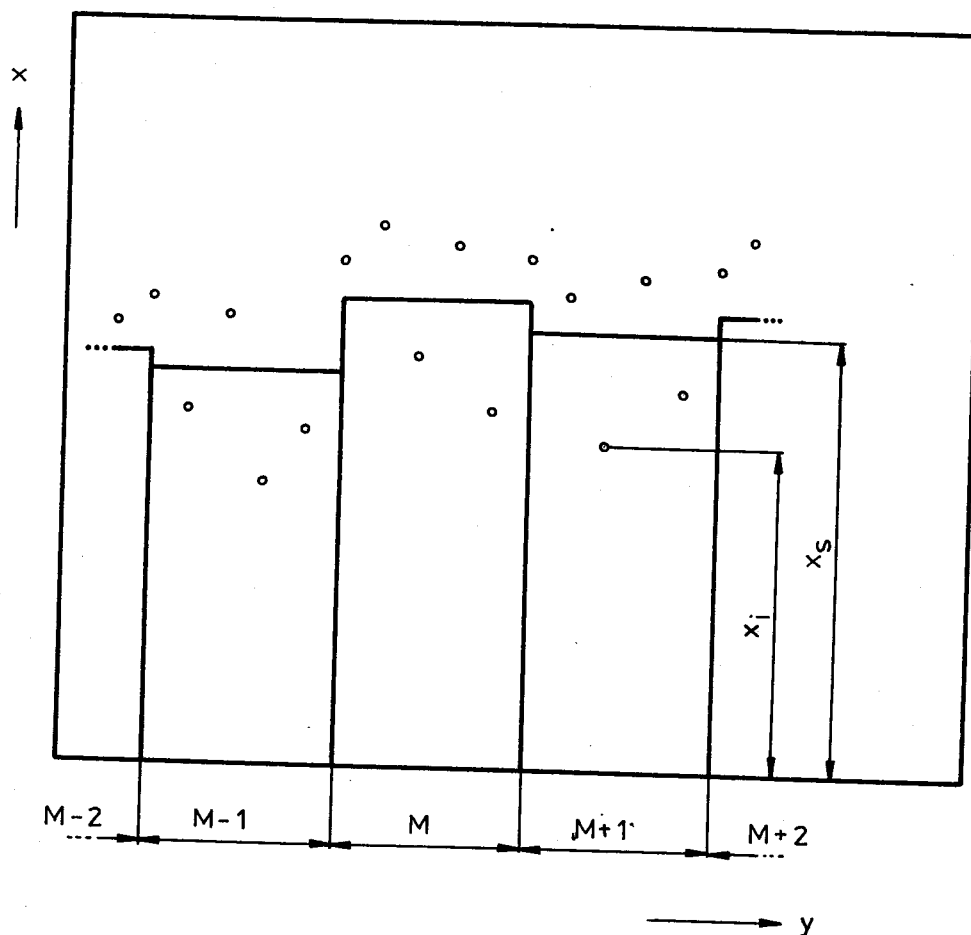
$$x_{s_j} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} ; \quad (9)$$

kde X_{sj} je střední hodnota j-tého intervalu (aritmetický průměr)

X_i je naměřená hodnota

n je počet hodnot v jednom intervalu sloupcového diagramu

*
Způsob sestrojování sloupcového diagramu je na obr. č.17.



Obr. č.17 - Sestrojování sloupcového diagramu

Pro výpočet hodnot sloupcového diagramu bylo použito dvou intervalů s rozdílným počtem hodnot. Počet prvků v intervalu , byl volen:

a) $n = 3$

b) $n = 5$

Výhodnější bylo volit interval s $n = 5$ prvky.

Sloupcový diagram byl omezen prokalenou oblastí (tj. naměřené hodnoty mikrotvrdosti byly v této zóně).

2. Vypočtené hodnoty ze sloupcového diagramu byly použity jako vstupní data pro polynomickou regresi. Tato regrese předpokládá, že body souřadnic funkce y_i jsou dány s určitou přesností (získané naměřením, které je vždycky doprovázeno chybou). Snaží se tedy, aby souřadnice dané funkce y_i byla aproximována funkcí $f(x_i)$ tak, aby rozdíl $d_i = f(x_i) - y_i$ byl co nejmenší. Není proto vhodné volit funkce s N parametry, neboť taková funkce nám redukuje chyby a naší snahou je chyby vyhladit. Aproximující funkcí je polynom m -tého stupně (10).

$$P_m(x) = a_0x^0 + a_1x^1 + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_mx^m; \quad (10)$$

Pro aproximaci hodnot ze sloupcového diagramu byla zvolena polynomická regrese třetího stupně.

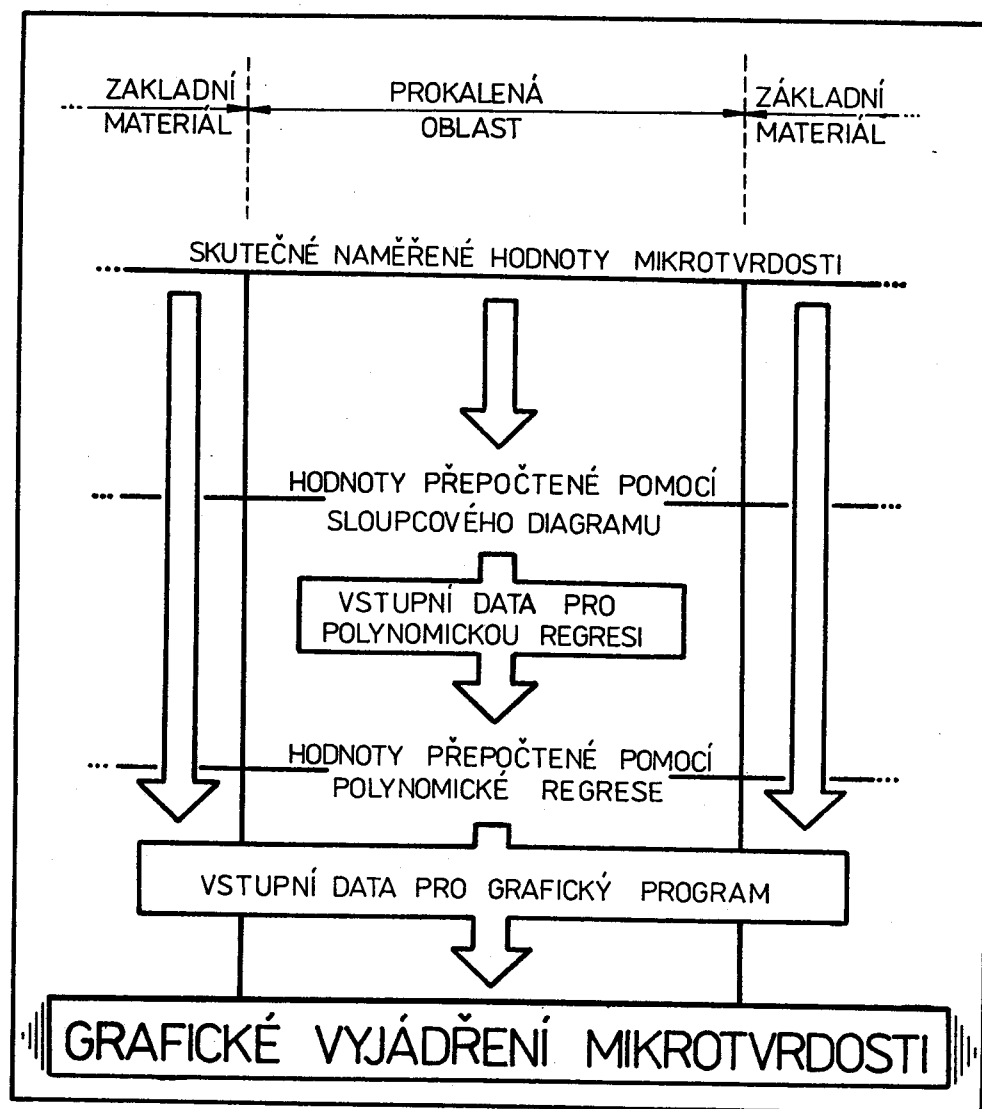
$$y_i = a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3; \quad (11)$$

Při volbě vyššího stupně regrese by již nebyly splněny předpoklady ideální křivky.

3. Vstupní data pro diagram mikrotvrdosti se sestává ze dvou hodnot. Byly to naměřené hodnoty přepočtené pomocí sloupcového digramu a regrese.

Pro výpočty a grafické zobrazení byl použit počítač EC 1033 s výstupem na řádkovou tiskárnu nebo s grafickým výstupem na digigraf DGF 1208.

Schema vyhodnocení mikrotvrdosti "METODOU S ROZDÍLNOU HUSTOTOU DAT, ZÁVISLOU NA MNOŽSTVÍ ZMĚN" je znázorněno na obr. č. 18.



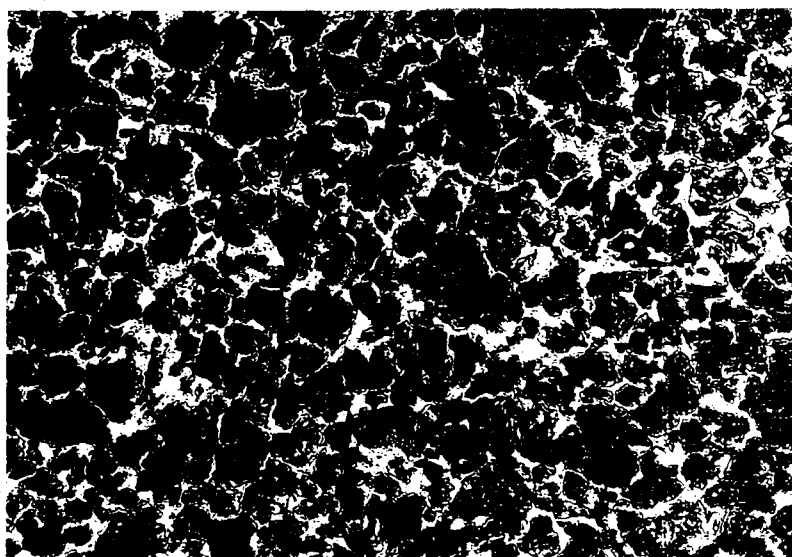
Obr. č. 18 - Schema metody grafického vyjádření mikrotvrdomosti

Program pro polynomickou regresi je standartní funkcí počítače EC 1033, program pro grafické vyjádření mikrotvrdomosti je v příloze pod označením FKROGRA1. Pod označením FKROGRA3 je program pro grafické vyjádření mikrotvrdomosti v závislosti na šířce a hloubce prokalené vrstvy.

3.5. Metalografické pozorování vzorků TZ laserem

Pozorování makrostruktur i mikrostruktur se provádělo na metalografickém mikroskopu NEOPHOT 2, z kterého byly pořízeny i fotografie.

3.5.1. Struktura výchozího materiálu



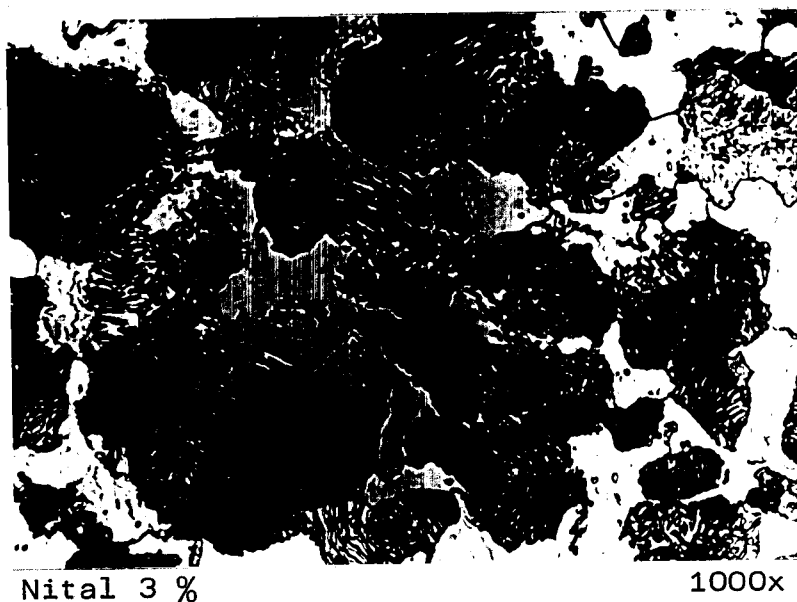
Nital 3 %

200x

Obr. č. 19 - Struktura výchozího materiálu oceli 12060

Na obr. č.19 je struktura výchozího materiálu oceli 12060 před TZ laserem. Tato struktura je 200x zvětšená. Je to feriticko-perlitická struktura, kde bílá místa představují ferit a šedá místa představují perlitická zrna.

Na obr. č.7 je tatáž struktura, která je zvětšená 500x. Zde můžeme lépe pozorovat pravidelné rozložení jednotlivých strukturálních částí (feritu, perlitu).



Obr. č.20 - Struktura výchozího materiálu oceli 12060

Na obr. č.20 je opět struktura výchozího materiálu oceli 12060 zvětšená 1000x. Lze na ni pozorovat již znatelné lamely perlitických zrn. Tato zrna mají nestejnou velikost, protože řez touto rovinou nebyl kolmý na lamely zrn perlitu.

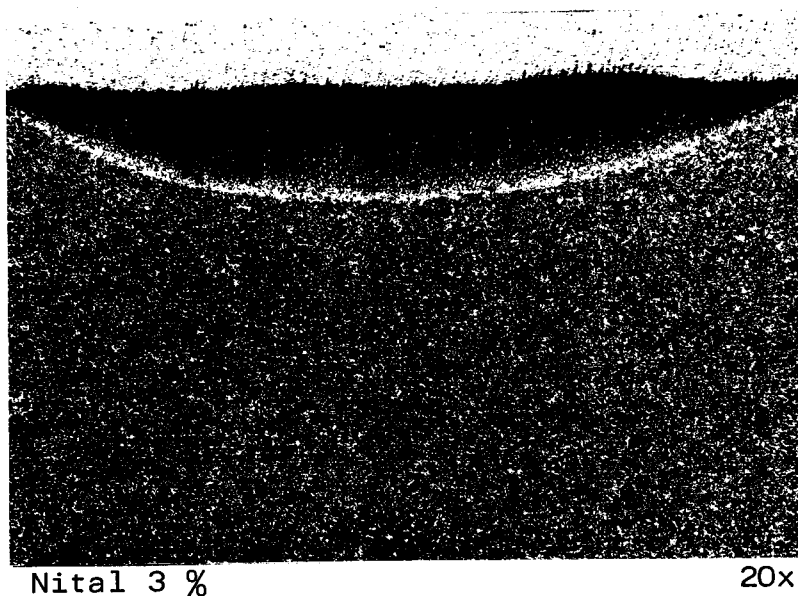


Obr. č.21 - Struktura výchozího materiálu oceli 12020

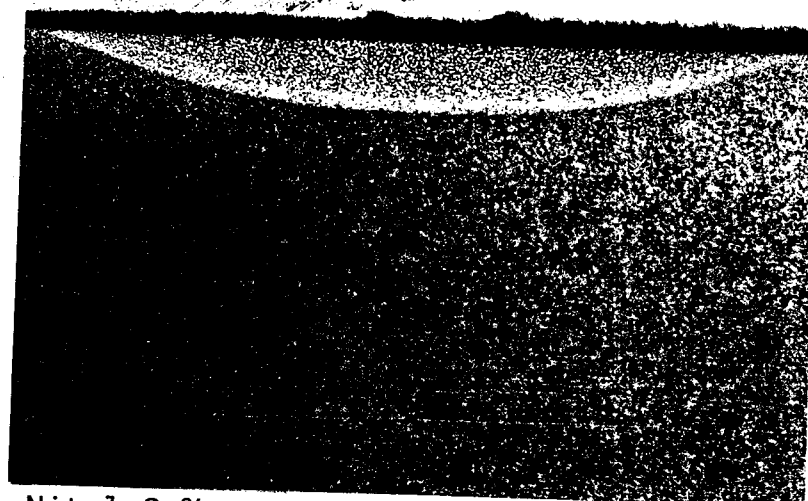
Na obr. č.21 je vidět struktura výchozího materiálu oceli 12020, která je zvětšena 100x. Na tomto obrázku lze sledovat feriticko-perlitickou strukturu. Světlá místa tvoří ferit a tmavá místa tvoří perlit. Perlit vlivem obsahu Fe_3C je zde v menším množství.

Na obrázku č. 8 je možno pozorovat zřetelněji lamely perlitických zrn. Zrna jsou opět nestekré velikosti, což je důsledkem řezu struktury, která nebyla kolmá na lamely perlitu.

3.5.2. Struktura po TZ laserem



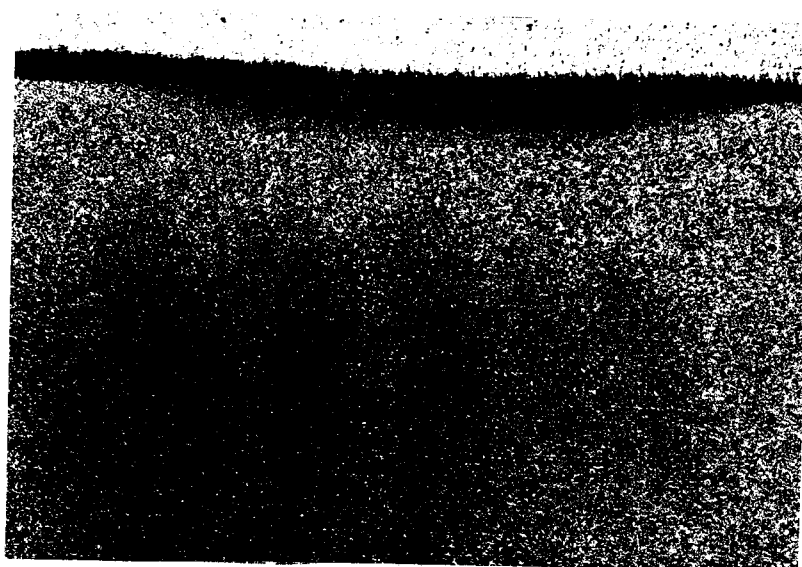
Obr. č.22 - Hloubka prokalené vrstvy po TZ laserem
u oceli 12060 - vzorek 61 ($h=0,68$ m, $s=5,3$ mm)



Nital 3 %

20x

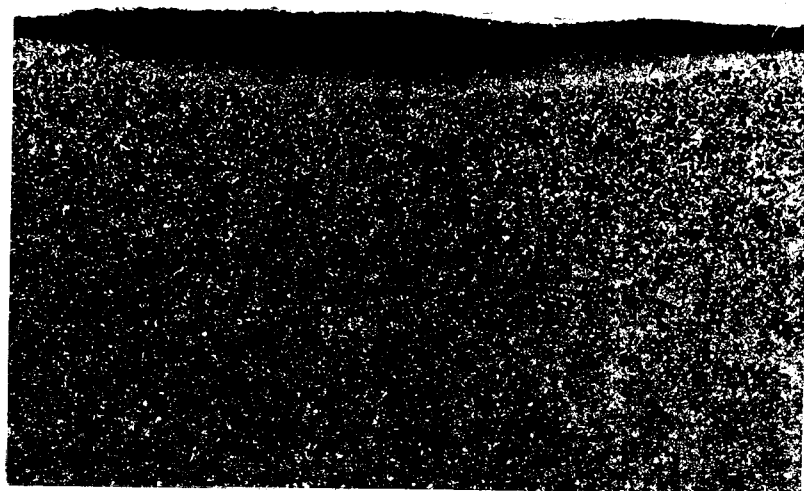
Obr. č.23 - Hloubka prokalené vrstvy po TZ laserem
u oceli 12060 - vzorek 62 ($h=0,415$, $s=4,6\text{mm}$)



Nital 3 %

20x

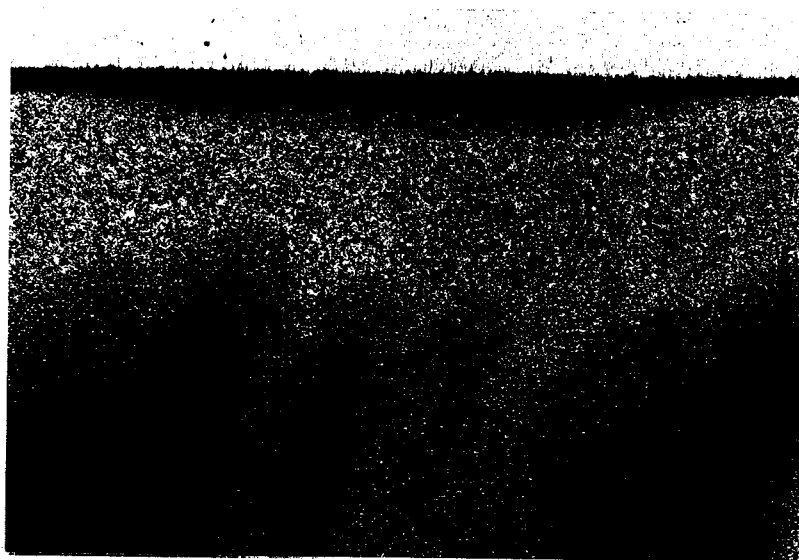
Obr. č.24 - Hloubka prokalené vrstvy po TZ laserem
u oceli 12060 - vzorek 63 ($h=0,36\text{mm}$, $s=4,2\text{ mm}$)



Nital 3 %

20x

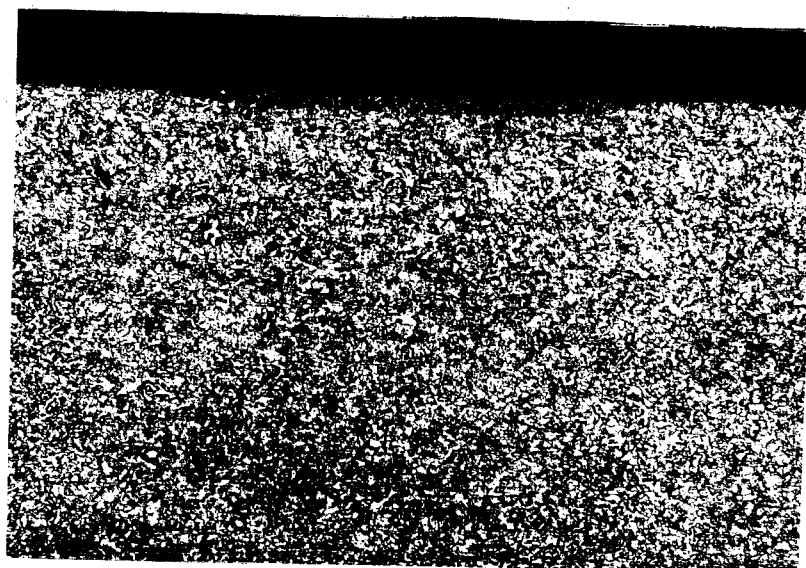
Obr. č. 25 - Hloubka prokalené vrstvy po TZ laserem
u oceli 12060 - vzorek 64 ($h=0,315$ mm, $s=4,6$ mm)



Nital 3 %

20x

Obr. č. 26 - Hloubka prokalené vrstvy po TZ laserem
u oceli 12060 - vzorek 65 ($h=0,196$, $s=4$ mm)



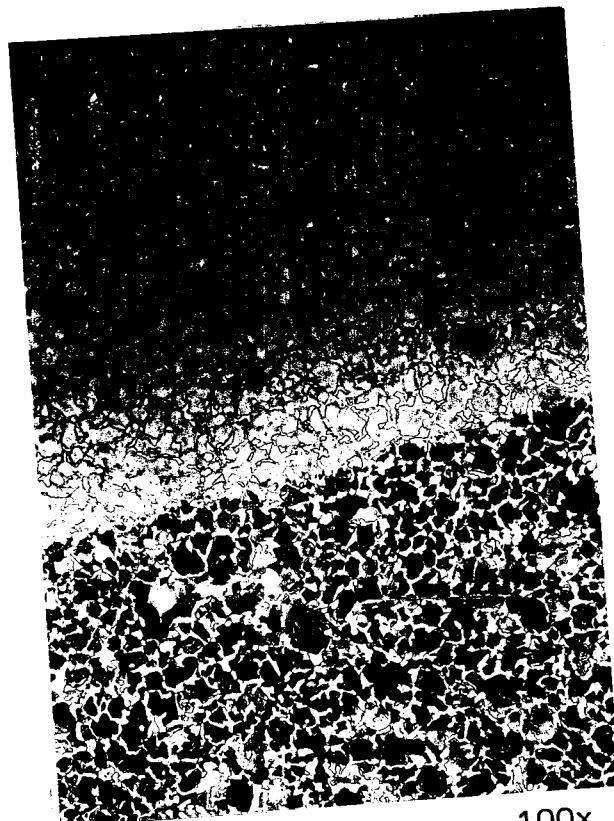
Nital 3 %

20x

Obr. č. 27 - Hloubka prokalené vrstvy po TZ laserem
u oceli 12020 - vzorek 21 ($h=0,066\text{mm}$, $s=3,6\text{mm}$)

Na obr. č. 22 - 27 lze pozorovat stopu prokalené vrstvy. Tato struktura je zvětšena 20x. Hloubka prokalené vrstvy se vzrůstající rychlostí zmenšuje.

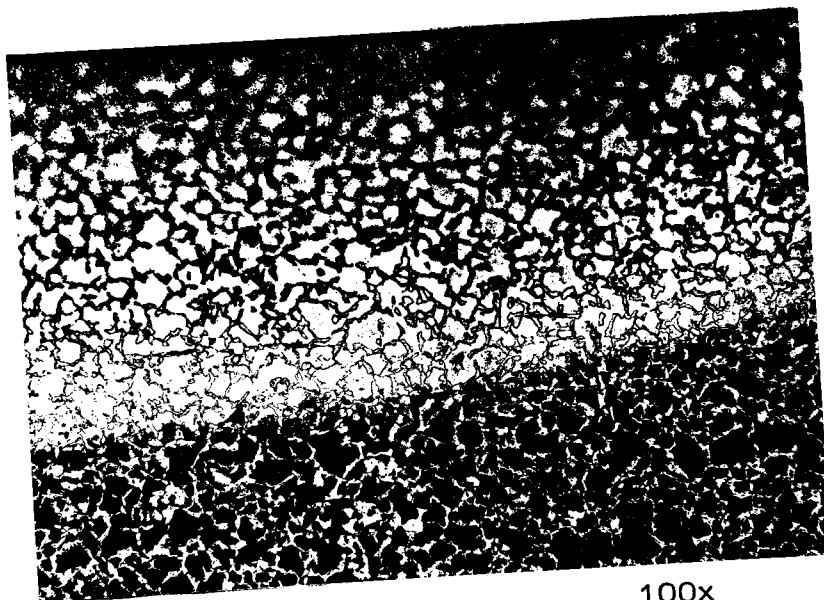
Na obr č. 24 a 26 je vidět pod touto stopou nerovnoměrné shlukování cementitu po válcování.



Nital 3 %

100x

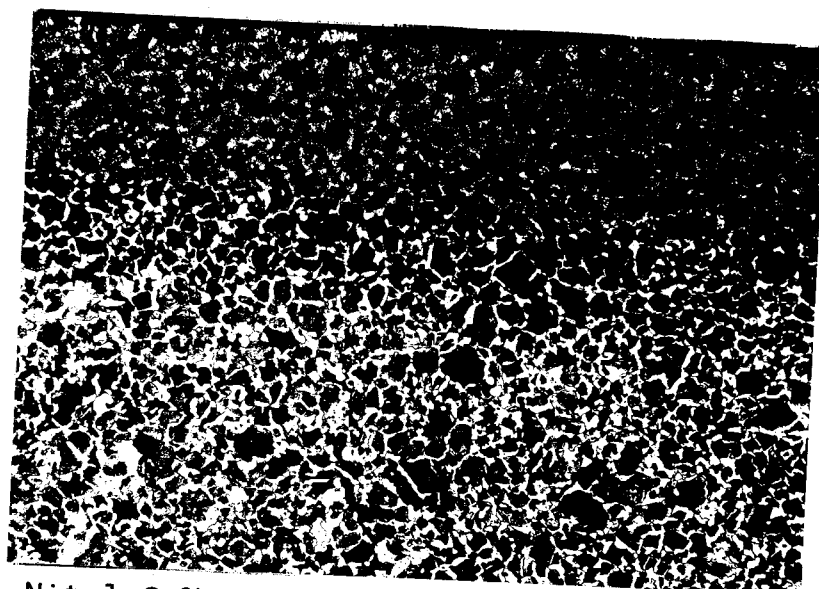
Obr. č. 28 - Část prokalené vrstvy a základní struktury
oceli 12060 - vzorek 61



Nital 3 %

100x

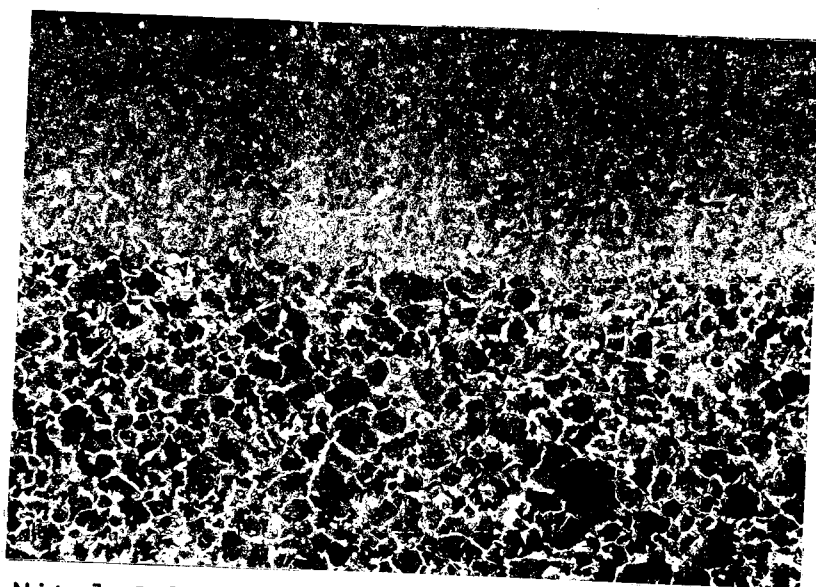
Obr. č. 29 - Část prokalené vrstvy a základní struktury
oceli 12060 - vzorek 62



Nital 3 %

100x

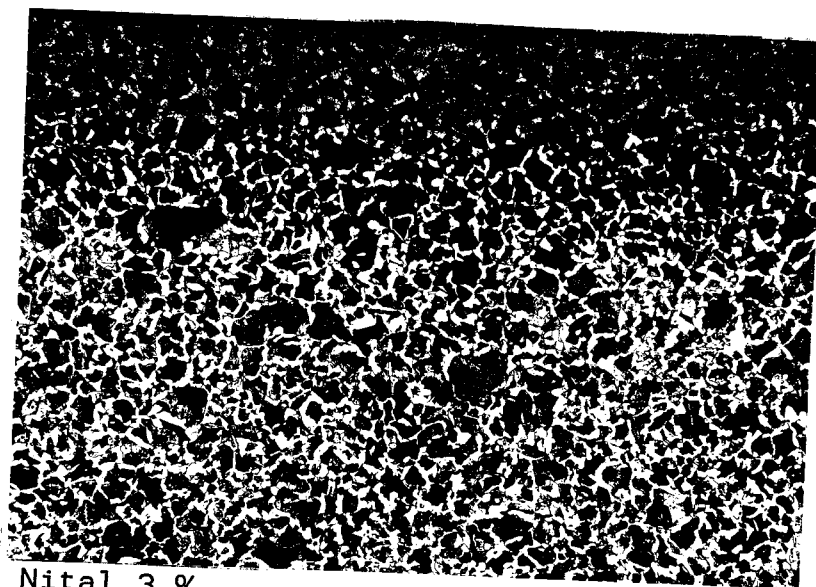
Obr. č. 30 - Část prokalené vrstvy a základní struktury
oceli 12060 - vzorek 63



Nital 3 %

100x

Obr. č. 31 - Část prokalené vrstvy a základní struktury
oceli 12060 - vzorek 64

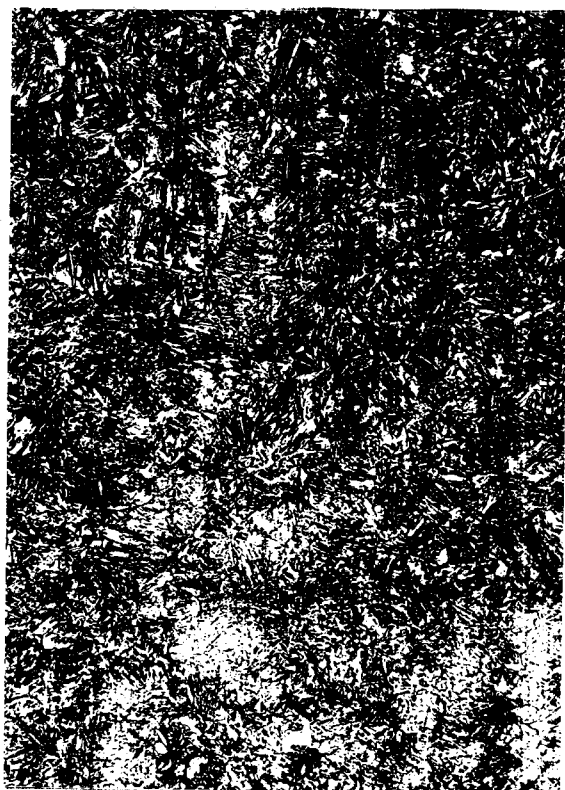


Nital 3 %

100x

Obr. č. 32 - Část prokalené vrstvy a základní struktury
oceli 12060 - vzorek 65

Na obrázku č. 28 - 32 jsou vidět pásma prokalené oblasti. V horní části obrázku je možné pozorovat martenzitickou strukturu, která přechází v oblast tvořenou nehomogenním martenzitem a feritem a dále přechází do oblasti základní struktury, která není nijak tepelně ovlivněna.

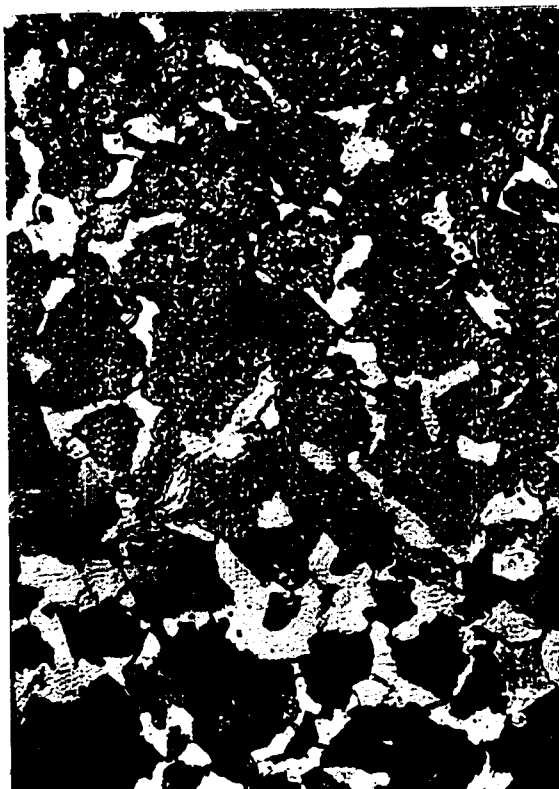


Nital 3 %

500x

Obr. č. 33 - Martenzitická struktura po TZ laserem
u oceli 12060 - vzorek 61

Na obrázku č. 33 je vidět martenzitická struktura z které je patrná pravidelná morfologie latěk (60° a 120°). Je zde možné i vidět, z kterých strukturních součástí martenzit vznikal. Světlejší místa vznikala z feritu, tmavší místa z perlitu.



Nital 3 %

500x

Obr. č. 34 - Přejíchodová oblast s částí základní struktury
u oceli 12060 - vzorek 61

Na obrázku č. 34 je vidět přejíchodovou oblast. V horní části obrázku je možné pozorovat martenzit a částečně zrna feritu. Přejíchodová oblast přejíchází do základní struktury.

Struktury z obr. č. 33 a 34 lze též pozorovat na obr. č. 35 a 36, 37, 38, 39.



Nital 3 % 500x

Obr. č. 35 - Martenzitická struktura po TZ laserem
u oceli 12060 - vzorek 62



Nital 3 % 500x

Obr. č. 36 - Přechodová oblast v části základní struktury
u oceli 12060 - vzorek 62



Nital 3 %

500x

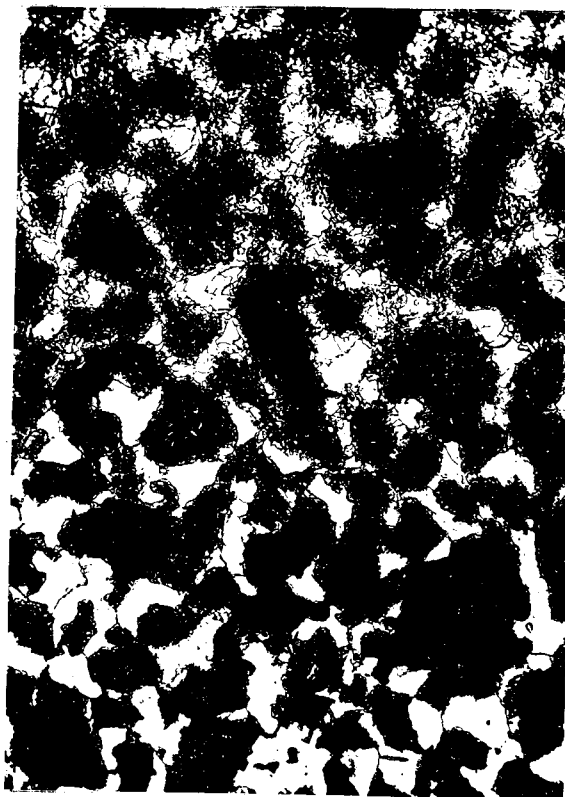
Obr. č.37 - Martenzitická struktura, přechodová oblast
a základní struktura u oceli 12060 po TZ
laserem - vzorek 63



Nital 3 %

500x

Obr. č.38 - Martenzitická struktura, přechodová oblast
a základní struktura u oceli 12060 po TZ
laserem - vzorek 64



Nital 3 %

500x

Obr.č. 39 - Martenzitická struktura, přechodová oblast
a základní struktura oceli 12060 po TZ
laserem - vzorek 65



Nital 3 %

1000x

Obr. č.40 - Martenzitická struktura po TZ laserem
oceli 12060

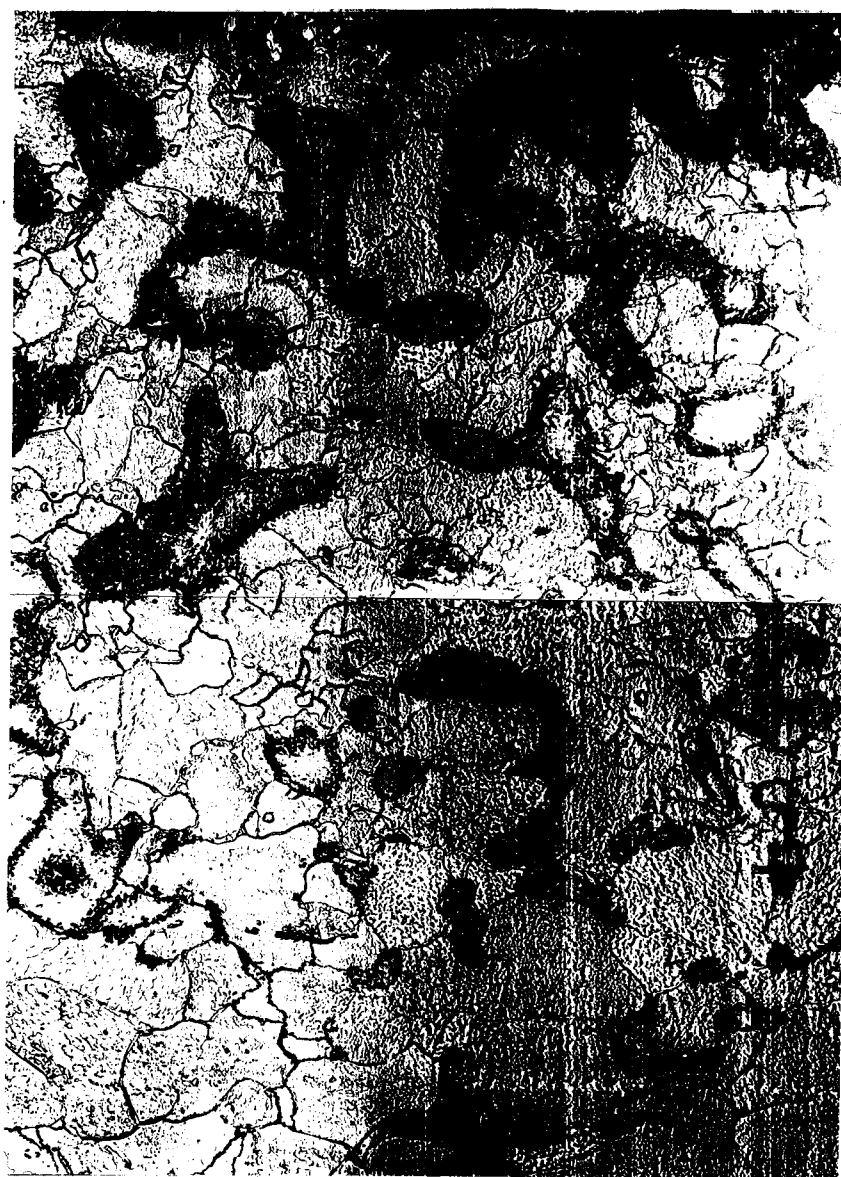
Na obrázku č. 40, který je zvětšený 1000x je vidět martenzitickou strukturu. Na této struktuře je opět dobře rozeznat, z kterých částí strukturních vznikal tento heterogenní martenzit. Světlá místa jsou tvořena martenzitem v nižší hodnotou rozpuštěného uhlíku. Tmavá místa jsou tvořena martenzitem a zřejmě i částmi perlitu.



Nital 3 %

100x

Obr. č. 41 - Část prokalené vrstvy a základní struktury oceli 12020 - vzorek 21



Nital 3 %

500x

Obr. č. 42 - Martenzitická struktura, přechodová oblast a základní struktura u oceli 12020 po TZ laserem - vzorek 21

Na obrázku č. 27 je vidět prokalená oblast u oceli 12020. Tato oblast pak je zřejmá z obr. 41 je tvořena opět několika pásmy. V horní části je oblast tvořena heterogenním martenzitem a feritem. Ve spodní části je vidět základní struktura. Na obr. č. 42 je jasně vidět jak přechází oblast martenzitu a feritu do základní struktury oceli 12020.

4. VÝSLEDKY A ZHODNOCENÍ

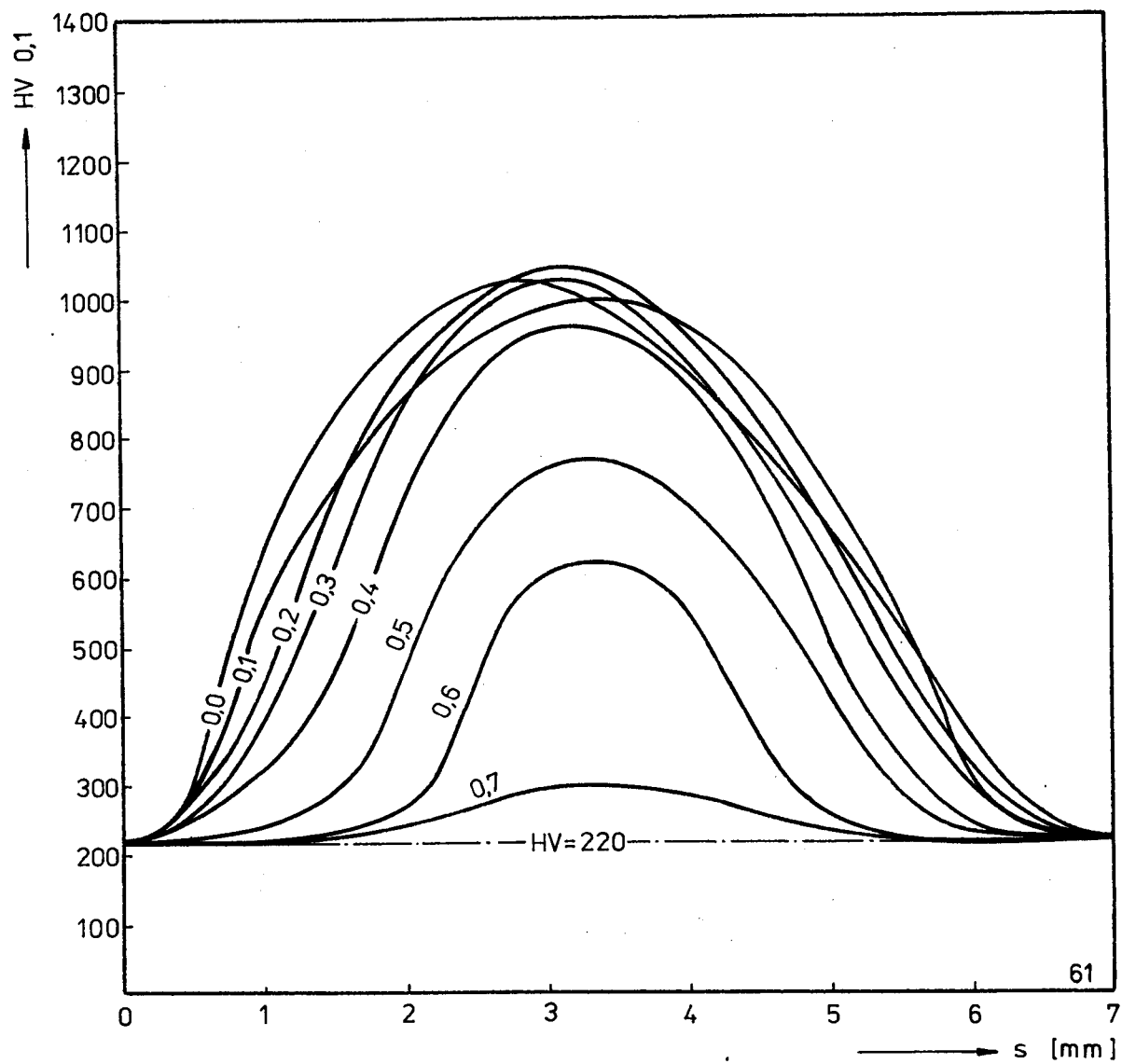
4.1. Výsledky mikrotvrdomosti

Výsledkem měření mikrotvrdomosti jsou grafické závislosti, které byly zpracovány z naměřených hodnot uvedených v tabulkách v příloze. Jedná se o grafické vyjádření:

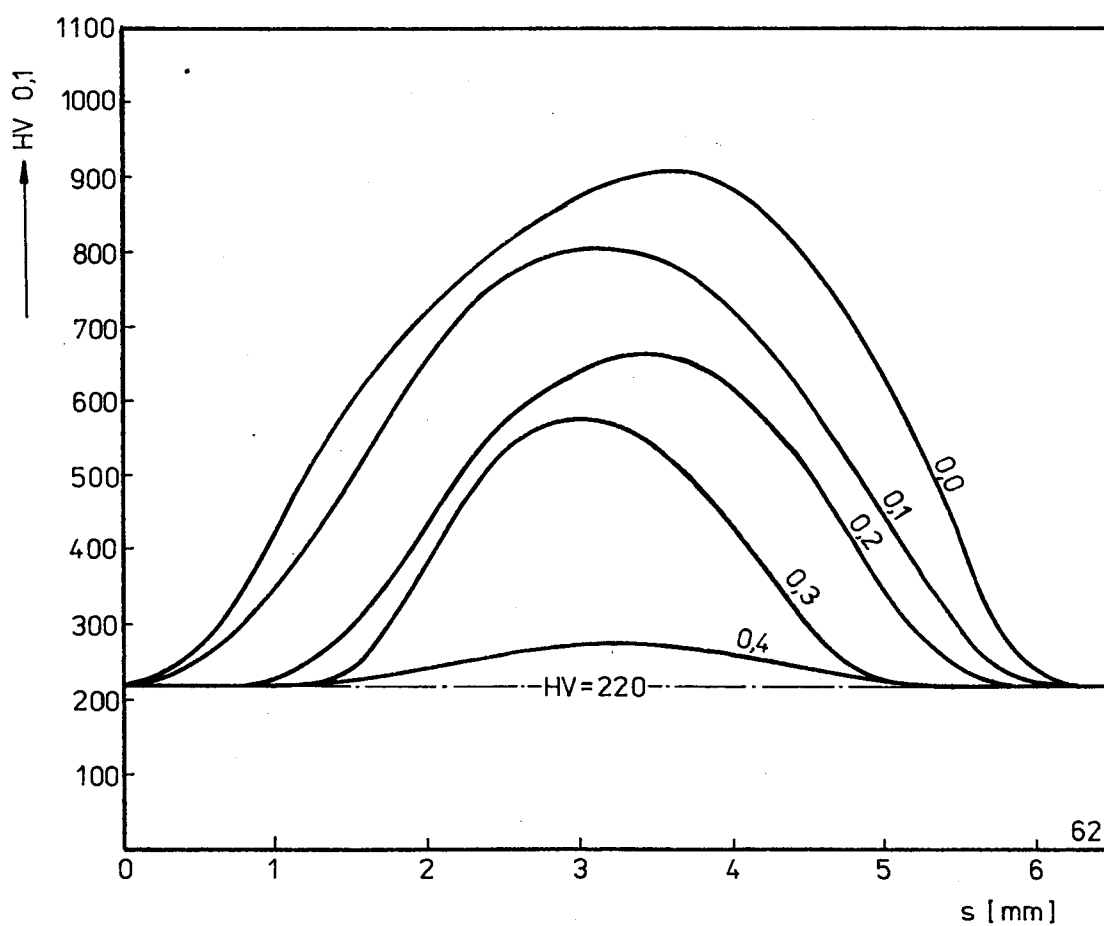
1. Tvrdomosti na šířce prokalené vrstvy - $HV = f(s)$
2. Tvrdomosti na hloubce prokaldné vrstvy - $HV = f(h)$
3. Tvrdomosti na rychlosti ozáření laserem - $HV = f(v)$
4. Hloubky prokaldné vrstvy na rychlosti ozáření laserem - $h = f(v)$

4.1.1. Grafické vyjádření tvrdomosti v závislosti na šířce prokaldné vrstvy

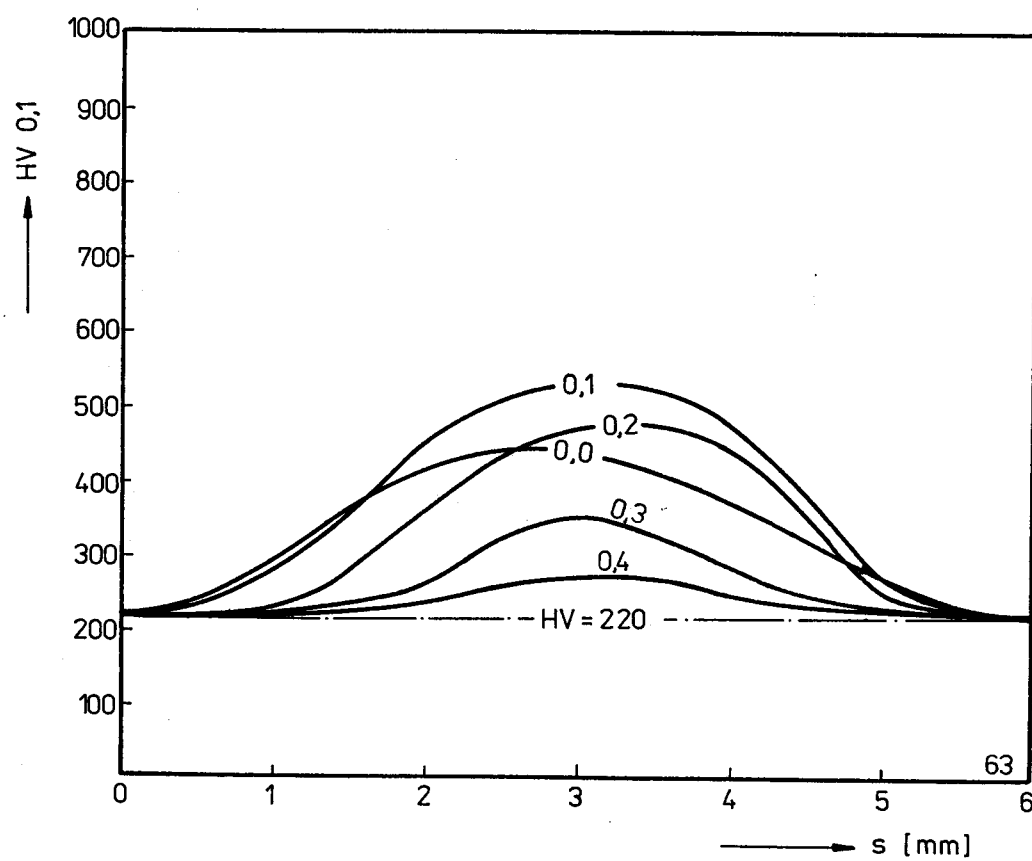
Při porovnání jednotlivých měření lze pozorovat, že nárůst tvrdomosti značně stoupne při přechodu do prokaldné oblasti. Tvrdomost je zde až 4x větší než tvrdomost základního materiálu. V oblasti mezi přechodovými pásmy se tvrdomost pohybuje přibližně na stejné hodnotě. Výsledky grafického vyjádření tvrdomosti v závislosti na šířce prokaldné oblasti jsou znázorněny v grafech na obr. č. 43 - 47, které byly zpracovány "METODOU S ROZDÍLNOU HUSTOTOU DAT, ZÁVISLOU NA MNOŽSTVÍ ZMĚN". Zobrazení naměřených hodnot s vyjádřením průběhu mikrotvrdomosti v jednotlivých hloubkách pod povrchem u vzorků 61 až 65 jsou v příloze.



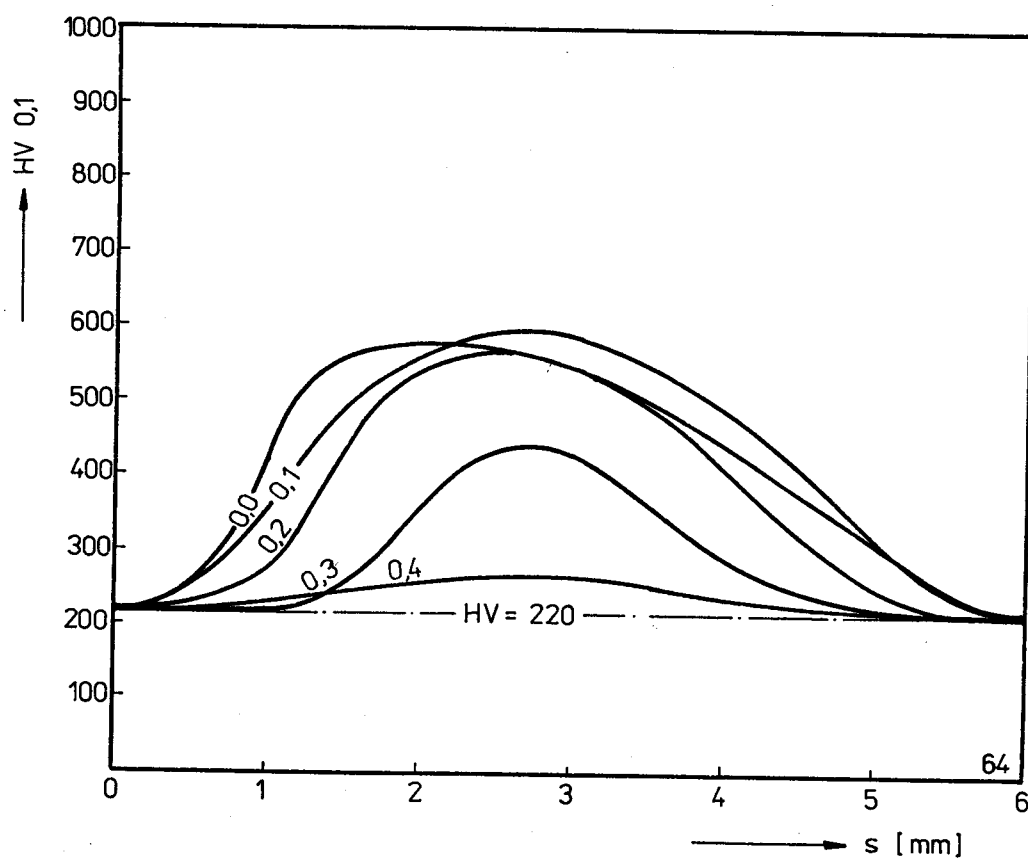
Obr. č.43 - Grafické vyjádření mikrotvrdosti v závislosti na šířce prokalené vrstvy oceli 12060 - vzorek 61



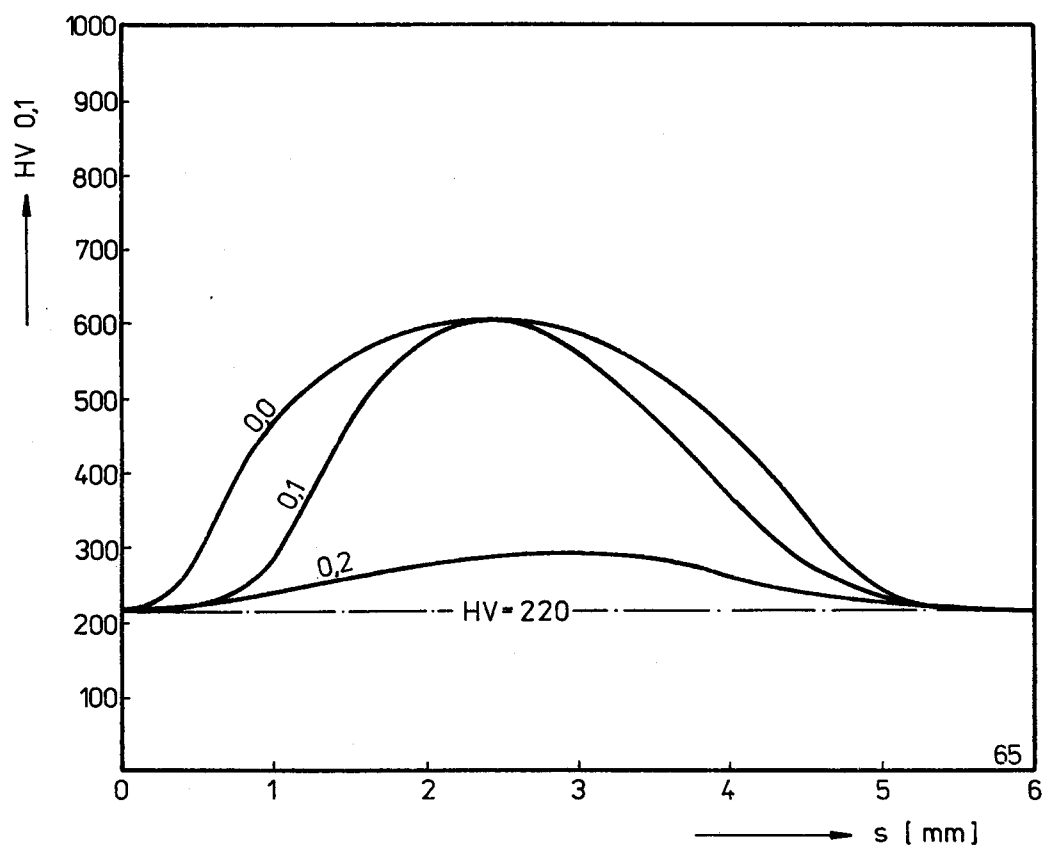
Obr. č. 44 - Grafické vyjádření mikrotvrlosti
v závislosti na šířce prokalené vrstvy
oceli 12060 - vzorek 62



Obr. č. 45 - Grafické vyjádření mikrotvrdosti
v závislosti na šířce prokalené vrstvy
oceli 12060 - vzorek 63



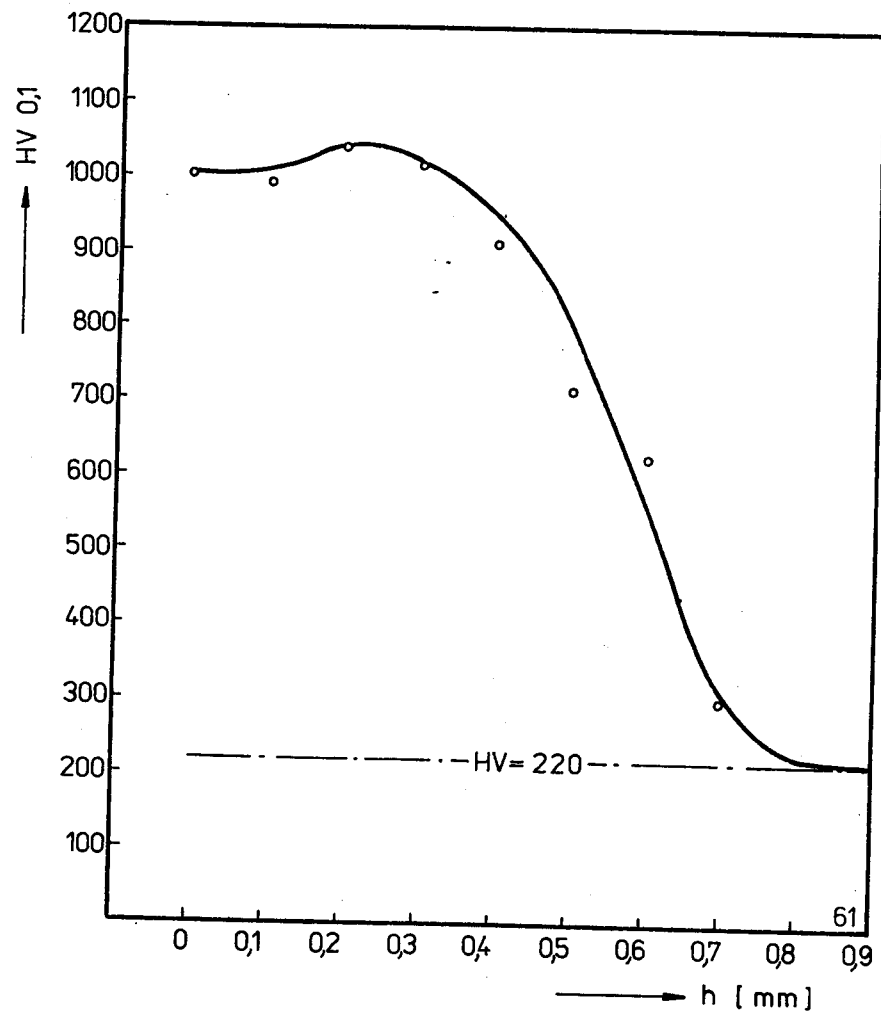
Obr. č. 46 - Grafické vyjádření mikrotvrdosti
v závislosti na šířce prokalené vrstvy
oceli 12060 - vzorek 64



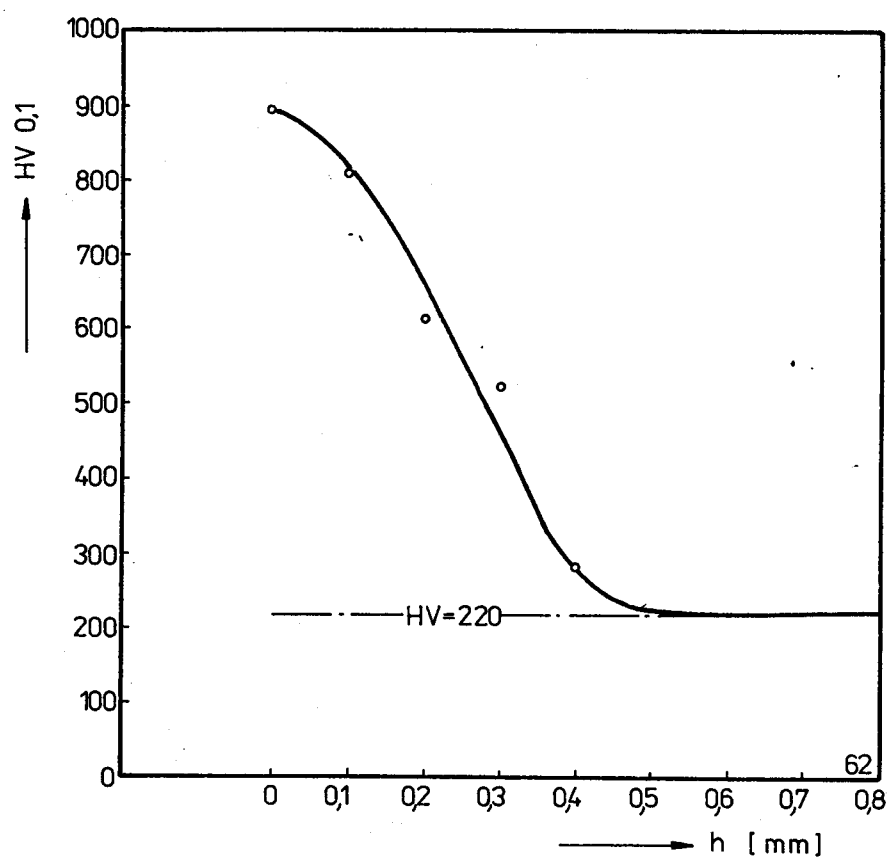
Obr. č. 47 - Grafické vyjádření mikrotvrdosti v závislosti na šířce prokalené vrstvy oceli 12060 - vzorek 65

4.1.2. Grafické vyjádření tvrdosti v závislosti na hloubce prokalené vrstvy

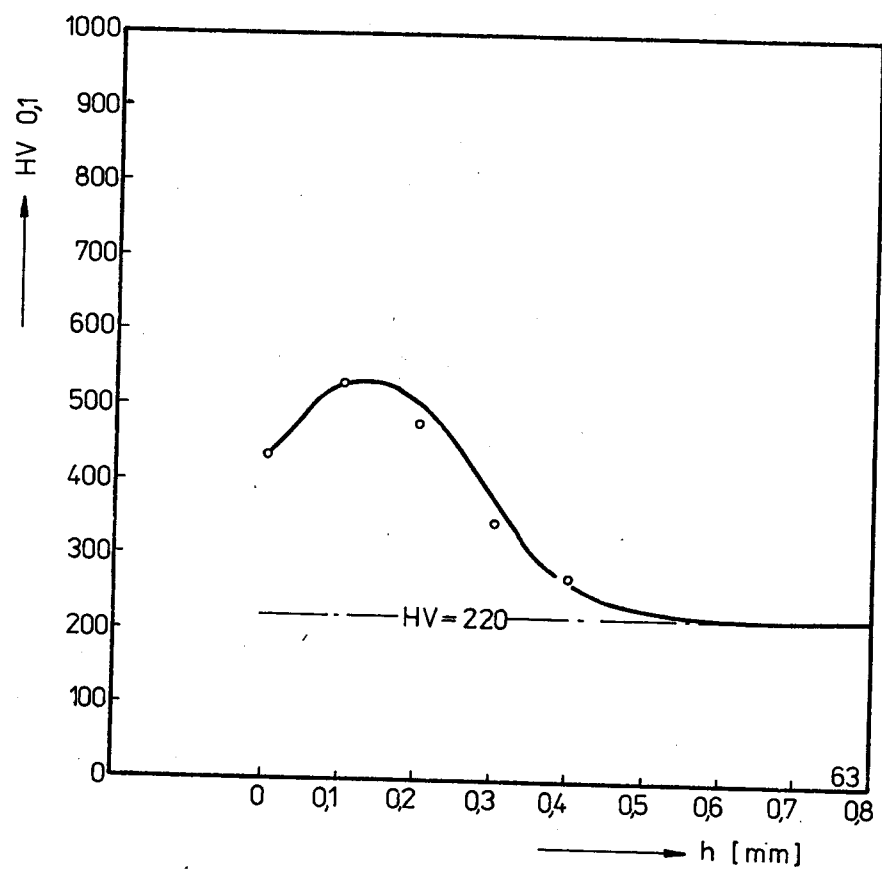
Při srovnání průběhu mikrotvrdosti měřené do hloubky prokalené vrstvy můžeme pozorovat, že tvrdost od povrchu do hloubky nejprve mírně narůstá a poté dojde k prudkému poklesu až na hodnotu tvrdosti základního materiálu. U vzorku č. 62 dochází přímo k prudkému poklesu na hodnotu základního materiálu. Výsledky grafického vyjádření tvrdosti v závislosti na hloubce prokalené vrstvy jsou znázorněny v grafech na obr. č. 48 - 52.



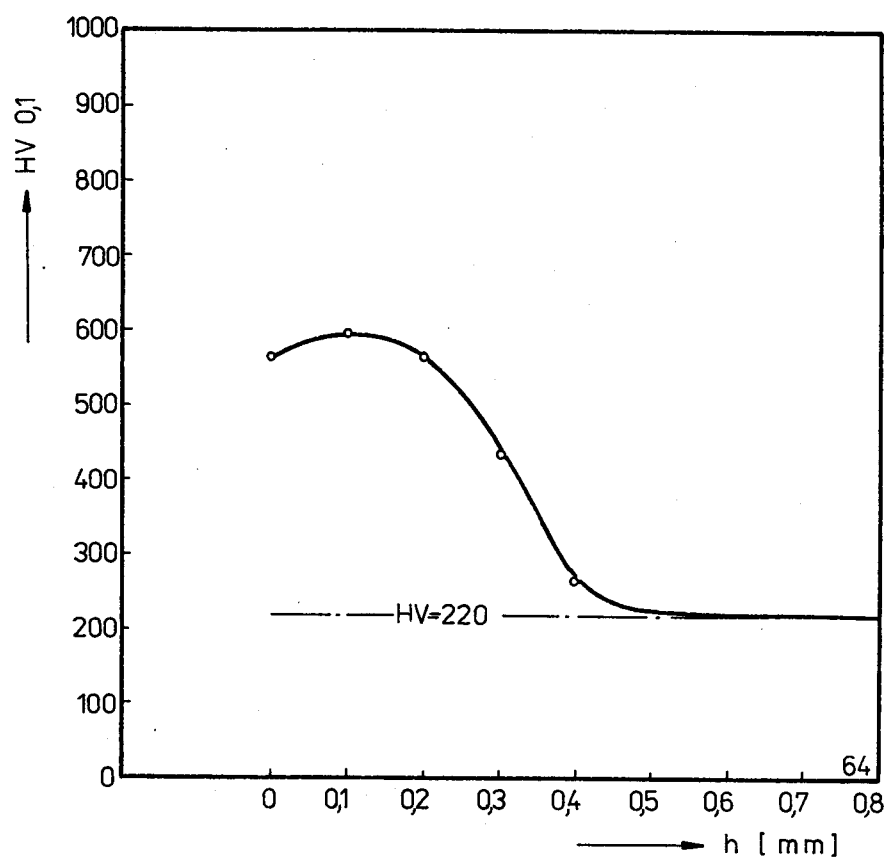
Obr. č. 48 - Grafické vyjádření mikrotvrdosti v závislosti na hloubce prokalné vrstvy oceli 12060 -
- vzorek č. 61



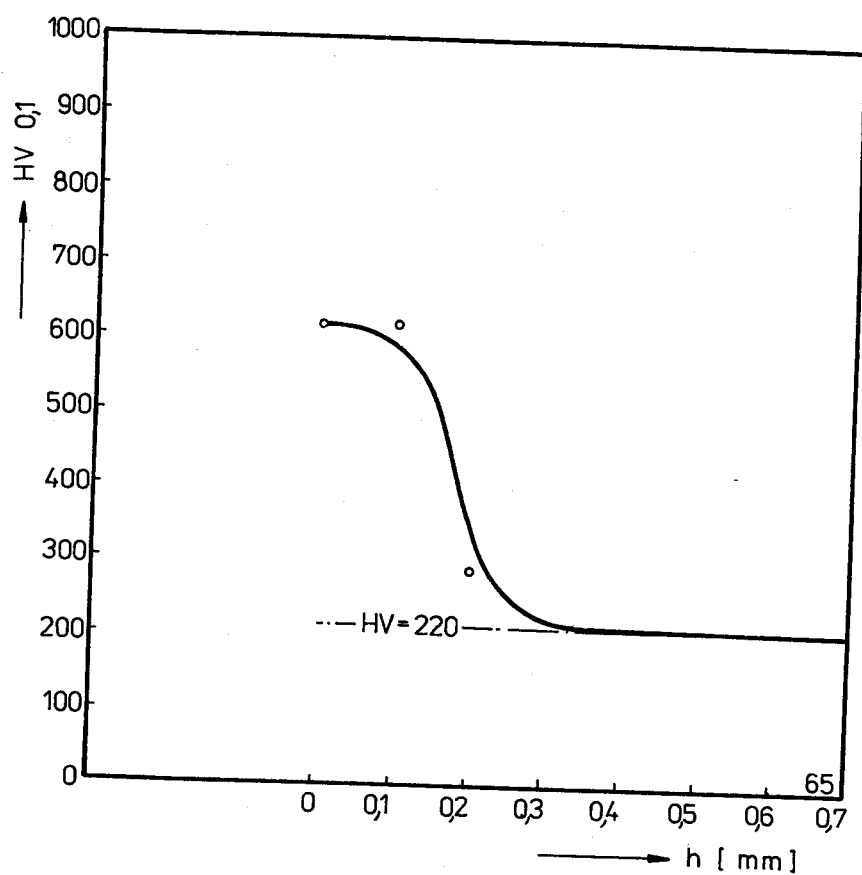
Obr. č. 49 - Grafické vyjádření mikrotvrdosti
v závislosti na hloubce prokalené vrstvy
oceli 12060 - vzorek č. 62



Obr. č. 50 - Grafické vyjádření mikrotvrdosti
v závislosti na hloubce prokalené
vrstvy oceli 12060 - vzorek č. 63

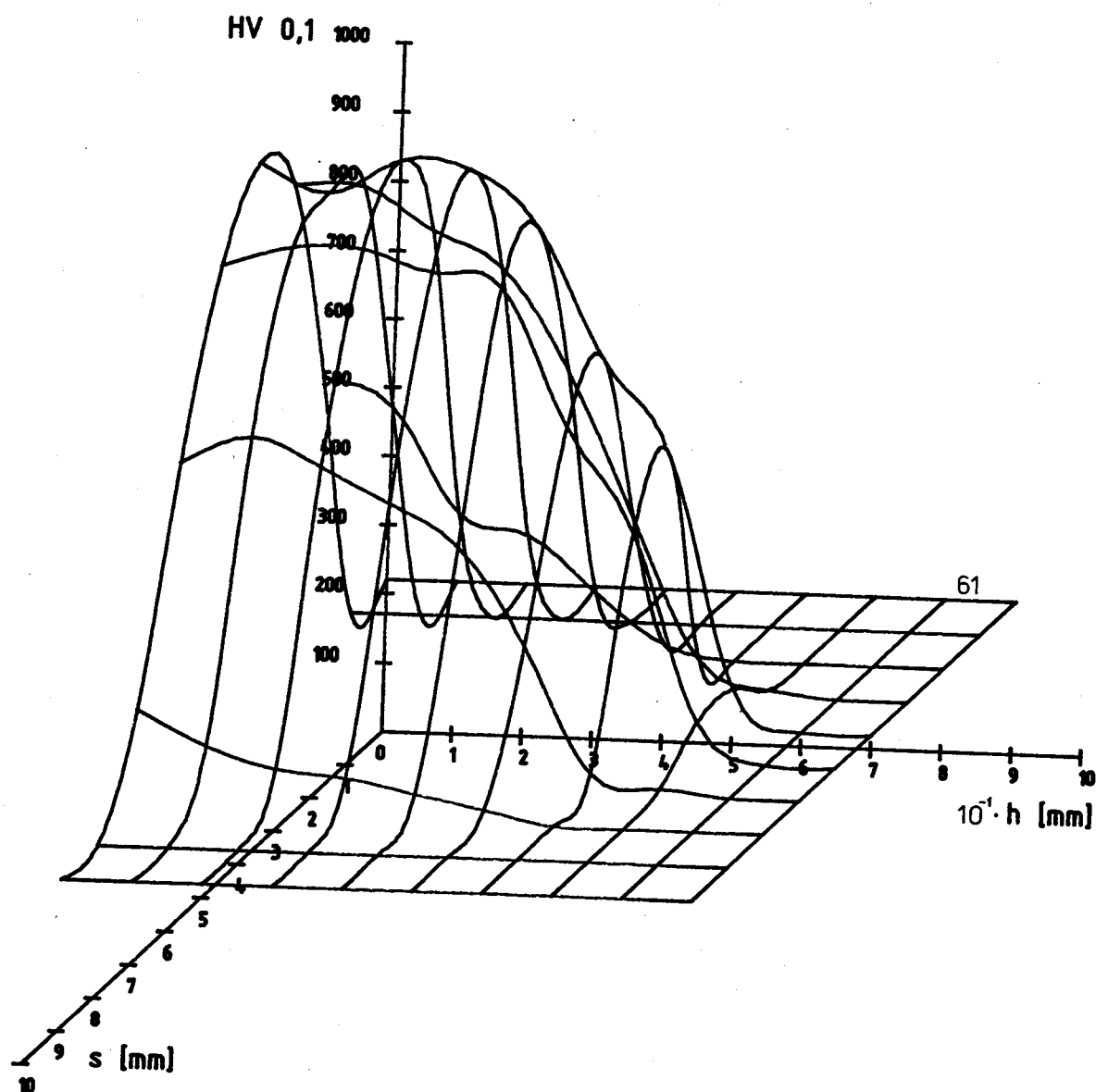


Obr. č. 51 - Grafické vyjádření mikrotvrdosti
v závislosti na hloubce prokalené
vrstvy oceli 12060 - vzorek č. 64

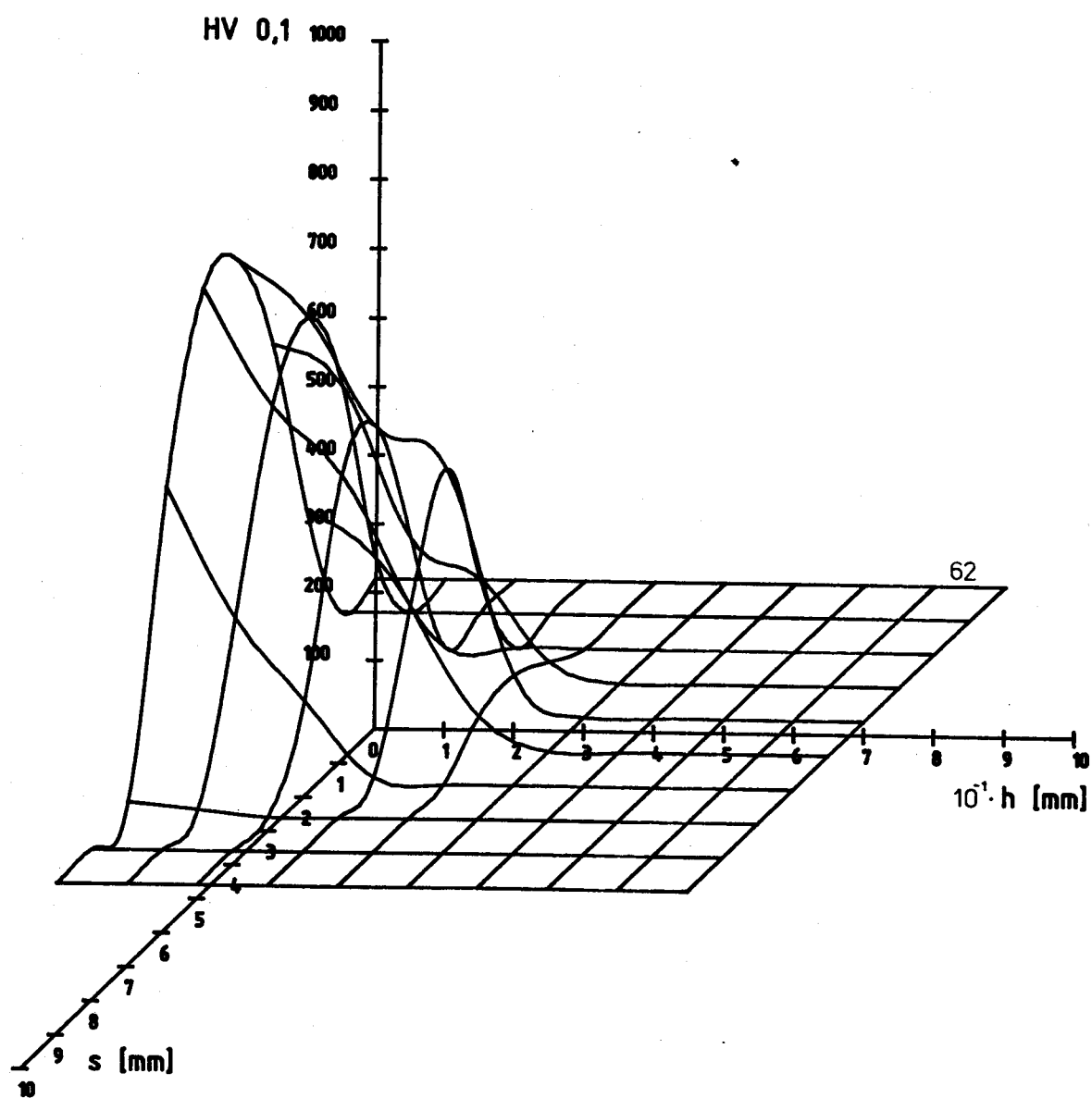


Obr. č. 52 - Vyjádření mikrotvrdosti v závislosti
na hloubce prokalené vrstvy oceli 12060 -
vzorek č. 65

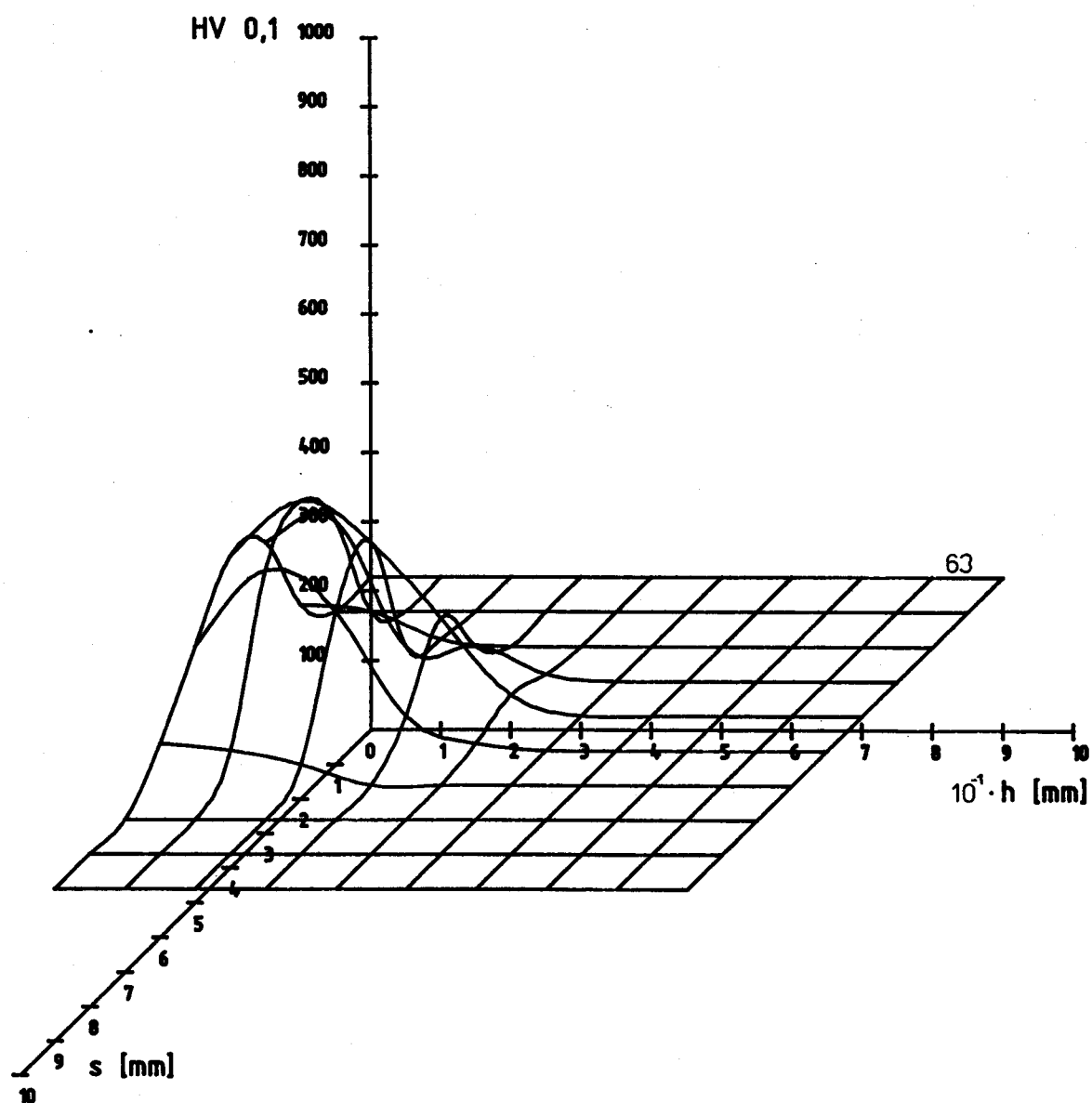
Rozdílný průběh tvrdosti v závislosti na šířce a hloubce prokalené oblasti u vzorků ozářených různými rychlostmi je možno sledovat na obr. č. 53-59. Toto grafické vyjádření je možno považovat jako výsledek závislosti $HV = f(s)$ a $HV = f(h)$.



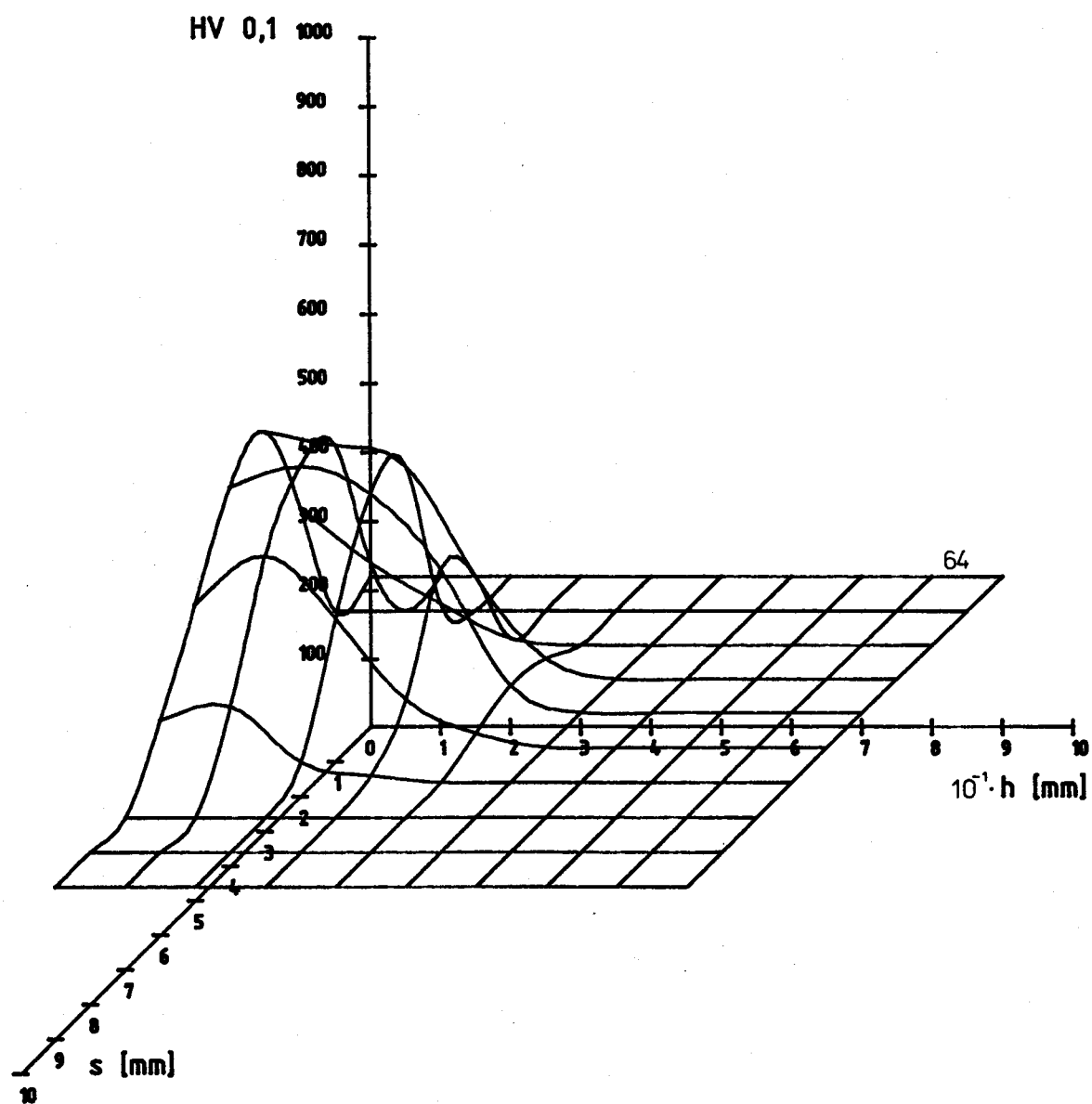
Obr. č. 53 - Grafické vyjádření mikrotvrdosti v závislosti na hloubce a šířce prokalené vrstvy u oceli 12060 - vzorek č.61



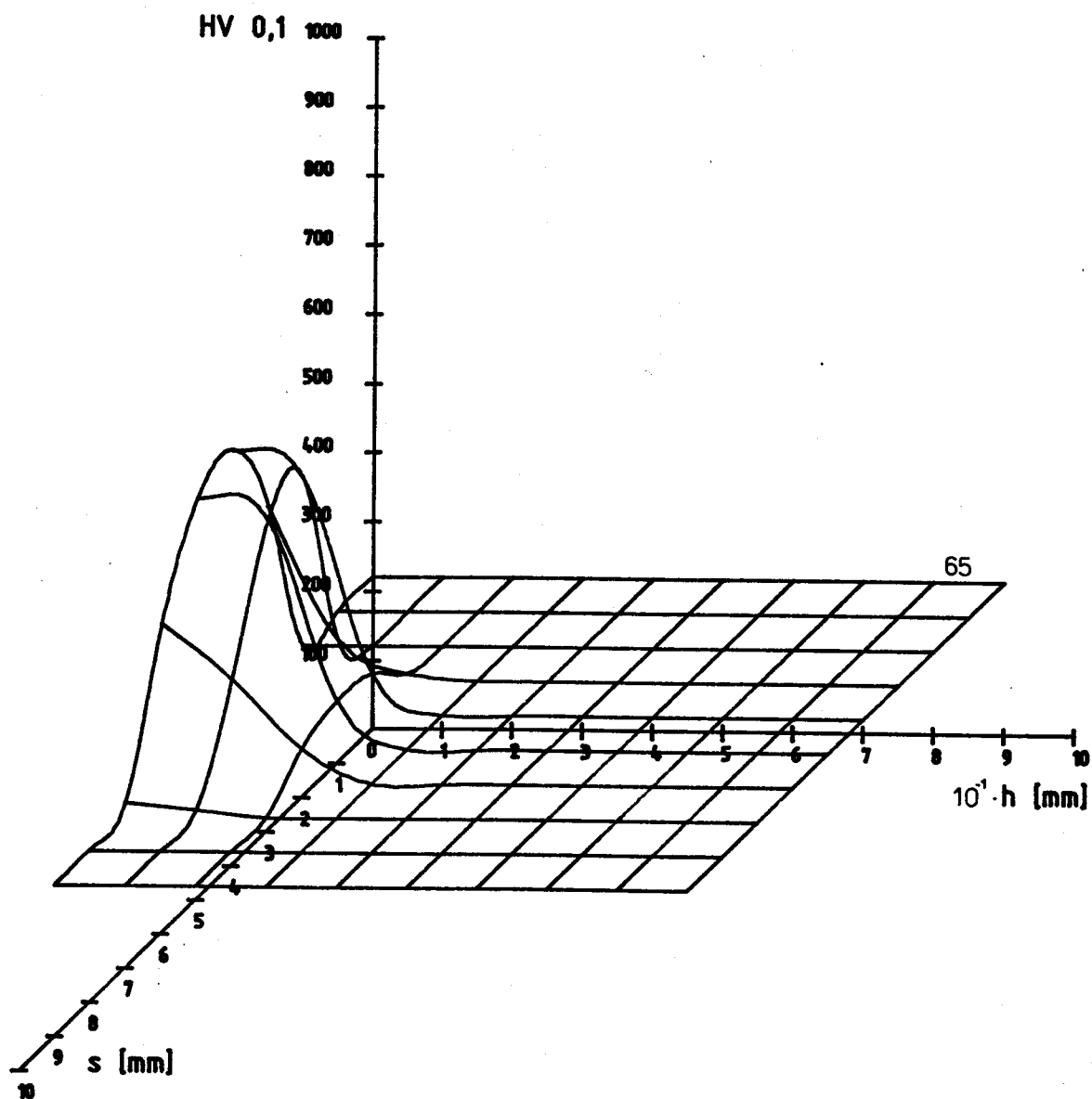
Obr. č.54 - Grafické vyjádření mikrotvrdosti v závislosti na hloubce a šířce prokalené vrstvy u oceli 12060 - vzorek č. 62



Obr. č.55 - Grafické vyjádření mikrotvrdosti v závislosti na hloubce a šířce prokalené vrstvy oceli 12060 - vzorek č. 63



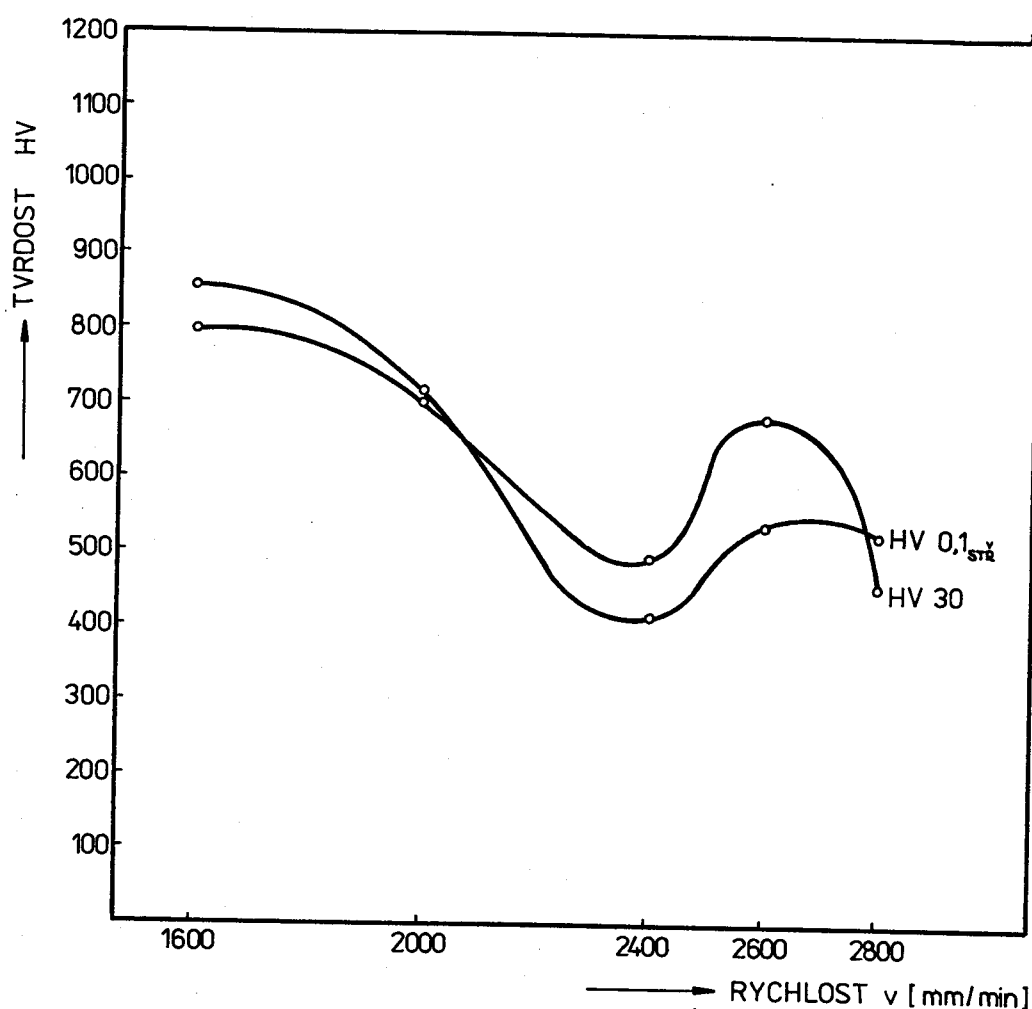
Obr. č. 56 - Grafické vyjádření mikrotvrdosti v závislosti na hloubce a šířce prokalené vrstvy u oceli 12060 - vzorek č. 64



Obr. č. 57 - Grafické vyjádření mikrotvrdosti v závislosti na hloubce a šířce prokalené vrstvy u oceli 12060 - vzorek č. 65

4.1.3. Grafické vyjádření tvrdosti v závislosti na rychlosti ozáření laserem

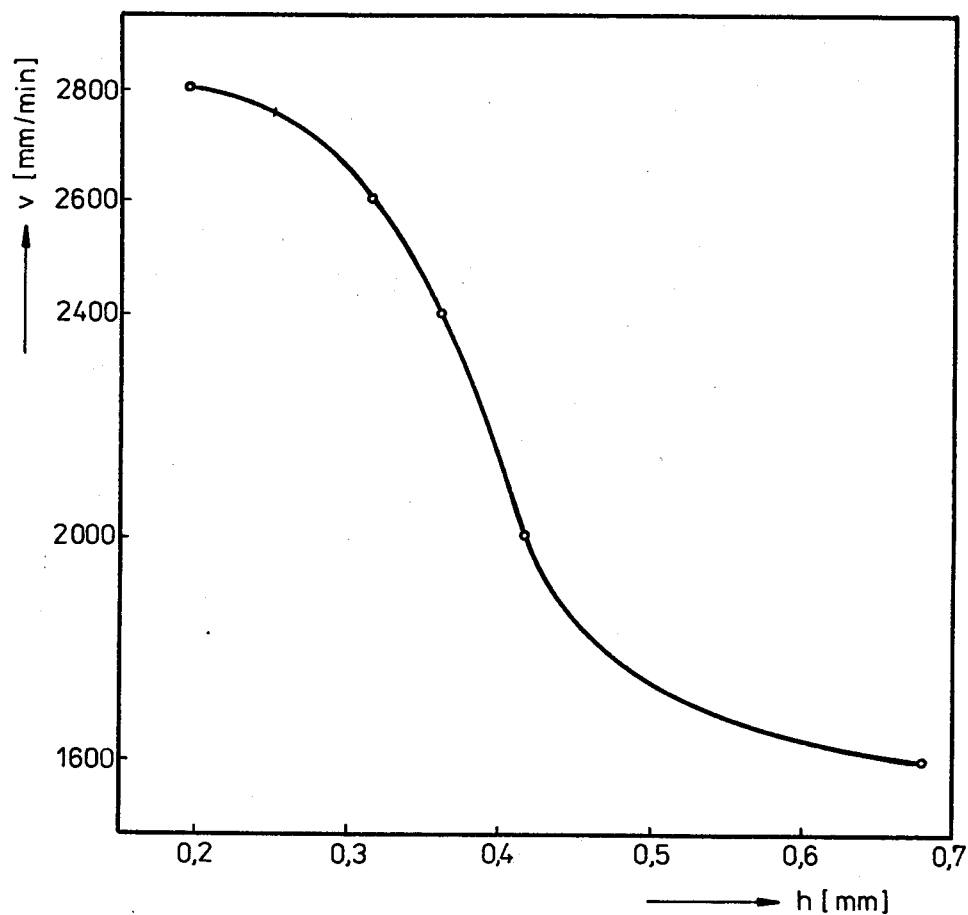
Výsledkem bylo znázornění dvou průběhů tvrdosti. Jedním průběhem byla hodnota naměřená pomocí Vickersova tvrdoměru jak bylo popsáno v kapitole 3.3.3. Druhou hodnotou byla střední hodnota mikrotvrdosti vypočtená v oblasti stopy ozážené laserem, která byla naměřená na povrchu. Tabulky s naměřenými hodnotami a grafické vyjádření mikrotvrdosti jsou uvedeny v příloze. Průběhy těchto dvou měření byly přibližně stejné a jsou na obr. č. 58



Obr. č. 58 - Grafické vyjádření tvrdosti v závislosti na rychlosti ozáření laserem

4.1.4. Grafické vyjádření hloubky prokalené vrstvy v závislosti na rychlosti ozáření laserem

Z obrázku č. 59 lze pozorovat, že se vzrůstající rychlostí
klesá hloubka prokalené vrstvy.



Obr. č.59 - Grafické vyjádření hloubky prokalené
vrstvy v závislosti na rychlosti ozáření
laserem .

4.2. Porovnání vzorků oceli 12060

Při srovnání hloubky prokalené vrstvy na obr. 22-26 můžeme konstatovat, že se zvyšující rychlostí se hloubka zakalené oblasti snižuje. Dále z obr. 33-39 je vidět, že se zvyšující se rychlostí se ve struktuře martenzitu těsně pod povrchem objevuje více ferritických zrn. Toto má i za důsledek snižování tvrdosti, protože feritická zrna mají menší tvrdost než zrna martenzitu.

4.3. Porovnání vzorků oceli 12060 s ocelí 12020

Pokud srovnáme hloubku prokalené vrstvy u oceli 12060 a 12020 je vidět, že u materiálu s vyšším obsahem uhlíku je hloubka větší. Pokud se srovnají struktury vzniklé po ozáření laserem, které jsou těsně pod povrchem lze konstatovat, že u oceli 12020 je výskyt martenzitických zrn podstatně menší než u oceli 12060. Srovnáme-li mikrotvrdost (porovnání vzorků č. 61 a 21) je hodnota u oceli 12060 až 2,5x větší než hodnota u oceli 12020.

5. D I S K U S E V Ý S L E D K U

Výsledky, kterých bylo v předložené práci dosaženo, přináší nové informace o chování oceli 12060 při působení paprsku kontinuálním CO_2 laserem o výkonu 2 kW. TZ laserem obecně lze charakterizovat jako celkem složitý děj a působí na něj mnoho činitelů (chemické složení, podmínky laserování, odvod tepla).

S takovýmito úvahami lze hodnotit dosažené výsledky:

1. Výsledky mikrotvrdomosti jsou charakterizovány čtyřmi závislostmi, které jsou uvedeny v kapitole 4.1. Při měření mikrotvrdomosti na povrchu bylo použito zatížení HV 0,2 ve vzdálenosti 0,5 mm mezi jednotlivými vtisky. U měření mikrotvrdomosti v příčném řezu bylo použito zatížení HV 0,1 ve vzdálenosti 0,1 mm, zatížení bylo voleno proto, aby nedocházelo k plastickému ovlivnění jednotlivých vtisků.
 - a) Grafické vyjádření závislosti tvrdosti na šířce stopy ozáření laserem. Z těchto výsledků vyplývá, že dochází v oblastech materiálu zasažených laserem k velkému nárůstu tvrdosti oproti základní struktuře. Rozdíl dosahuje až čtyřnásobek zvýšení tvrdosti. To lze vysvětlit vznikem martenzitické struktury, která je typická pro tento způsob TZ, jak je uvedeno v literatuře /1/.
 - b) Grafické vyjádření závislosti tvrdosti na hloubce prokalené vrstvy. Dosažené výsledky ukazují, že u převážné většiny vzorků oceli 12060 dochází nejprve od povrchu ozářené vrstvy k mírnému nárůstu tvrdosti oproti hodnotě která byla naměřena těsně pod povrchem a po této maximální hodnotě k prudkému poklesu až na hodnotu tvrdosti materiálu ovlivněného laserovým zásahem (HV=220).

- c) Grafické vyjádření závislosti tvrdosti na rychlosti ozáření laserem. Měření bylo provedeno dvěma způsoby a to jako střední hodnota měření mikrotvrdosti HV 0,2 na povrchu vzorku v oblasti ozáření laserem a měření tvrdosti HV 30, které bylo provedeno přibližně ve středu stopy zasažení laserem. Maximální tvrdost byla zjištěna při rychlosti 1600 mm/min pak tvrdost postupně klesala a minimum bylo zjištěno při hodnotě 2400 mm/min. Od této hodnoty tvrdost kolísala. Z naměřených hodnot tvrdosti v závislosti na rychlosti lze doporučit rychlost ohřevu pohybující se v rozmezí (1600 až 2000) mm/min.
- d) Graf vyjádření hloubky prokalené vrstvy na rychlosti ozáření laserem. Ze závislosti je zřejmé, že se vzrůstající rychlostí se zmenšuje hloubka prokalené vrstvy.
2. Ze sledování mikrostruktury pomocí optické mikroskopie je možné pozorovat přeměnu základní struktury na strukturu martenzitickou, která je při zvyšující se rychlosti doprovázena feritickými útvary. To je snižování hodnot tvrdosti.
3. Všechna měření mikrotvrdosti byla dále zpracována podle navržené metody (METODA S ROZDÍLNOU HUSTOTOU DAT, ZÁVISLÁ NA MNOŽSTVÍ ZMĚN), která je uvedena v kapitole 3.4. Lze tuto metodu doporučit pro další vyhodnocení mikrotvrdosti laserových vrstev u ocelí.
4. Ocel 12020 sloužila jako materiál pro porovnávání. U tohoto materiálu nebyla mikrotvrdost v příčném řezu vyhodnocena, protože ovlivněná vrstva dosahovala hodnotu menší než 0,02 mm. Mikrotvrdost na povrchu dosahovala hodnotu přibližně 2,5x větší než je hodnota výchozího materiálu (HV=126). Struktura, která byla zpracována optickou mikroskopií byla tvořena feritem s oblastmi martenzitu.

6. ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝZKUM

Úkolem předložené diplomové práce bylo sledování struktur (pomocí optické mikroskopie) a mikrotvrdosti po TZ laserem.

Diplomová práce se skládá ze dvou hlavních částí. V části teoretické byl proveden literární rozbor sledované problematiky. Získané poznatky byly použity v experimentální části. Experimentální část byla zaměřena na sledování ocelí 12060 a 12020 (sloužila jako materiál pro porovnávání)), které byly ozářené paprskem kontinuálního laseru o výkonu 2 kW. Z dosažených výsledků lze konstatovat tyto dílčí závěry:

1. Maximální dosažená mikrotvrdost u oceli 12060 se pohybovala v rozmezí (850 až 1050) HV.
2. Hloubka prokalené vrstvy u oceli 12060 dosahovala hodnot $h = 0,68$ mm při rychlosti $v = 1600$ mm/min, $h = 0,415$ mm při $v = 2000$ mm/min, $h = 0,36$ mm při $v = 2400$ mm/min, $h = 0,315$ mm při $v = 2600$ mm/min, $h = 0,196$ mm při $v = 2800$ mm/min.
3. Pro další výzkum se jeví jako vhodné ozáření rychlostí $v = 1600$ mm/min. Při této rychlosti byla zjištěna maximální tvrdost ozářeného materiálu a dosahovala hodnoty HV $0,1 = 1035$.
4. Dosažená struktura u prokalené vrstvy byla feriticko martenzitická s martenzitem rozdílně syceným uhlíkem.
5. Mikrotvrdost u oceli 12020 dosahovala hodnot v rozmezí 300 až 400 HV. Maximální tvrdost na povrchu byla dosažena při rychlosti 1600 mm/min a dosahovala 370 HV. Struktura je feriticko martenzitická s převládajícím množstvím feritu.

Pro další výzkum doporučuji provedení difrakční analýzy
struktur po TZ laserem. .
Ekonomické hodnocení není provedeno, protože se jedná o prvotní
práci v této oblasti TZ.

7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- /1/ VEDENOV, A.A. Fyzičeskije processy pri lazernoj
GLADUŠIN G.G. : obrobótke materialov, 1.vydání Moskva 1985
- /2/ KOVALENKO V.S.: Upročnění dětalej lučom lasera,
Kijev 1981
- /3/ HORYNA J., NOSEK V.,
 ĎAĎOUREK J. : Možnosti TZ ocelí laserem
 In: Vědecká konference k 275. výročí
 založení školy ČVUT, Praha 1982
- /4/ PÍŠEK F., JENÍČEK L. Nauka o materiálu I., svazek 1,
 RYŠ P. : 2. vydání, Praha 1966
- /5/ PÍŠEK F., JENÍČEK L. Nauka o materiálu I, svazek 4,
 RYŠ P. : 2. vydání, Praha 1975
- /6/ PLUHAŘ J., KORYTA J.: Strojírenské materiály, 3. vydání,
 Praha 1982
- /7/ VELES P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie
 kovov, Bratislava 1985
- /8/ JAREŠ V.: Základní zkoušky kovů a jejich teorie,
 Praha 1966
- /9/ KLEČKOVÁ M.: Nestacionární teplotní pole a napja-
 tost ve strojních součástech, 1.vydání
 Praha 1981
- /10/ MAZUMDER J.: Laser meat treatment, The state of
 the art Journal of metals, 6/83 str, 18
- /11/ WISSENBACH K., Wershttoffdeadeitung mit Laserstrah-
 BAKOWSKY L., lung. Teil 2: Umwauluugshärten,
 HERZIGER G. : Feinwerttechnik Messtechnik
 7/83 str. 327
- /12/ MIKULECKÝ J. : Tepelné zpracování ocelí 12040laserem,
 VŠST Liberec 1985

/13/ NOVÁK M.:

Vliv výchozího stavu uhlíkové oceli
na výsledky TZ laserem, VŠST Liberec
1984

/14/ KRAFT P.:

Tepelné zpracování ocelí 12050
laserem, VŠST Liberec 1985

/15/

ČSN 41 2020

/16/

ČSN 41 2060

/17/

ČSN 41 0375

Závěrem bych chtěl poděkovat s. Doc. ing. Miroslavu
K o ř í n k o v i CSc za cenné rady při řešení této práce
a dále laborantkám s. H. Kerdové a E. Pokorné za pomoc, kterou
mi poskytly při zpracování snímků z optické mikroskopie.

V Liberci, dne 11. května 1987

Jduch Kadosta

S E Z N A M P Ř Í L O H

Příloha č. 1	Chemický rozbor
Příloha č. 2	Tabulka měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 61)
Příloha č. 3	Tabulka měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 62, 63)
Příloha č. 4	Tabulka měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 64, 65)
Příloha č. 5	Tabulka měření mikrotvrdosti na povrchu
Příloha č. 6	Měření tvrdosti ve stopě zasažené laserem a tvrdost základního materiálu
Příloha č. 7	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 61, hloubka 0,0 mm)
Příloha č. 8	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 61, hloubka 0,1 mm)
Příloha č. 9	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 61, hloubka 0,2 mm)
Příloha č. 10	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 61, hloubka 0,3 mm)
Příloha č. 11	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 61, hloubka 0,4 mm)
Příloha č. 12	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 61, hloubka 0,5 mm)
Příloha č. 13	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 61, hloubka 0,6 mm)
Příloha č. 14	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 61, hloubka 0,7 mm)

Příloha č. 15	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 62, hloubka 0,0 mm)
Příloha č. 16	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 62, hloubka 0,1 mm)
Příloha č. 17	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 62, hloubka 0,2 mm)
Příloha č. 18	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 62, hloubka 0,3 mm)
Příloha č. 19	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 62, hloubka 0,4 mm)
Příloha č. 20	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 63, hloubka 0,0 mm)
Příloha č. 21	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 63, hloubka 0,1 mm)
Příloha č. 22	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 63, hloubka 0,2 mm)
Příloha č. 23	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 63, hloubka 0,3 mm)
Příloha č. 24	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 63, hloubka 0,4 mm)
Příloha č. 25	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 64, hloubka 0,0 mm)
Příloha č. 26	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 64, hloubka 0,1 mm)
Příloha č. 27	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 64, hloubka 0,2 mm)
Příloha č. 28	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 64, hloubka 0,3 mm)

Příloha č. 29	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 64, hloubka 0,4 mm)
Příloha č. 30	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 65, hloubka 0,0 mm)
Příloha č. 31	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 65, hloubka 0,1 mm)
Příloha č. 32	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu (vzorek č. 65, hloubka 0,2 mm)
Příloha č. 33	Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu vzorek č. 61, měření 1)
Příloha č. 34	Graf měření mikrotvrdosti na povrchu (vzorek č. 61, měření 2)
Příloha č. 35	Graf měření mikrotvrdosti na povrchu (vzorek č. 62, měření 1)
Příloha č. 36	Graf měření mikrotvrdosti na povrchu (vzorek č. 62, měření 2)
Příloha č. 37	Graf měření mikrotvrdosti na povrchu (vzorek č. 63, měření 1)
Příloha č. 38	Graf měření mikrotvrdosti na povrchu (vzorek č. 63, měření 2)
Příloha č. 39	Graf měření mikrotvrdosti na povrchu (vzorek č. 64, měření 1)
Příloha č. 40	Graf měření mikrotvrdosti na povrchu (vzorek č. 64, měření 2)
Příloha č. 41	Graf měření mikrotvrdosti na povrchu (vzorek č. 65, měření 1)
Příloha č. 42	Graf měření mikrotvrdosti na povrchu (vzorek č. 65, měření 2)

- | | |
|---------------|---|
| Příloha č. 43 | Graf měření mikrotvrdosti na povrchu
(vzorek č. 21, měření 1) |
| Příloha č. 44 | Graf měření mikrotvrdosti na povrchu
(vzorek č. 21, měření 2) |
| Příloha č. 45 | Program pro grafické vyjádření mikrotvrdosti
FKROGRA 1 |
| Příloha č. 46 | Program pro grafické vyjádření mikrotvrdosti
v závislosti na šířce a hloubce prokalené
vrstvy - FKROGRA 3 |

POLDI SPOJENÉ OCELÁRNY, národní podnik, Kladno

Nositel Řádu republiky a Řádu Vítězného února, Podnik socialistické práce

Vysvědčení o rozboru čís. 6/87

17.2.1987

Kladno dne

Číslo zakázky

Objednavatel

s. Radosta

Objednací číslo zákazníka

Předmět chemický rozbor

Rozbor	Tavba	Značka	C	Mn	Si	P	S	Cr	W	Ni	Mo	V
R 128/2		12060	0,56	0,60	0,26	0,015	0,021	0,05	-	0,03	-	0,03
R 129/2		12020	0,13	0,43	0,19	0,010	0,031	0,10	-	0,06	-	0,12

POLDI SPOJENÉ OCELÁRNY

národní podnik

Výstupní kontrola Peldiny hutí

POLDI - SPOJENÉ OCELÁRNY

NÁRODNÍ PODNIK

Kladno

Příloha č.2 - Tabulka měření mikrotvrdosti v příčném řezu (61)

s [mm]	h [mm]							
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
0,0	237	254	250					
0,1	391	254	242					
0,2	708	242	285					
0,3	708	483	256	254				
0,4	905	483	260	256	248			
0,5	1139	1036	766	272	242			
0,6	989	708	617	254	254			
0,7	946	989	550	415	316	279		
0,8	1036	1036	867	556	441	248		
0,9	766	946	831	766	793	279	260	
1,0	1197	946	766	631	429	283	279	
1,1	1086	905	1139	831	681	283	300	
1,2	989	1086	1036	1086	798	283	283	
1,3	1259	1086	989	798	737	415	300	
1,4	1036	1139	1197	1036	798	331	341	300
1,5	1086	867	1259	1036	737	708	266	283
1,6	905	946	1086	1259	1086	708	300	248
1,7	905	946	1326	1139	946	708	300	292
1,8	1036	1036	857	367	756	905	308	292
1,9	867	1036	331	905	756	737	578	254
2,0	756	905	357	339	989	578	499	272
2,1	905	1036	857	857	708	638	708	254
2,2	737	989	905	857	367	578	584	283
2,3	905	1036	857	798	905	756	533	292
2,4	831	905	905	989	905	756	483	248
2,5	367	989	831	367	989	756	708	272
2,6	905	357	831	946	798	681	756	272
2,7	857	737	905	857	793	737	584	279
2,8	867	857	946	946	798	737	681	292
2,9	905	905	857	989	867	708	638	283
3,0	756	905	905	905	857	708	581	300
3,1	831	905	798	946	1036	656	756	300
3,2	831	905	831	946	989	708	578	292
3,3	367	831	831	905	946	681	638	272
3,4	946	857	946	708	939	581	483	254
3,5	989	357	946	857	989	581	469	283
3,6	857	831	798	905	656	556	415	233
3,7	596	831	905	946	831	793	316	272
3,8	708	798	946	946	831	483	316	254
3,9	905	905	905	737	756	831	248	260
4,0	946	946	939	798	905	499	272	242
4,1	331	939	367	357	708	756	254	242
4,2	756	989	857	631	708	469	243	242
4,3	737	681	857	989	556	272	248	
4,4	905	798	696	708	428	254	250	
4,5	357	857	766	708	433	256		
4,6	798	756	756	533	292	272		
4,7	584	857	798	454	300	242		
4,8	517	737	708	260	260			
4,9	756	708	596	237	248			
5,0	831	499	250	243				
5,1	584	405	242	272				
5,2	405	260	254					
5,3	272	242	256					
5,4	242	242						

Příloha č. 3 - Tabulka měření mikrotvrdosti v příčném řezu (62, 63)

s [mm]	h [mm]									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4
0,0	279					254				
0,1	260					203	292			
0,2	256					242	233			
0,3	316	292				350	272			
0,4	483	272				260	242			
0,5	596	272				279	248			
0,6	696	279	260			316	233	279		
0,7	750	584	237			360	415	283		
0,8	617	433	254			341	415	256		
0,9	617	766	242	285		405	441	266		
1,0	631	798	332	272		483	360	248	256	
1,1	708	708	469	266		550	454	292	248	
1,2	708	617	483	266		415	441	423	242	
1,3	939	534	454	235	254	441	423	391	242	
1,4	708	737	483	248	292	454	391	454	242	
1,5	681	538	631	272	285	454	469	360	226	
1,6	596	756	428	391	260	370	459	341	254	266
1,7	708	905	584	515	248	332	454	428	283	250
1,8	831	737	533	533	300	360	454	441	405	279
1,9	857	517	550	756	250	332	483	483	391	260
2,0	905	631	578	656	242	454	515	469	428	260
2,1	857	756	533	905	272	459	499	515	332	266
2,2	737	584	550	533	272	459	515	550	332	248
2,3	857	857	737	578	248	441	533	584	391	248
2,4	857	756	405	435	254	459	617	483	350	248
2,5	831	905	633	405	242	483	534	415	316	254
2,6	857	708	483	550	279	515	578	391	332	260
2,7	857	831	581	550	254	360	578	381	360	279
2,8	798	857	857	533	248	381	617	391	350	279
2,9	831	638	681	483	254	300	483	415	316	266
3,0	798	831	538	798	254	341	538	550	279	266
3,1	905	708	483	415	248	360	415	454	300	248
3,2	831	857	656	533	242	381	428	428	323	260
3,3	939	708	737	515	285	415	483	428	279	248
3,4	737	708	737	459	266	415	423	428	242	
3,5	798	905	737	331	266	341	441	415	266	
3,6	798	656	515	260	254	370	441	405	254	
3,7	798	584	405	242	254	391	391	515	237	
3,8	756	550	359	254		292	315	483	242	
3,9	798	483	533	242		272	292	391	242	
4,0	798	433	533	242		315	308	260		
4,1	831	584	272	248		370	350	260		
4,2	798	578	272			272	233	260		
4,3	905	515	248			292	254			
4,4	831	633	266			279	248			
4,5	584	243	242			242	248			
4,6	584	242				217				
4,7	433	279								
4,8	292	292								
4,9	292									
5,0	254									
5,1	272									

Příloha č. 4 - Tabulka měření mikrotvrdosti v příčném řezu (64,65)

s [mm]	h [mm]							
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,0	0,1	0,2
0,0	242					292		
0,1	222					300		
0,2	222	242				454	231	
0,3	370	231				550	242	
0,4	499	260				469	260	283
0,5	483	260	254			433	256	292
0,6	391	242	260			584	300	279
0,7	638	323	242			638	381	254
0,8	584	550	308			584	454	260
0,9	656	584	279	242		533	617	260
1,0	584	578	272	279		534	621	260
1,1	617	584	279	260		578	515	260
1,2	617	617	656	272		550	638	266
1,3	617	578	656	260		534	515	266
1,4	656	556	578	300		556	433	266
1,5	656	533	515	233		638	550	254
1,6	578	708	638	300	242	638	617	279
1,7	638	578	584	341	254	708	556	279
1,8	469	323	617	332	266	617	617	283
1,9	533	454	617	405	279	631	550	308
2,0	454	499	499	638	248	483	499	300
2,1	550	533	483	578	248	534	617	308
2,2	578	681	515	499	272	454	499	316
2,3	499	415	578	428	272	499	578	292
2,4	469	469	499	370	260	483	441	283
2,5	584	550	499	428	237	556	415	341
2,6	441	617	469	454	254	550	550	341
2,7	433	454	454	483	266	499	550	292
2,8	391	533	499	415	279	515	415	292
2,9	454	617	459	316	266	515	499	266
3,0	483	617	483	381	266	534	499	266
3,1	433	617	499	292	254	415	550	254
3,2	533	617	578	260	283	499	499	272
3,3	499	483	533	254		405	415	279
3,4	405	515	483	233		578	391	272
3,5	360	483	454	254		405	360	237
3,6	350	454	341	316		515	272	272
3,7	550	515	469	248		454	260	254
3,8	515	638	381	279		533	279	
3,9	391	454	441	260		533	279	
4,0	370	483	272	260		341	260	
4,1	370	381	260	266		283	279	
4,2	469	469	283	250		283		
4,3	483	441	260					
3,4	360	441	283					
4,5	341	283	292					
4,6	415	254						
4,7	308	237						
4,8	237	254						
4,9	260	254						
5,0	237							

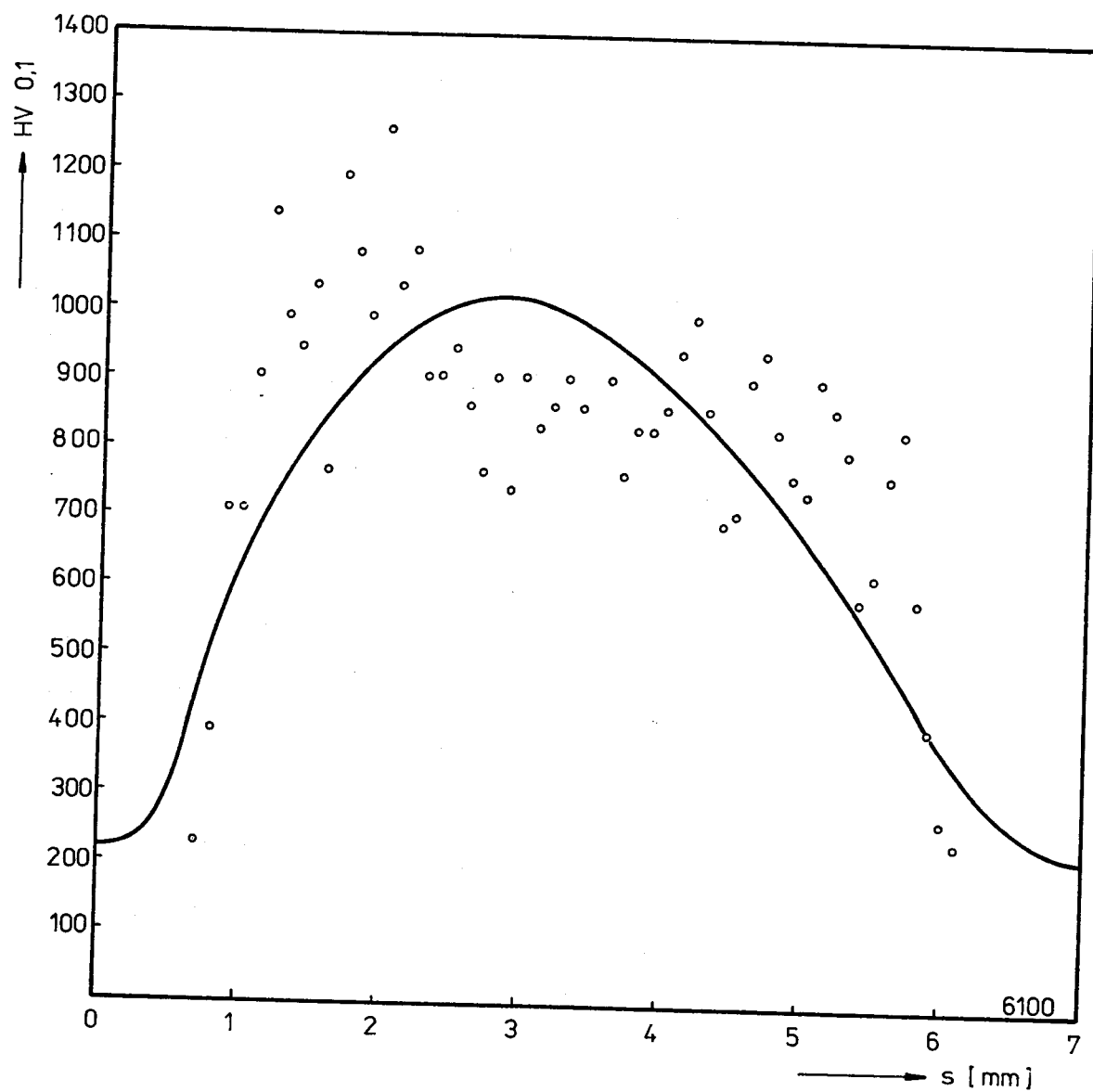
Příloha č. 5 - Tabulka měření mikrotvrdosti na povrchu

číslo vzorku / číslo měření		s mm
21/1	190	0,0
	178	0,5
	196	1,0
	173	1,5
	165	2,0
	250	2,5
	258	3,0
	242	3,5
	328	4,0
	369	4,5
	369	5,0
	341	5,5
	341	6,0
	316	6,5
	295	7,0
	169	7,5
	184	8,0
		8,5
		9,0
		9,5
		10,0
		10,5
		11,0
		11,5
		12,0
21/2	171	
	208	
	208	
	193	
	199	
	202	
	184	
	234	
	290	
	295	
	305	
	334	
	295	
	258	
	3832	
	310	
	300	
61/1	208	
	234	
	266	
	305	
	295	
	258	
	258	
	258	
	664	
	998	
	700	
	631	
	599	
	631	
	599	
	631	
	599	
	599	
	830	
	1065	
	250	
	226	
62/1	234	
	285	
	544	
	355	
	496	
	496	
	664	
	998	
	700	
	631	
	570	
	664	
	570	
	544	
	830	
	452	
	416	
	220	
	234	
63/1	220	
	220	
	258	
	258	
	258	
	242	
	355	
	599	
	570	
	631	
	664	
	570	
	544	
	830	
	452	
	416	
	220	
	234	
64/1	258	
	250	
	258	
	520	
	520	
	631	
	700	
	383	
	599	
	544	
	570	
	452	
	226	
65/1	220	
	266	
	220	
	220	
	234	
	355	
	740	
	631	
	570	
	416	
	570	
	570	
	570	
	544	
	544	
	266	
	220	
61/2	242	
	262	
	242	
	246	
	250	
	250	
	280	
	250	
	254	
	452	
	557	
	782	
	544	
	484	
	570	
	544	
	376	
	544	
	584	
	484	
	275	
	328	
	266	
	238	
	234	
62/2	250	
	238	
	238	
	254	
	473	
	599	
	682	
	631	
	740	
	462	
	484	
	473	
	520	
	262	
	250	
	258	
	245	
63/2	238	
	226	
	254	
	398	
	434	
	484	
	544	
	557	
	647	
	682	
	532	
	275	
	262	
	280	
	214	
	220	
	217	
64/2	275	
	262	
	290	
	262	
	238	
	496	
	532	
	557	
	570	
	515	
	557	
	443	
	532	
	462	
	254	
	270	
	270	
	266	
65/2	275	
	254	
	234	
	270	
	376	
	496	
	532	
	508	
	473	
	425	
	484	
	398	
	266	
	275	
	250	
	262	
	262	
	250	

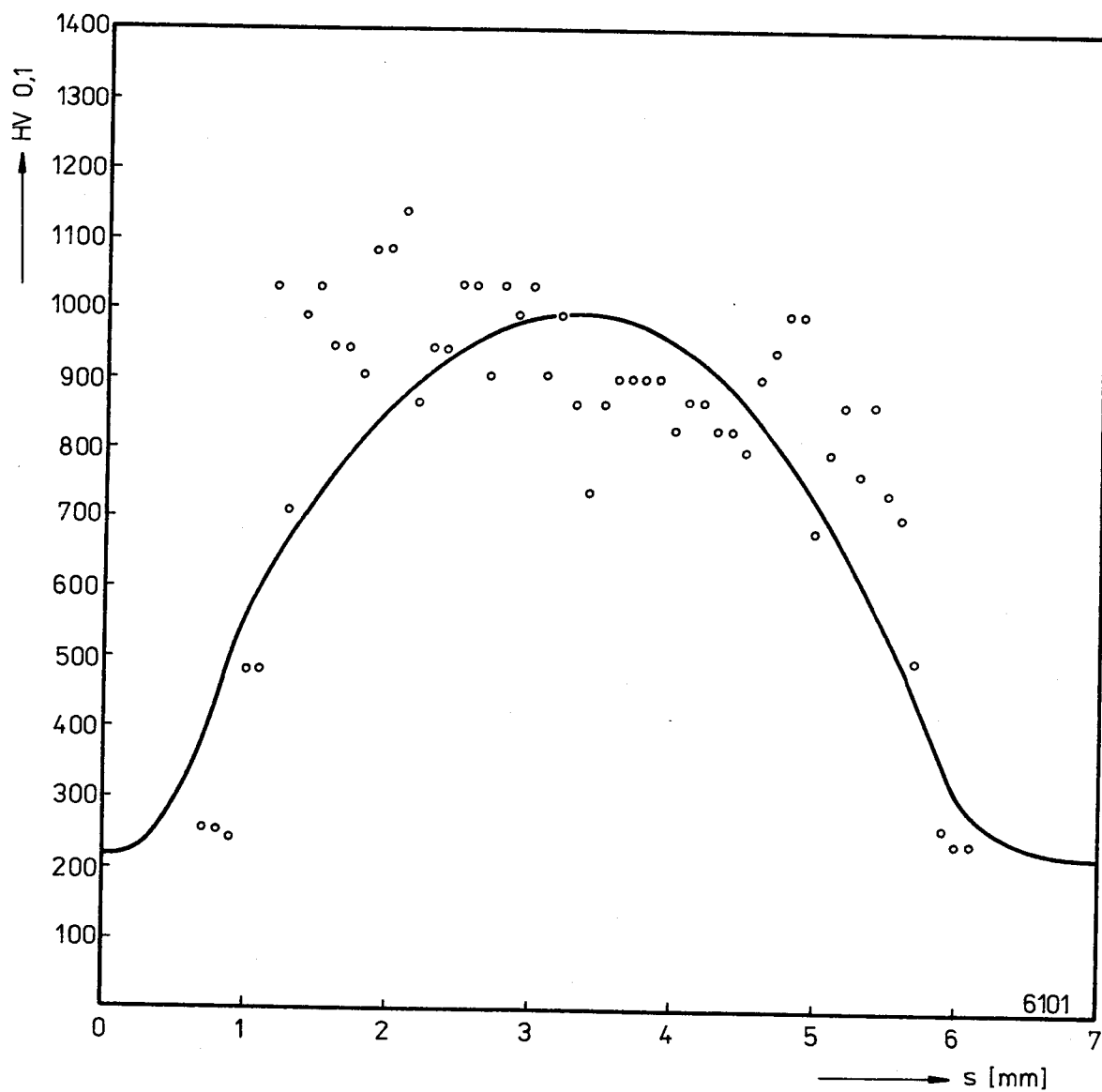
Příloha č. 6 - Měření tvrdosti ve stopě zasažené laserem a tvrdost základního materiálu

číslo vzorku	hodnoty tvrdosti			střední hodnota
	1	2	3	
61	800	763	820	794
62	625	763	740	709
63	575	454	454	494
64	746	648	660	684
65	575	348	454	459
21	381	302	312	331

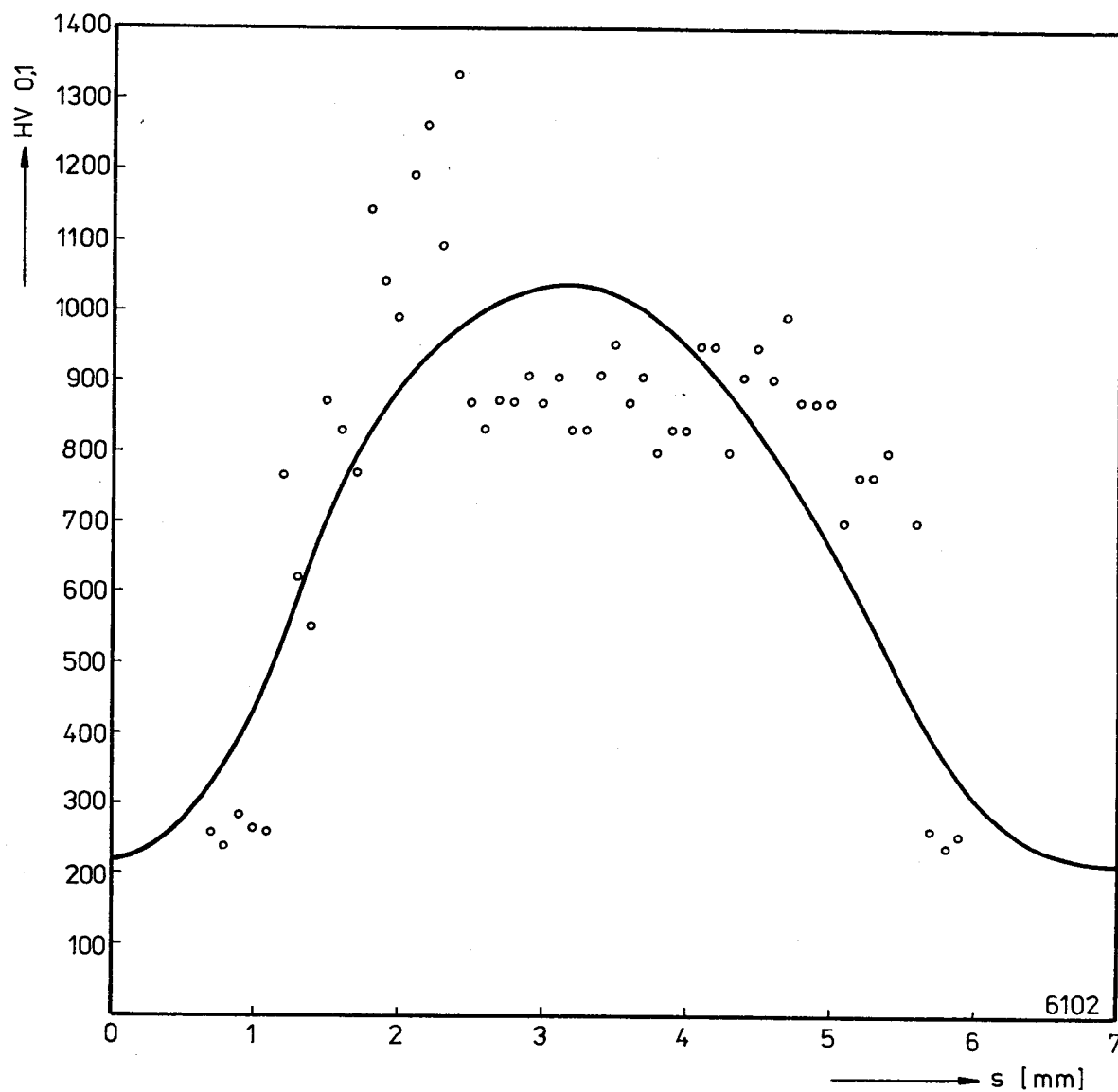
Příloha č. 7 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 61, hloubka 0,0)



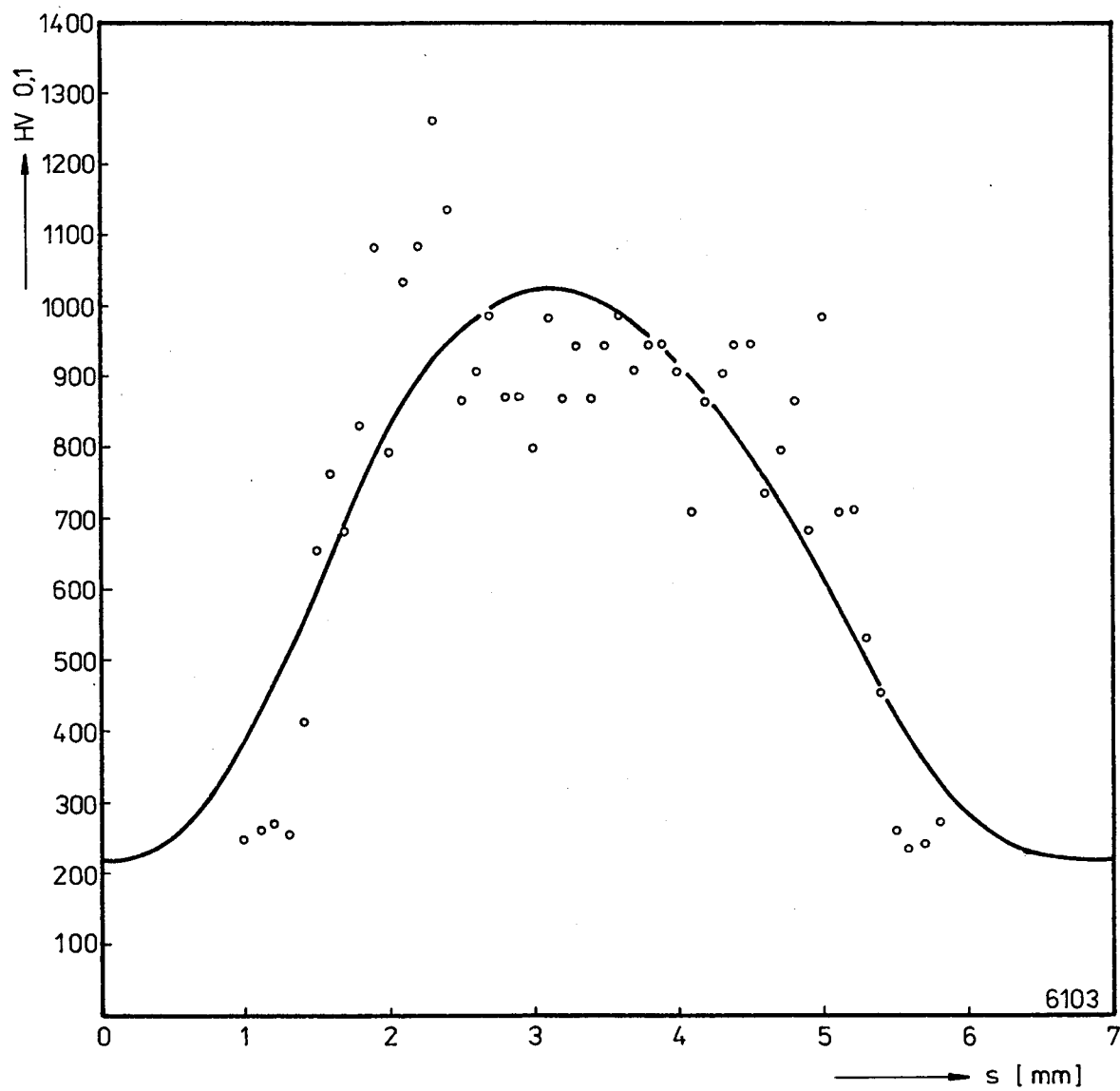
Příloha č. 8 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 61, hloubka 0,1 mm)



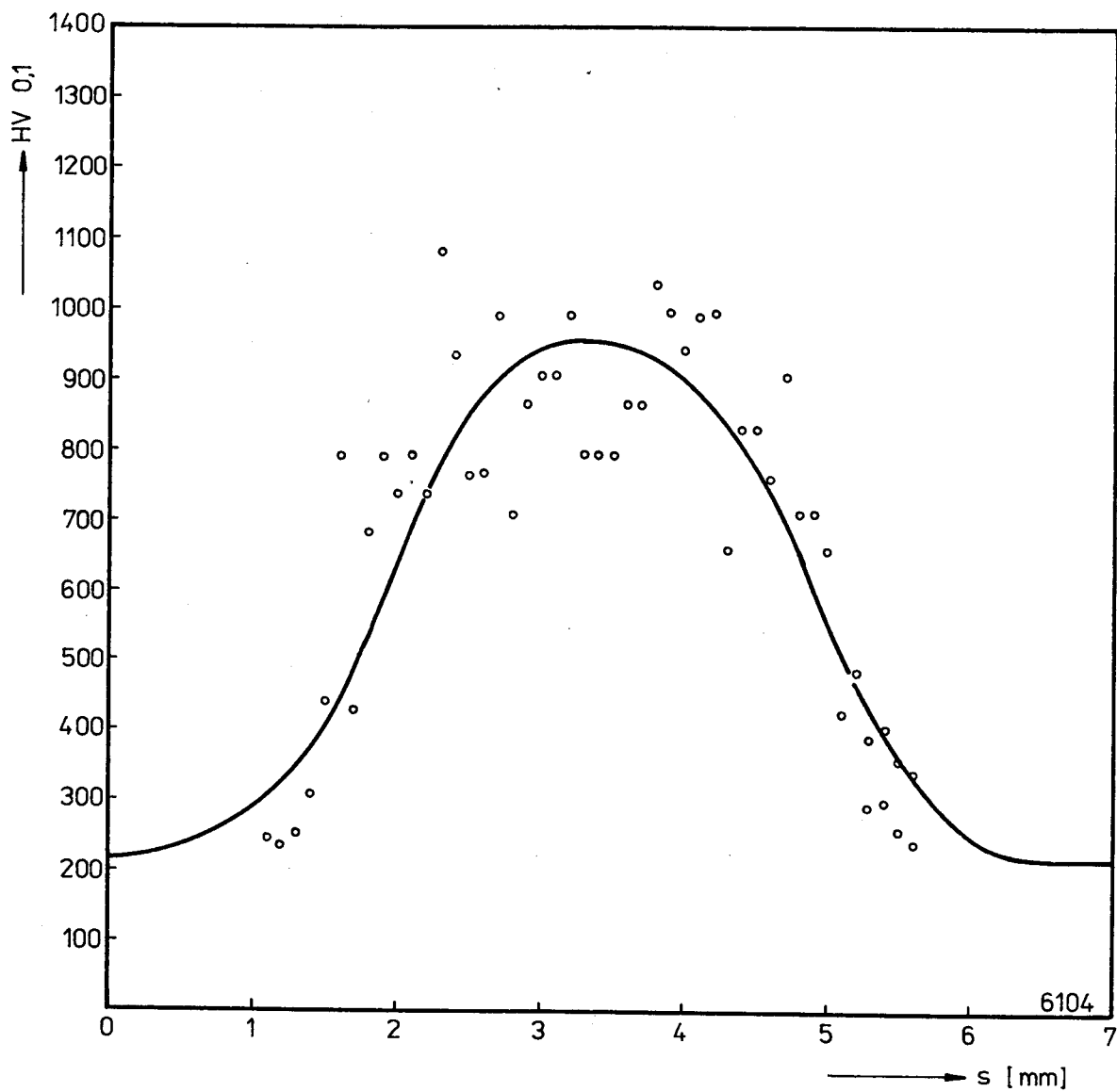
Příloha č. 9 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 61, hloubka 0,2 mm)



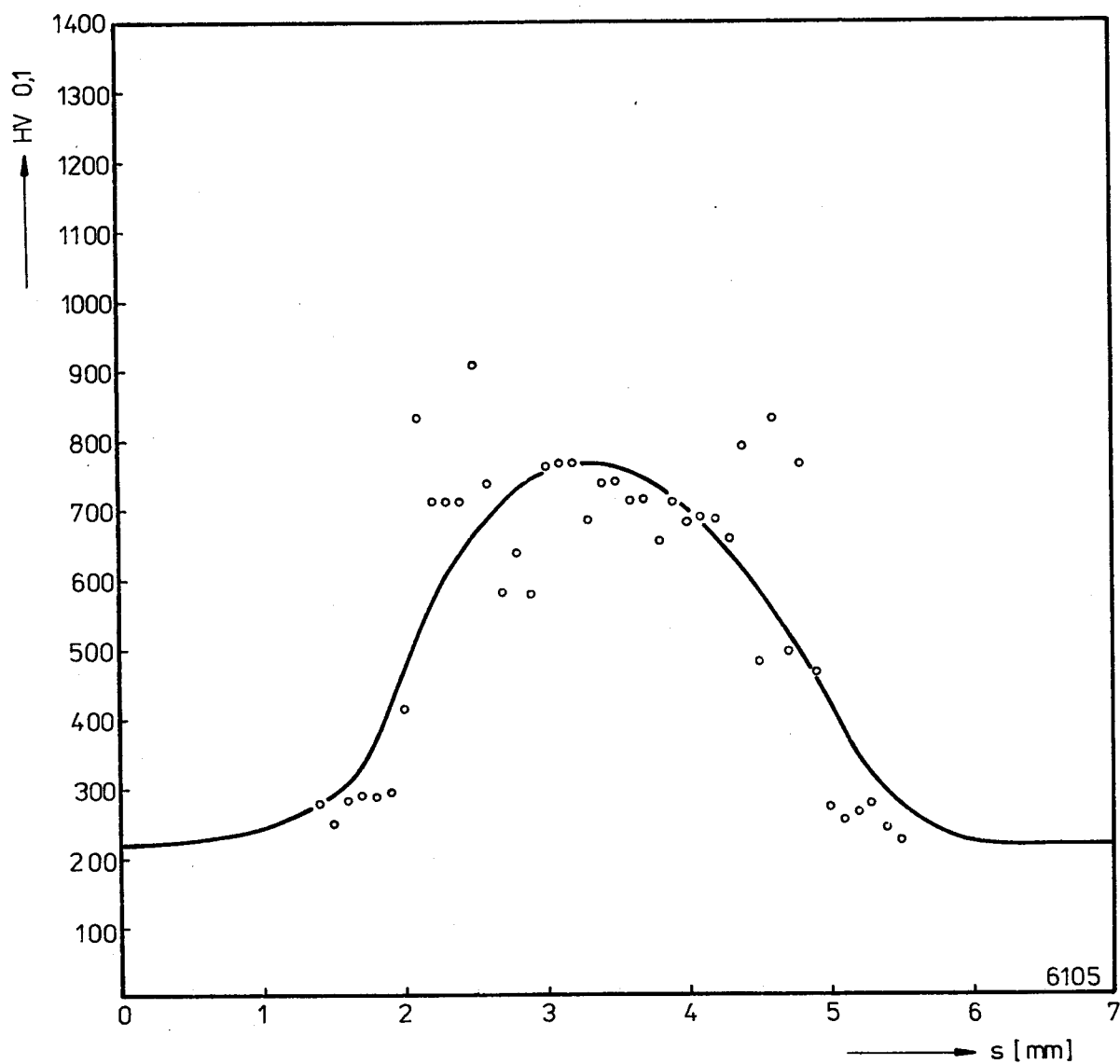
Příloha č. 10 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 61,,hloubka 0,3 mm)



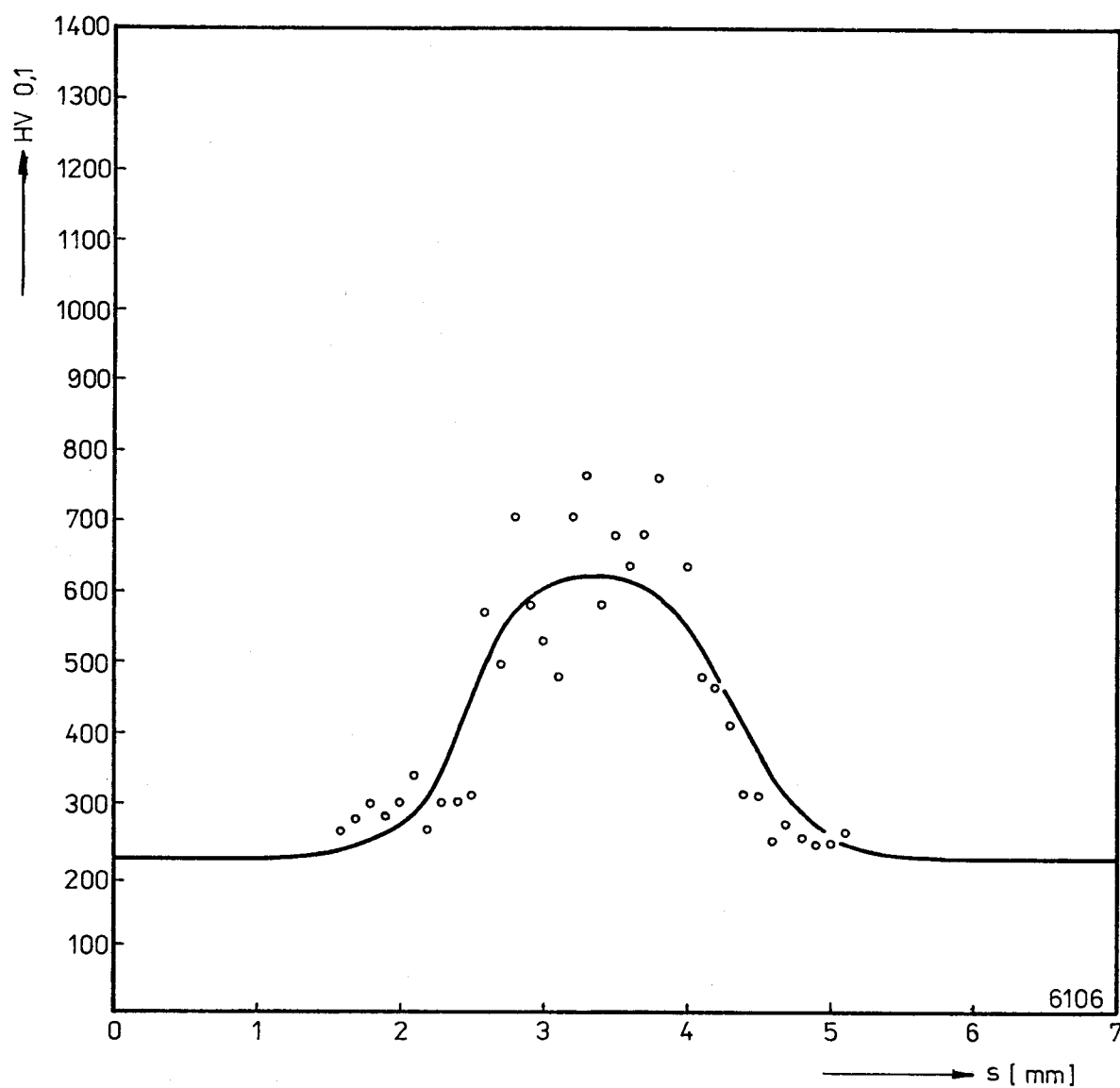
Příloha č. 11 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 61, hloubka 0,4 mm)



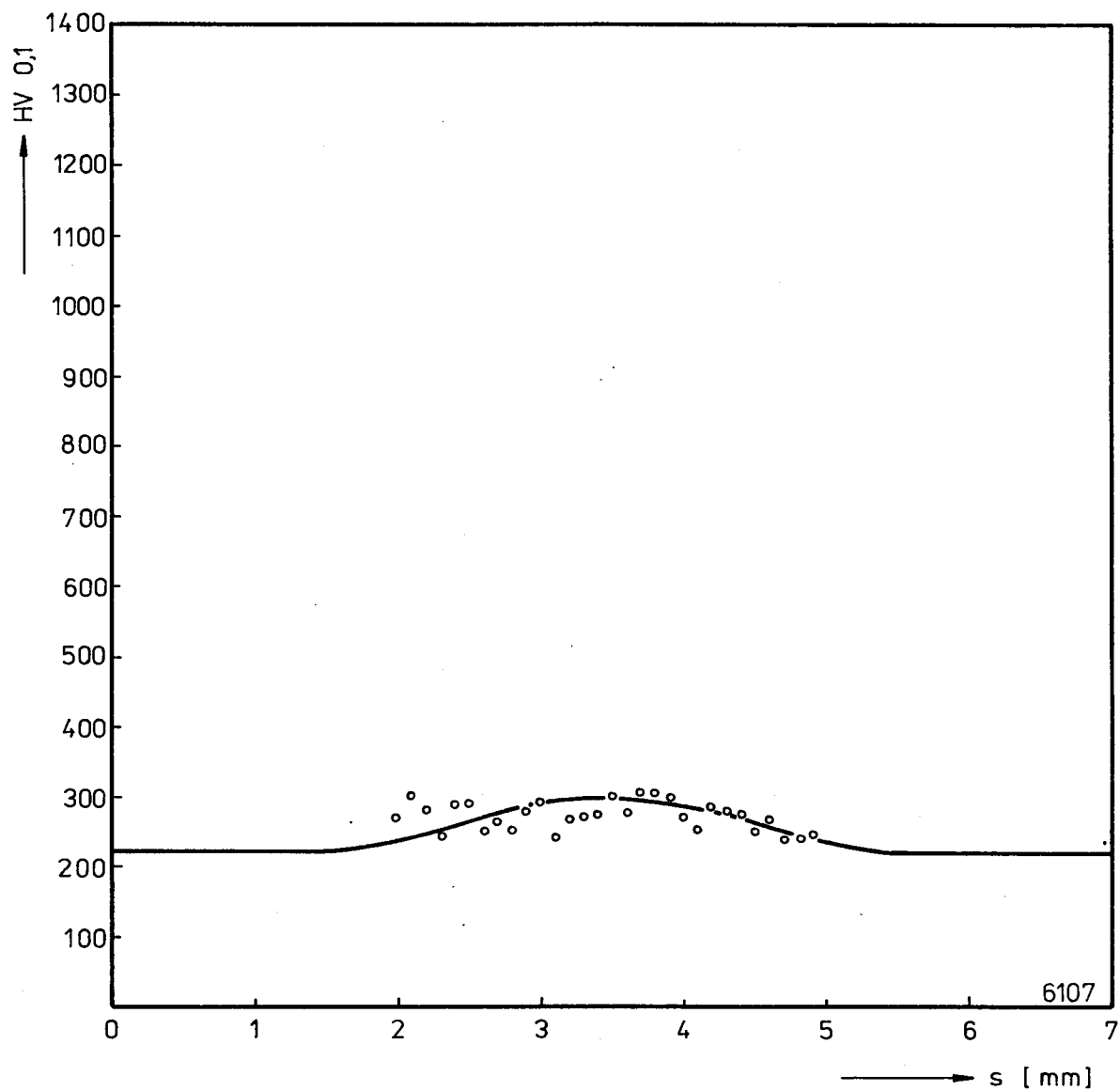
Příloha č. 12 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 61, hloubka 0,5 mm)



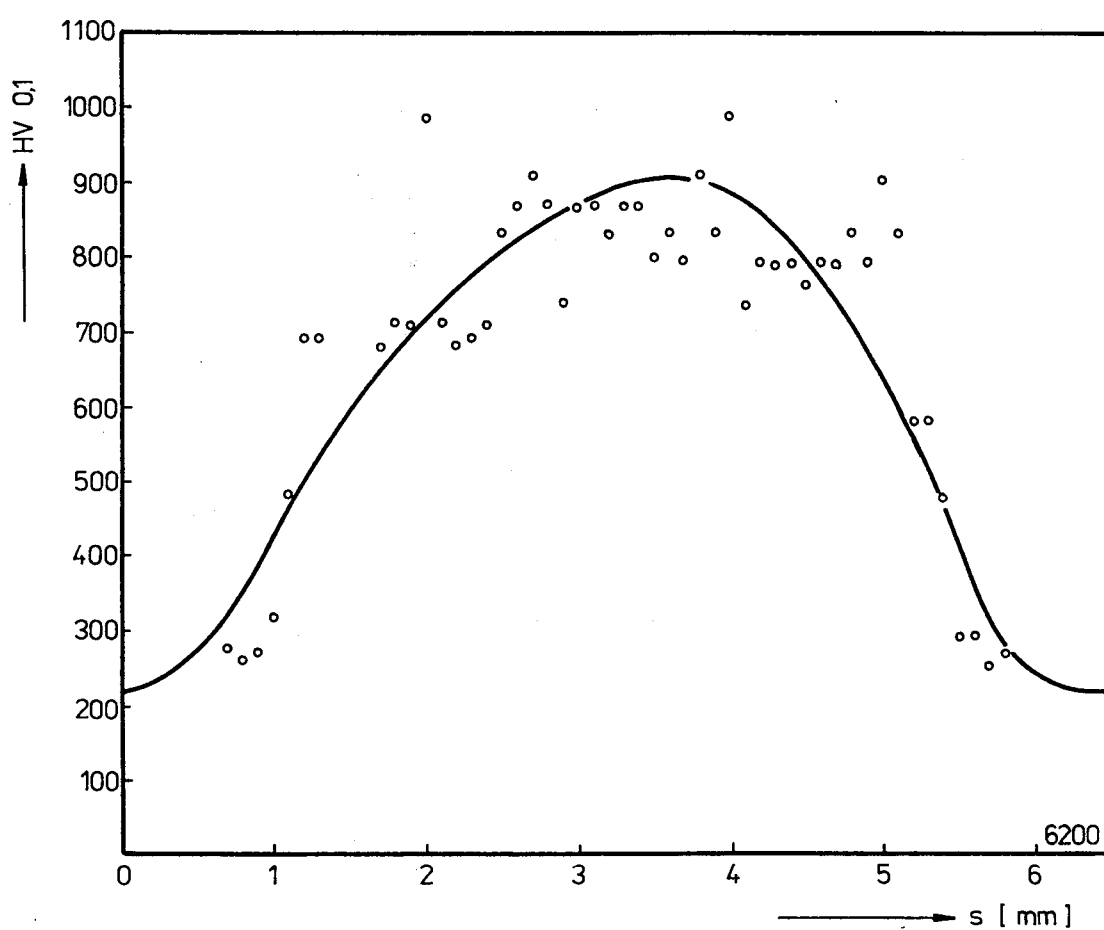
Příloha č. 13 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 61, hloubka 0,6 mm)



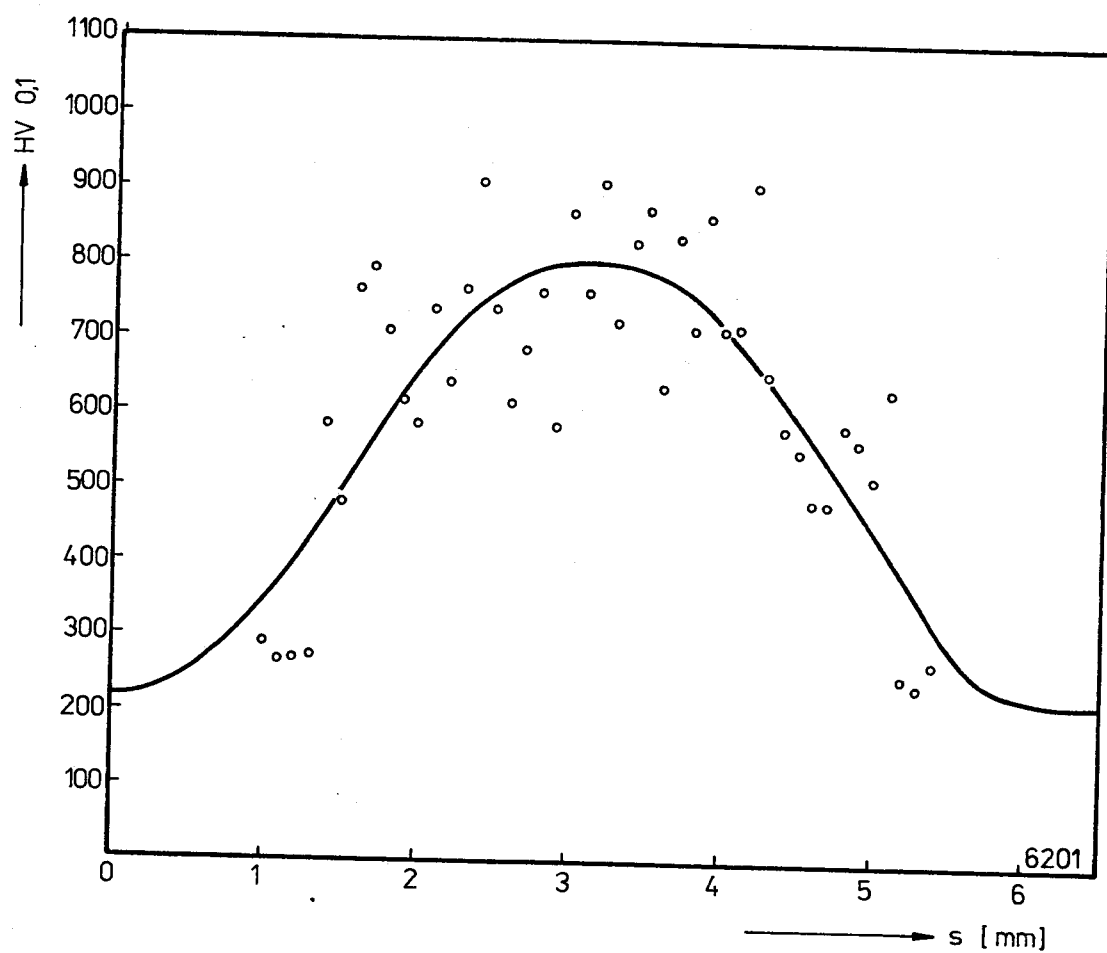
Příloha č. 14 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 61, hloubka 0,7 mm)



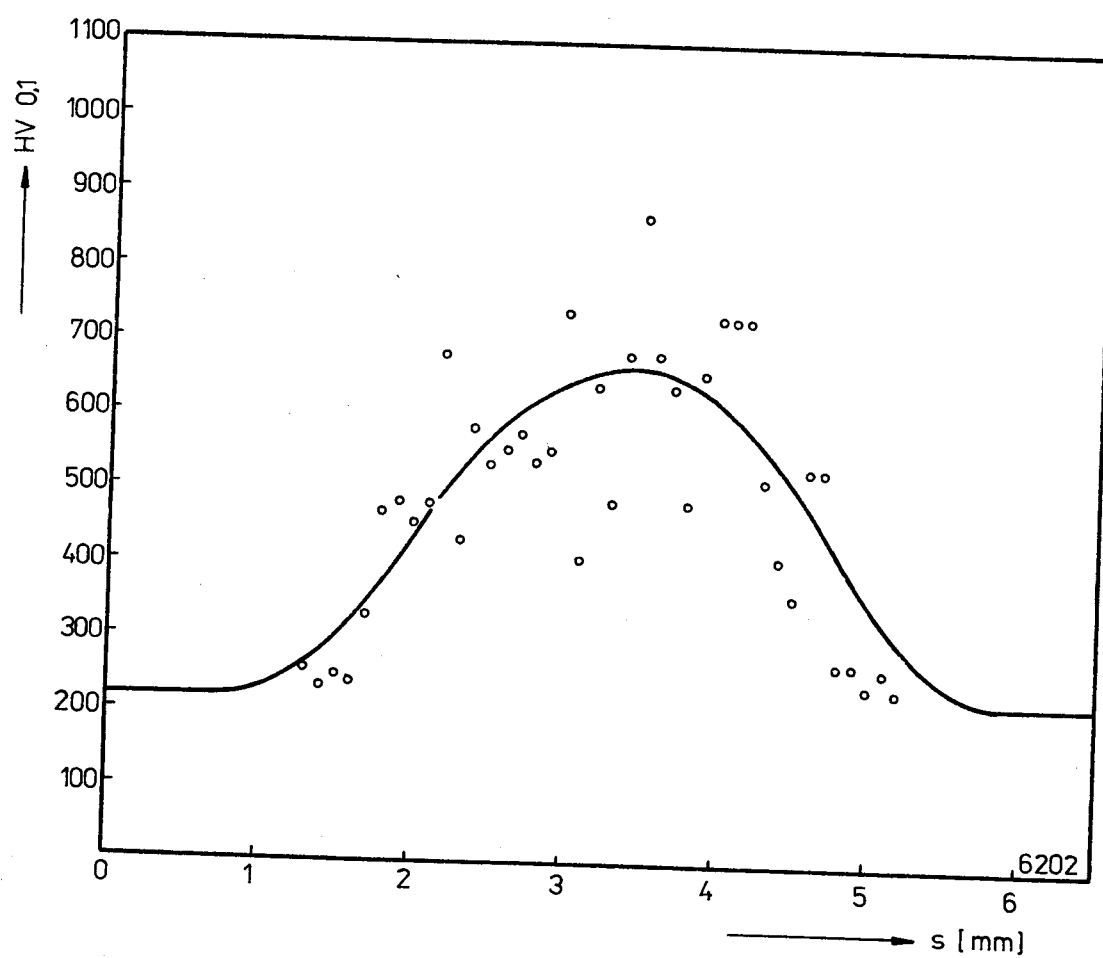
Příloha č. 15 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 62, hloubka 0,0 mm)



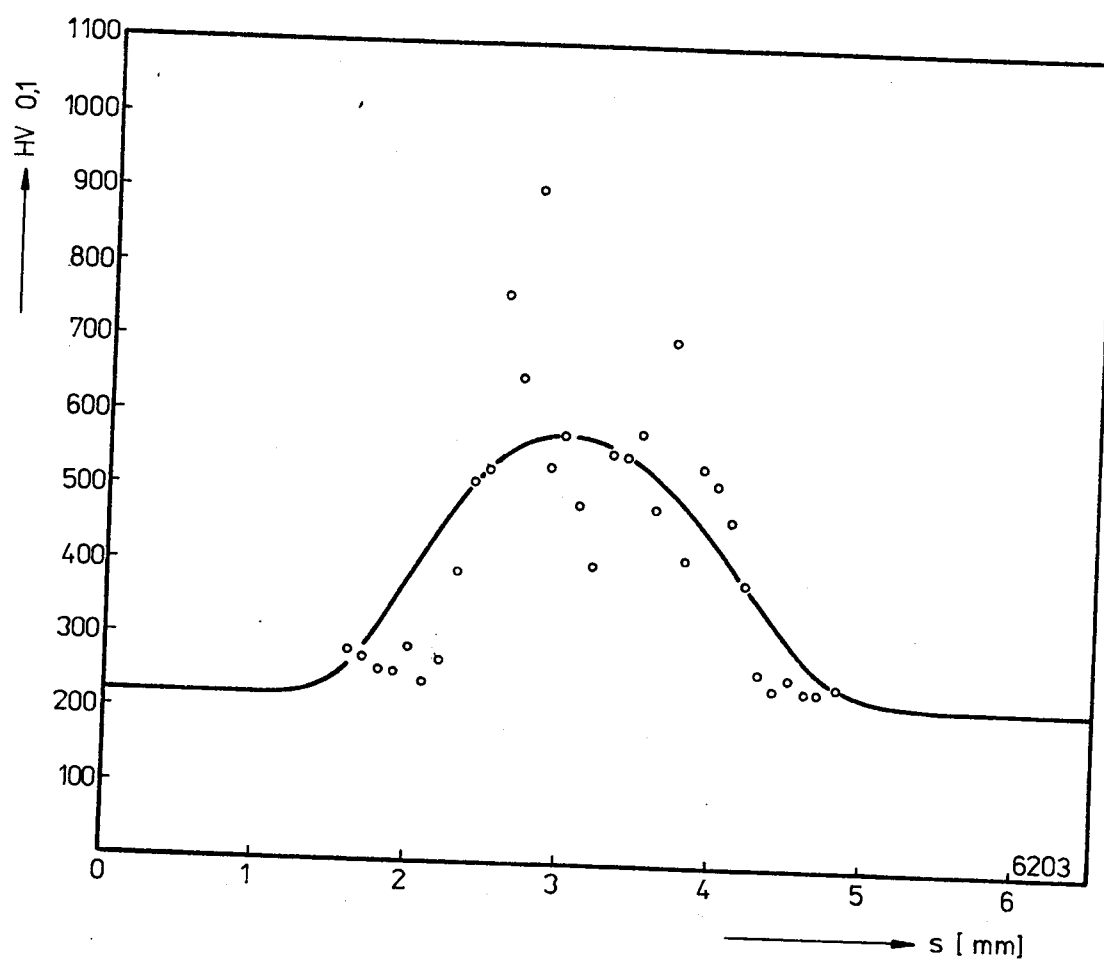
Příloha č. 16 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 62, hloubka 0,1 mm)



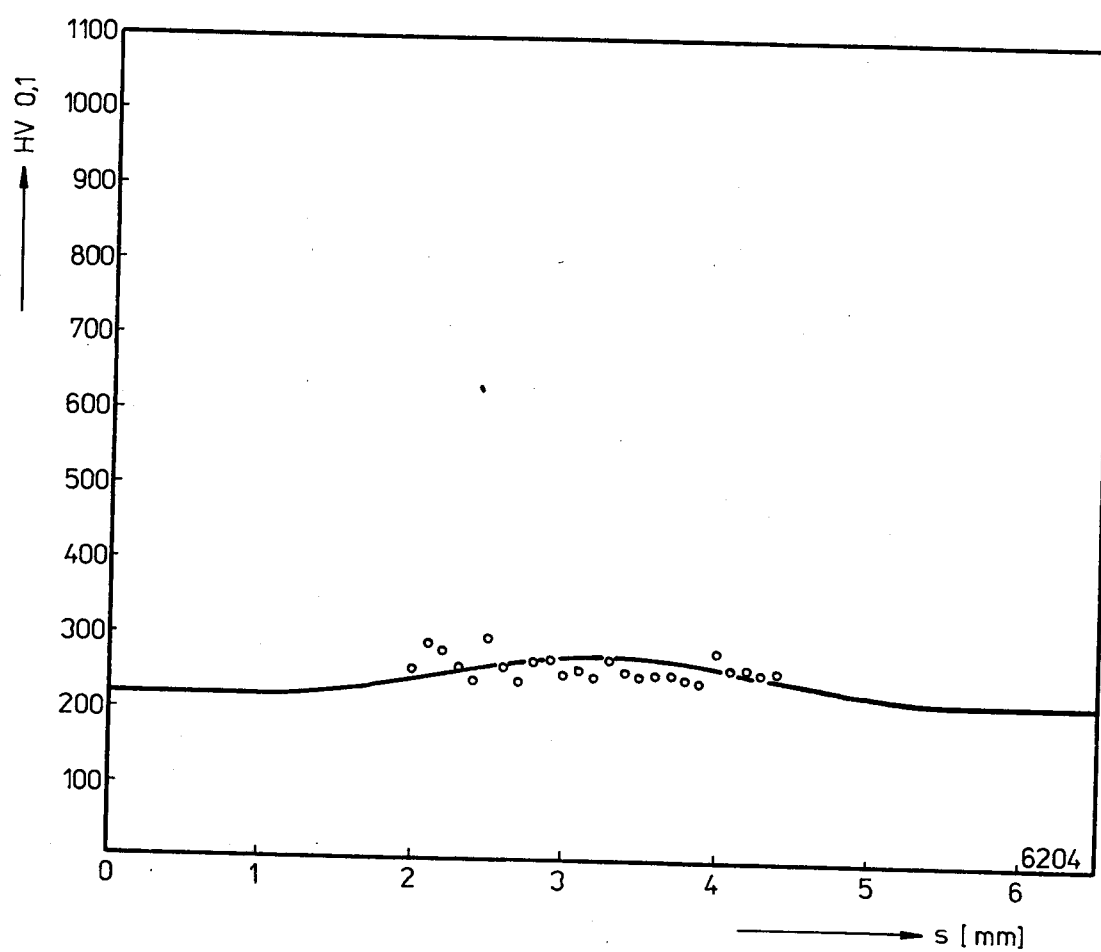
Příloha č. 17 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 62, hloubka 0,2 mm)



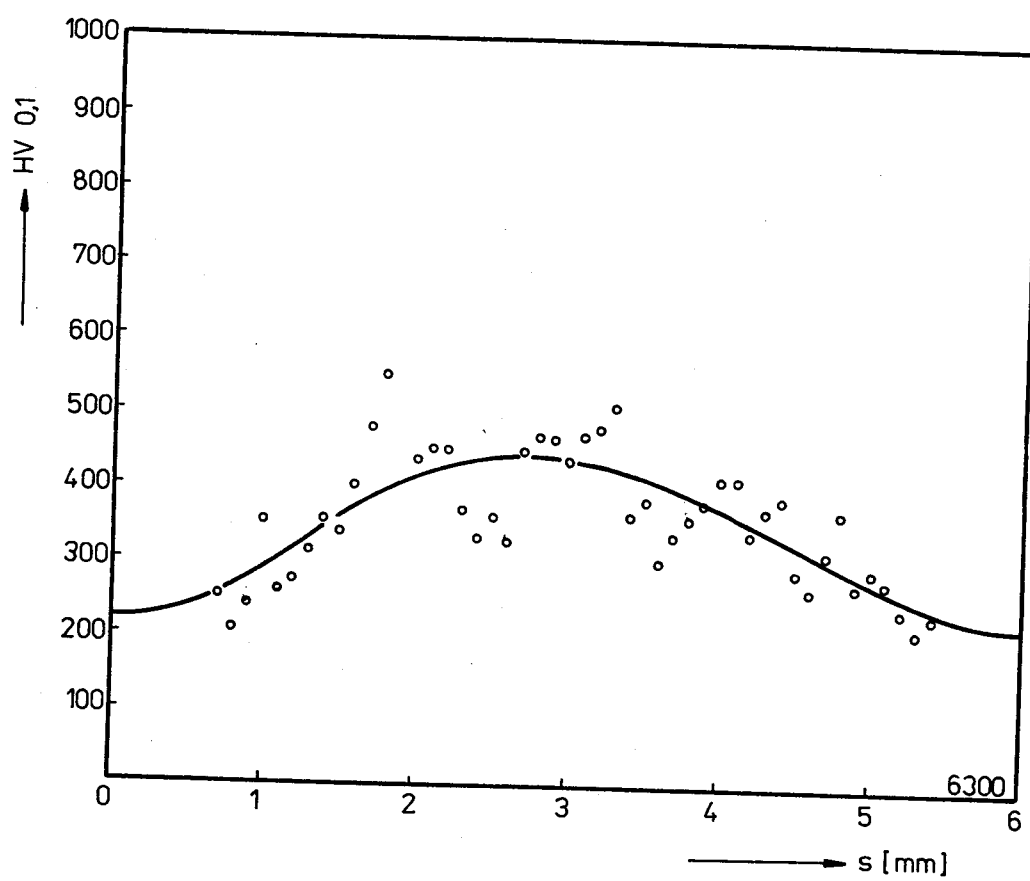
Příloha č. 18 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 62, hloubka 0,3 mm)



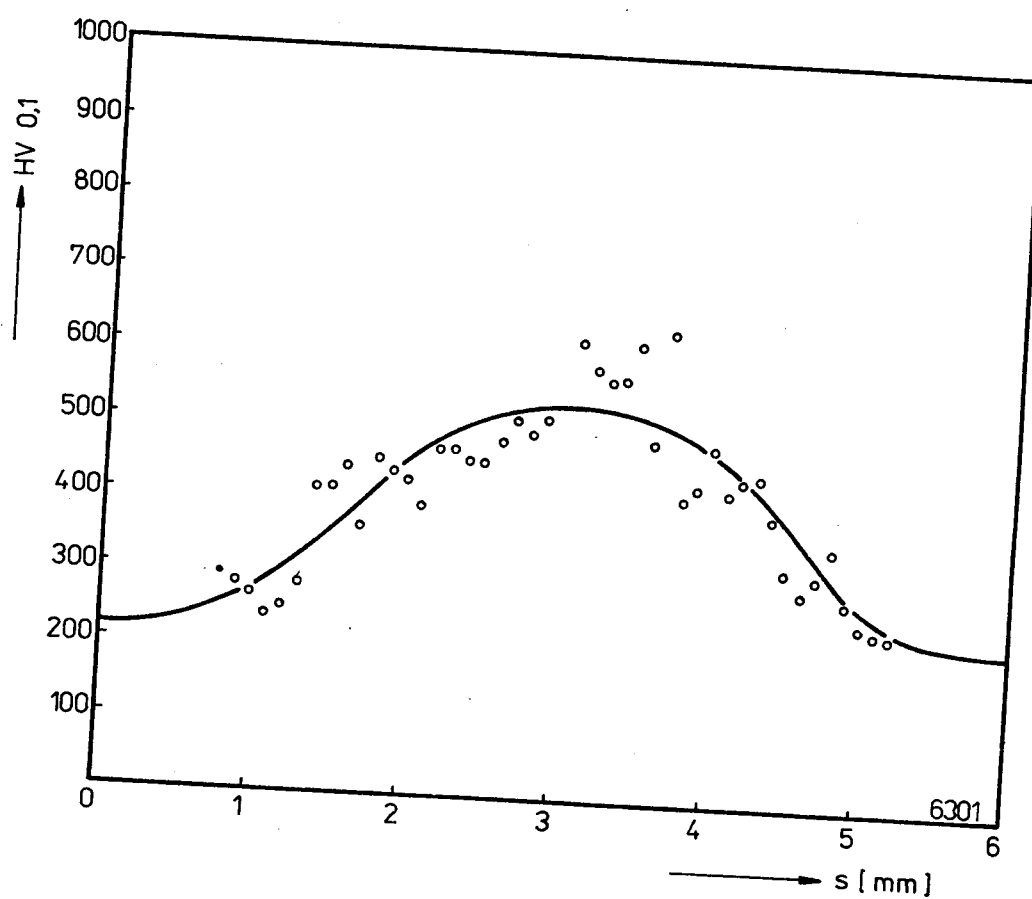
Příloha č. 19 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 62, hloubka 0,4 mm)



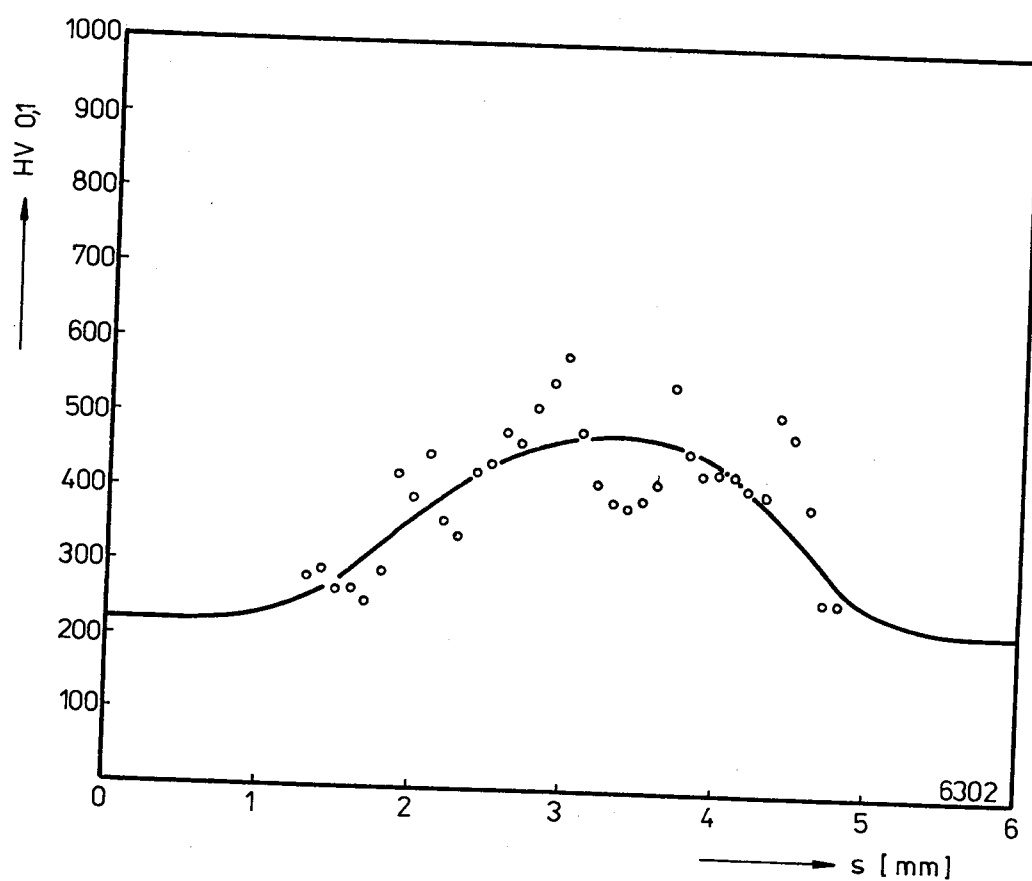
Příloha č. 20 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 63, hloubka 0,0 mm)



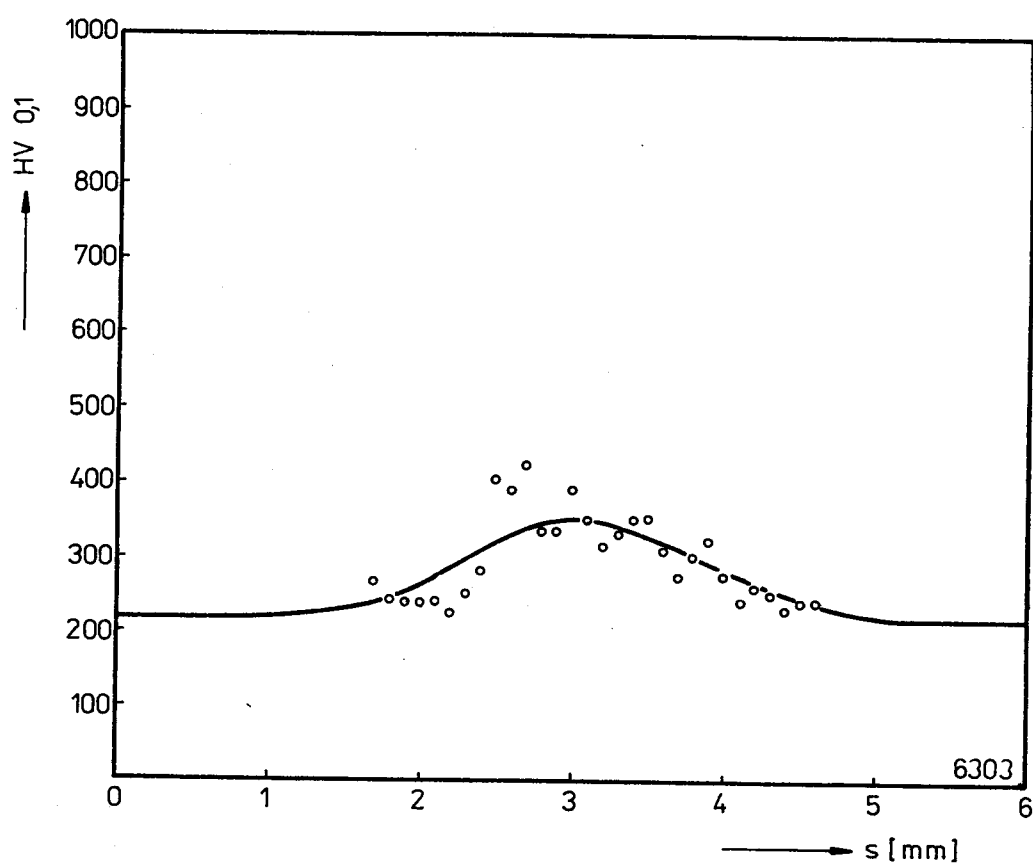
Příloha č. 21 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 63, hloubka 0,1 mm)



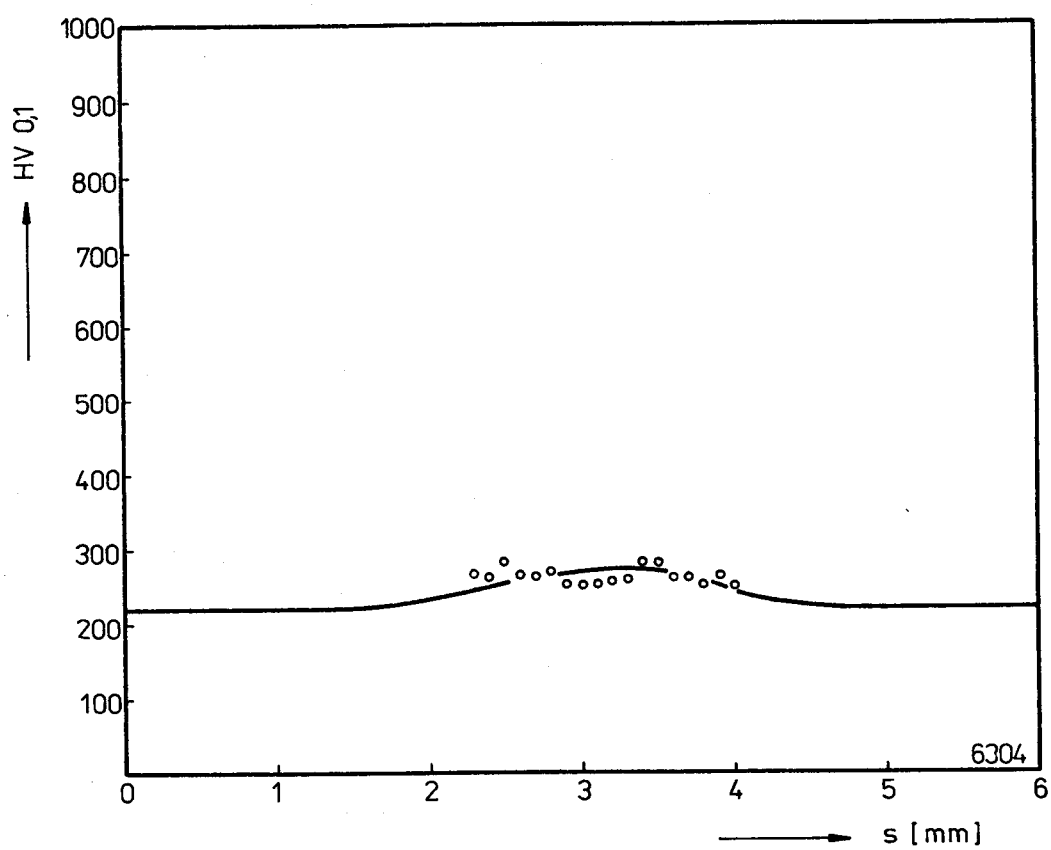
Příloha č. 22 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
vzorek č. 63, hloubka 0,2 mm)



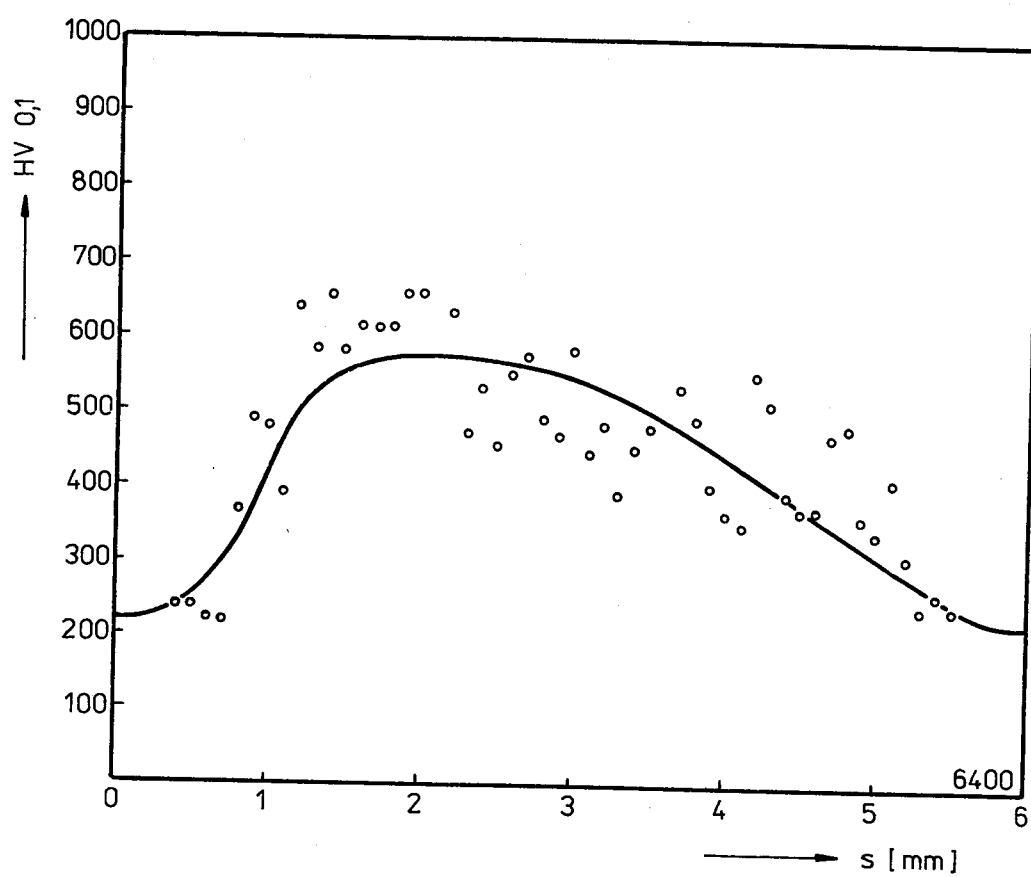
Příloha č. 23 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 63, hloubka 0,3 mm)



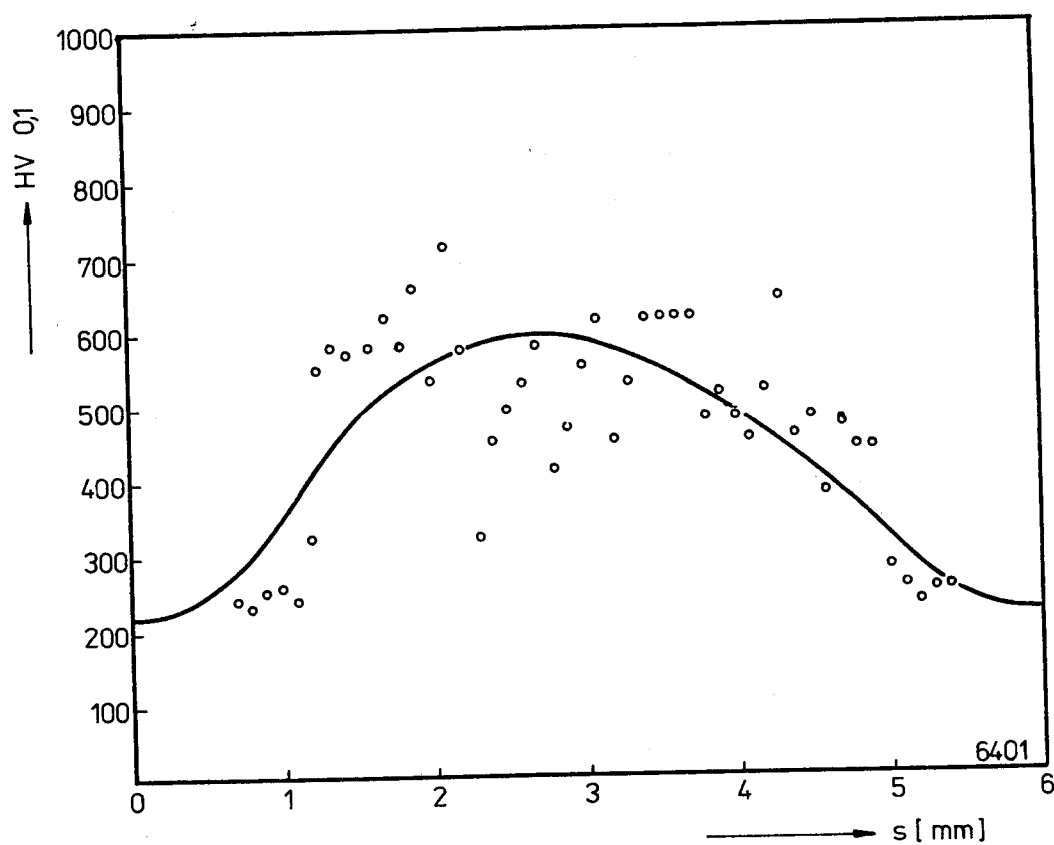
Příloha č. 24 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 63, hloubka 0,4 mm)



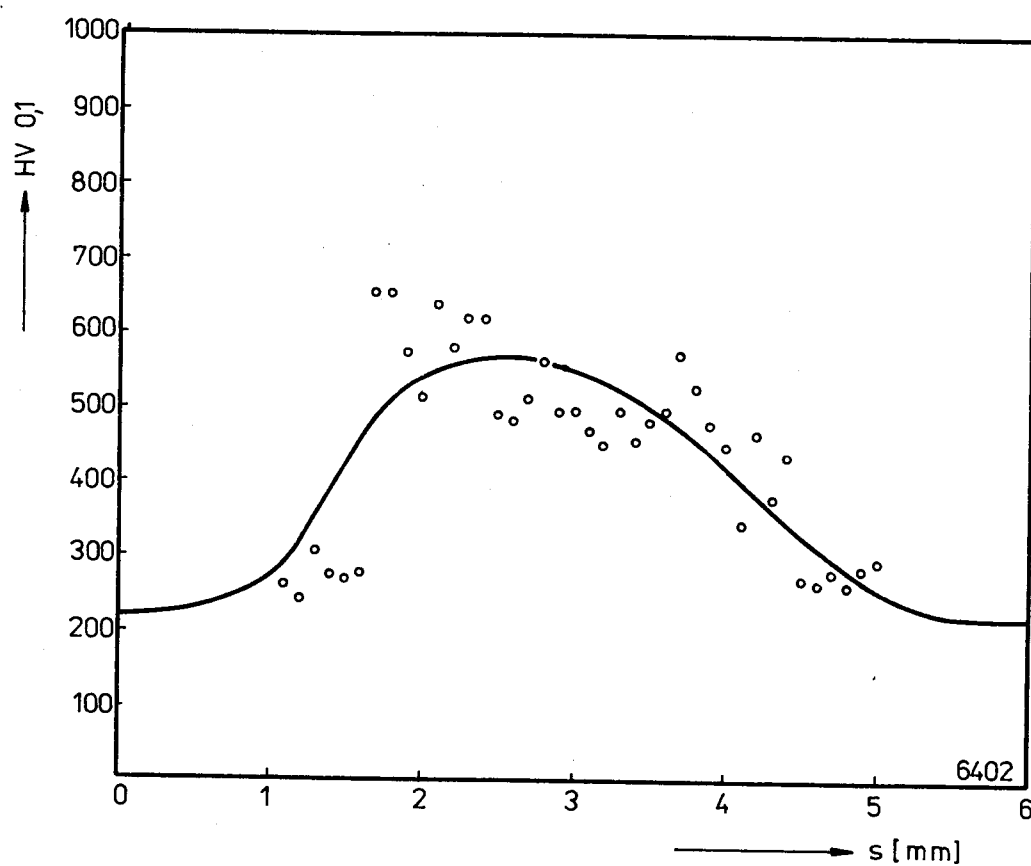
Příloha č. 25 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 64, hloubka 0,0 mm)



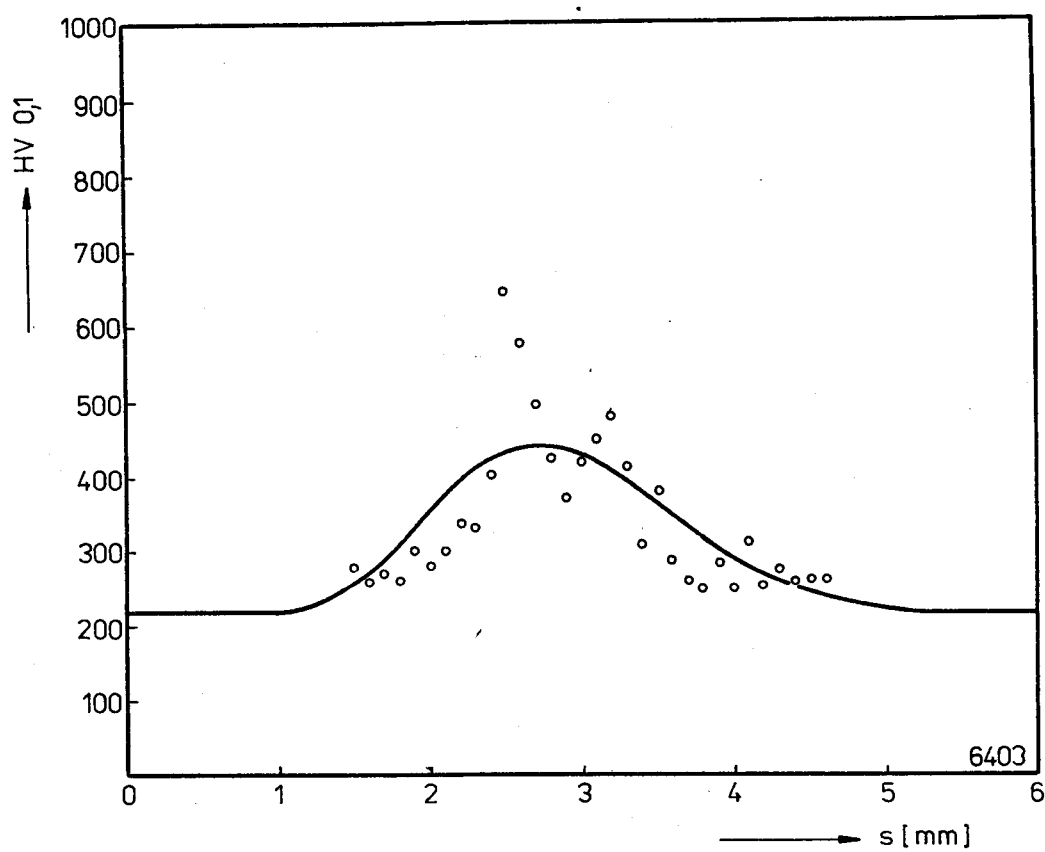
Příloha č. 26 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 64, hloubka 0,1 mm)



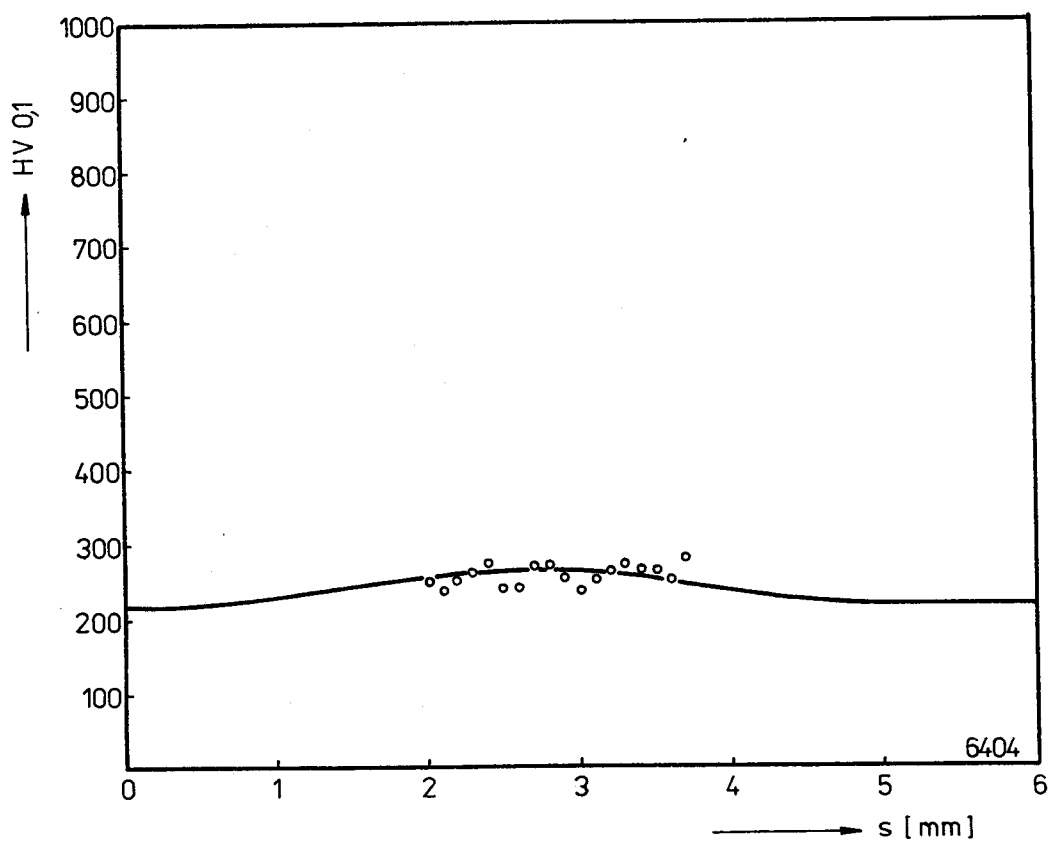
Příloha č. 27 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 64, hloubka 0,2 mm)



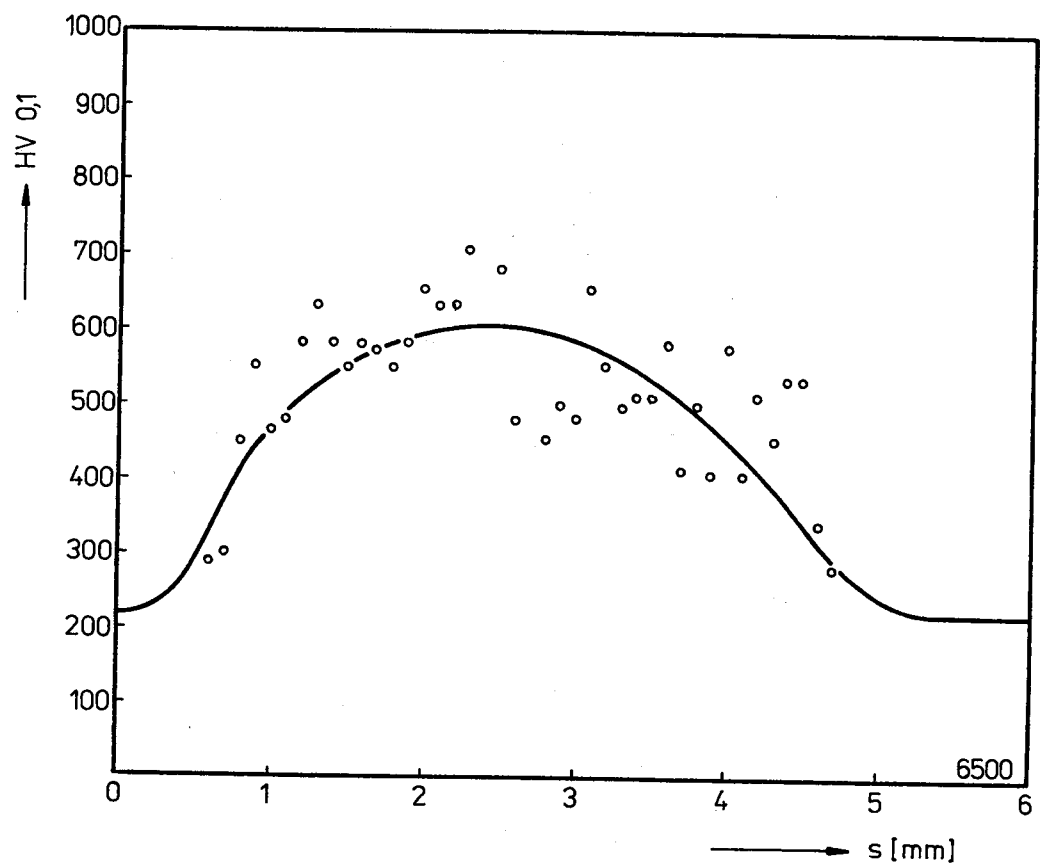
Příloha č. 28 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 64, hloubka 0,3 mm)



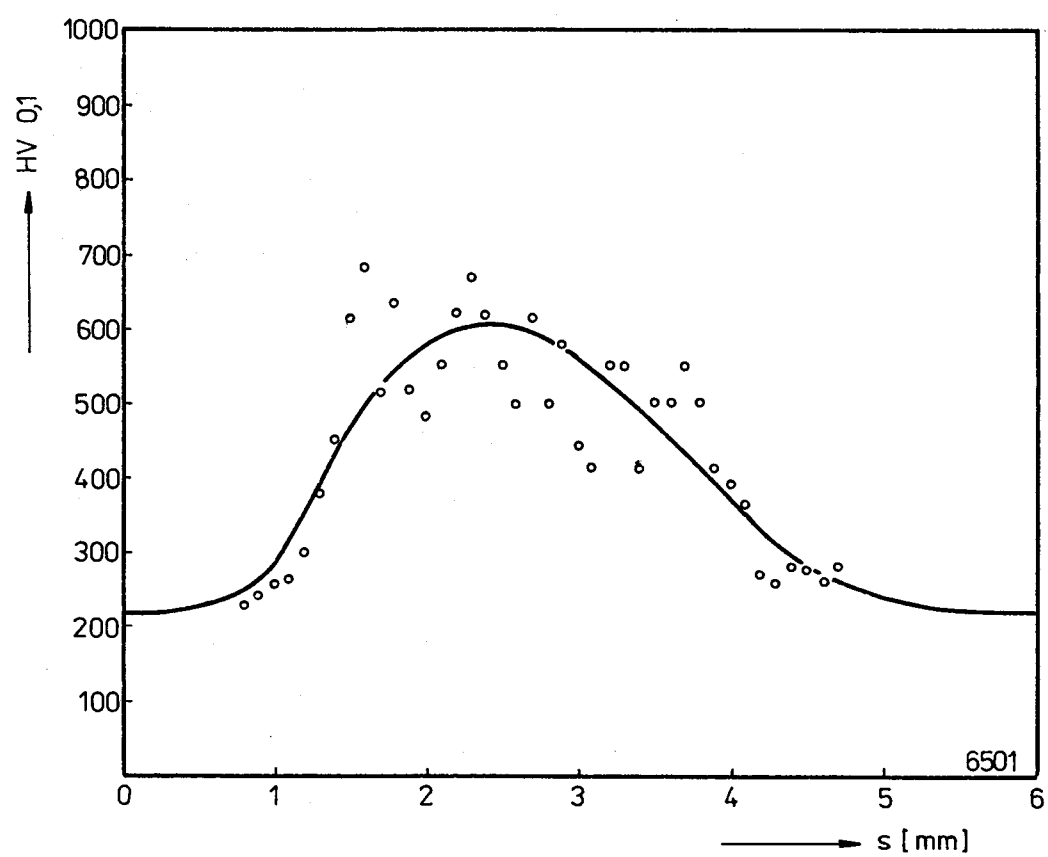
Příloha č. 29 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 64, hloubka 0,4 mm)



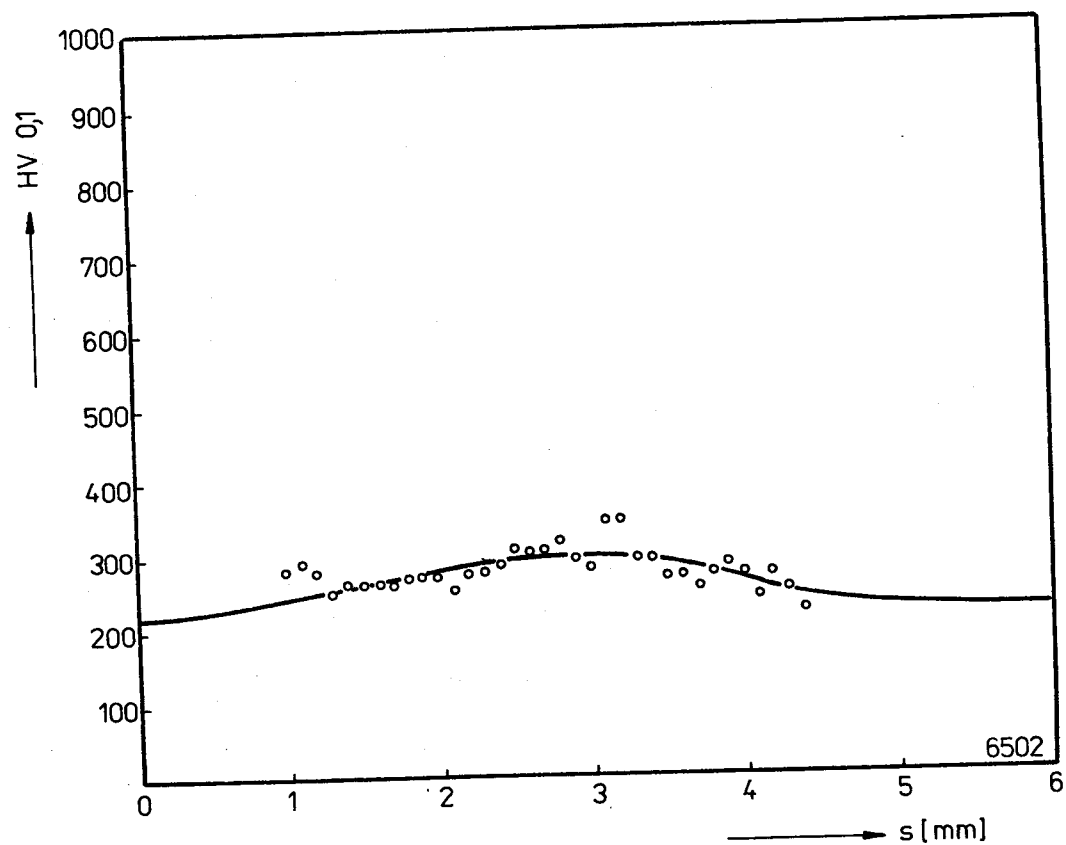
Příloha č. 30 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 65, hloubka 0,0 mm)



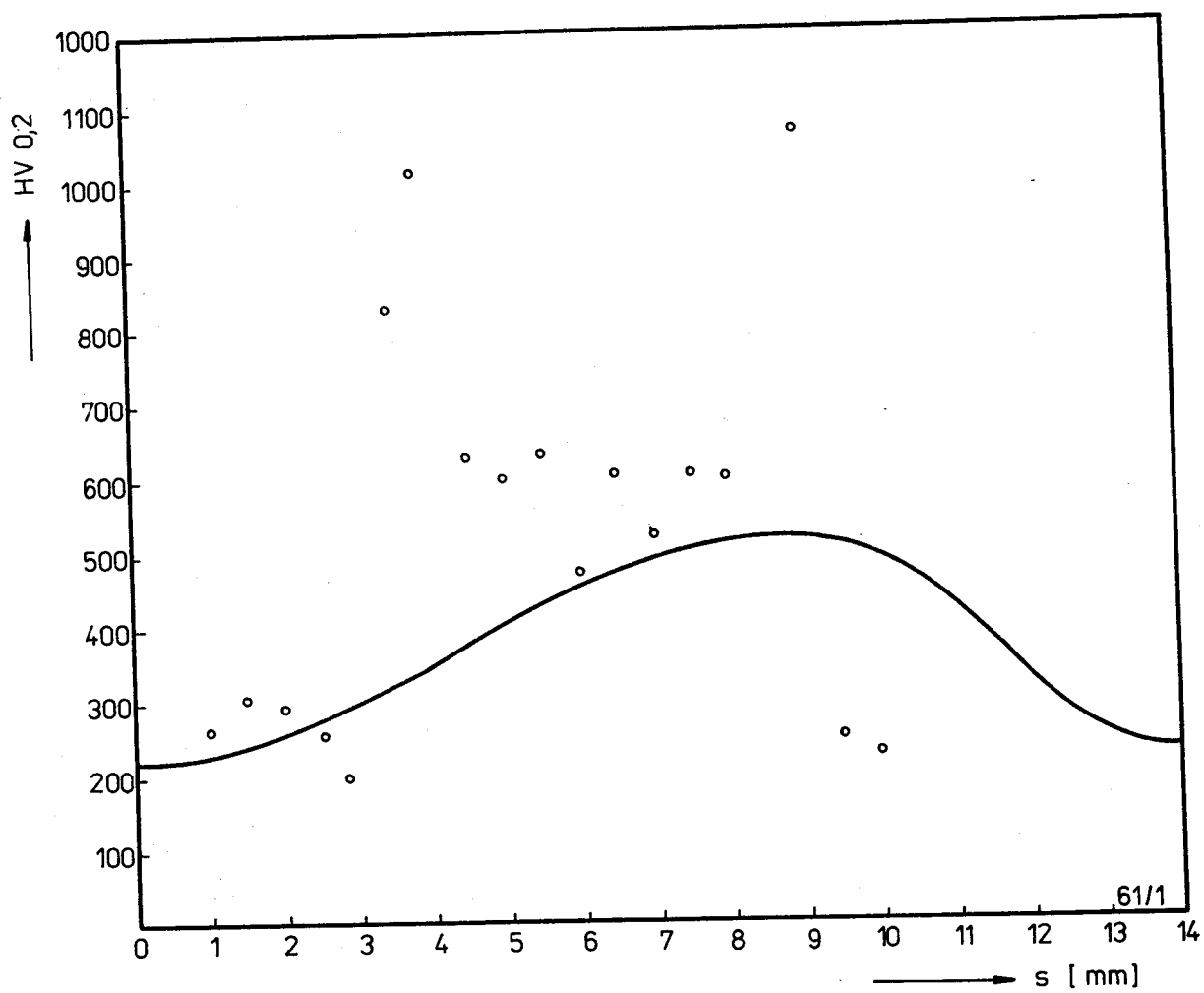
Příloha č. 31 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 65, hloubka 0,1 mm)



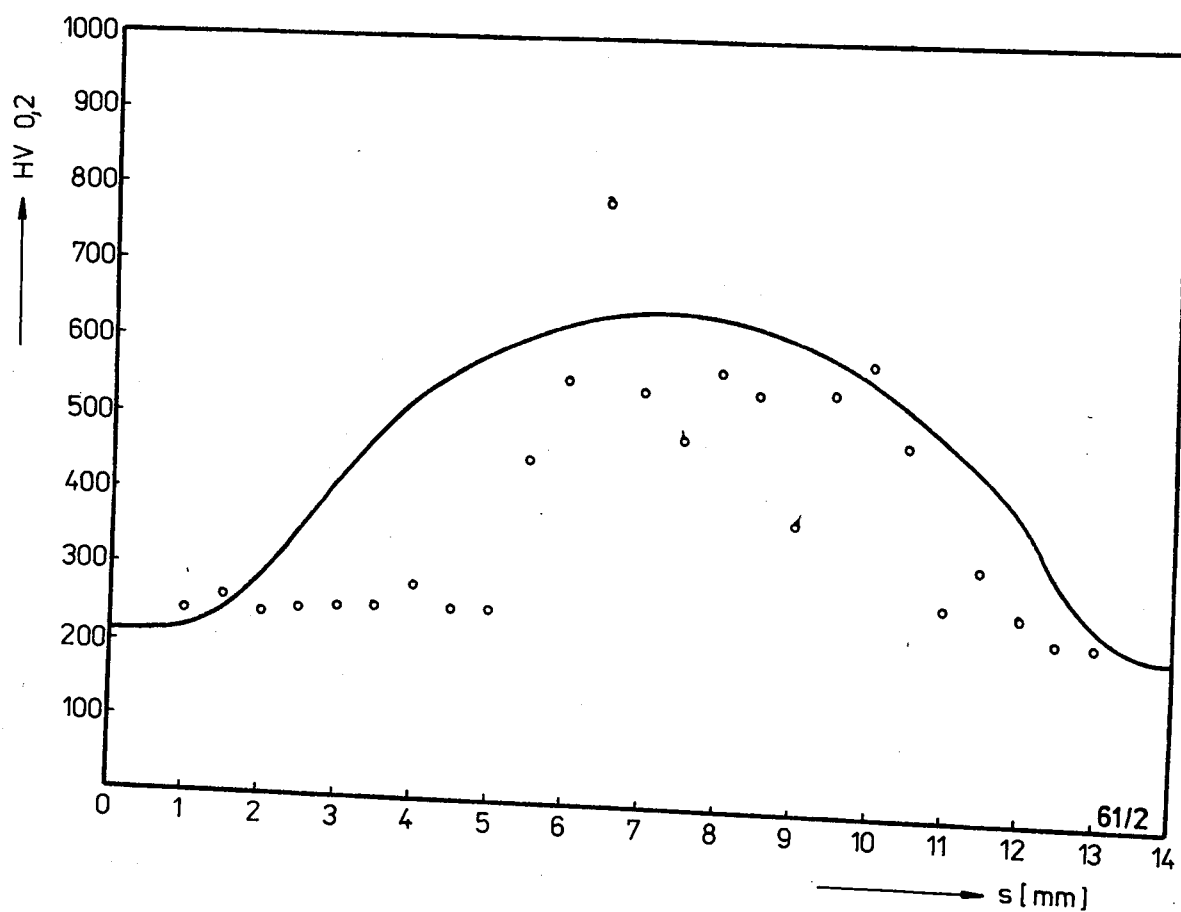
Příloha č. 32 Graf měření mikrotvrdosti v příčném řezu
(vzorek č. 65, hloubka 0,2 mm)



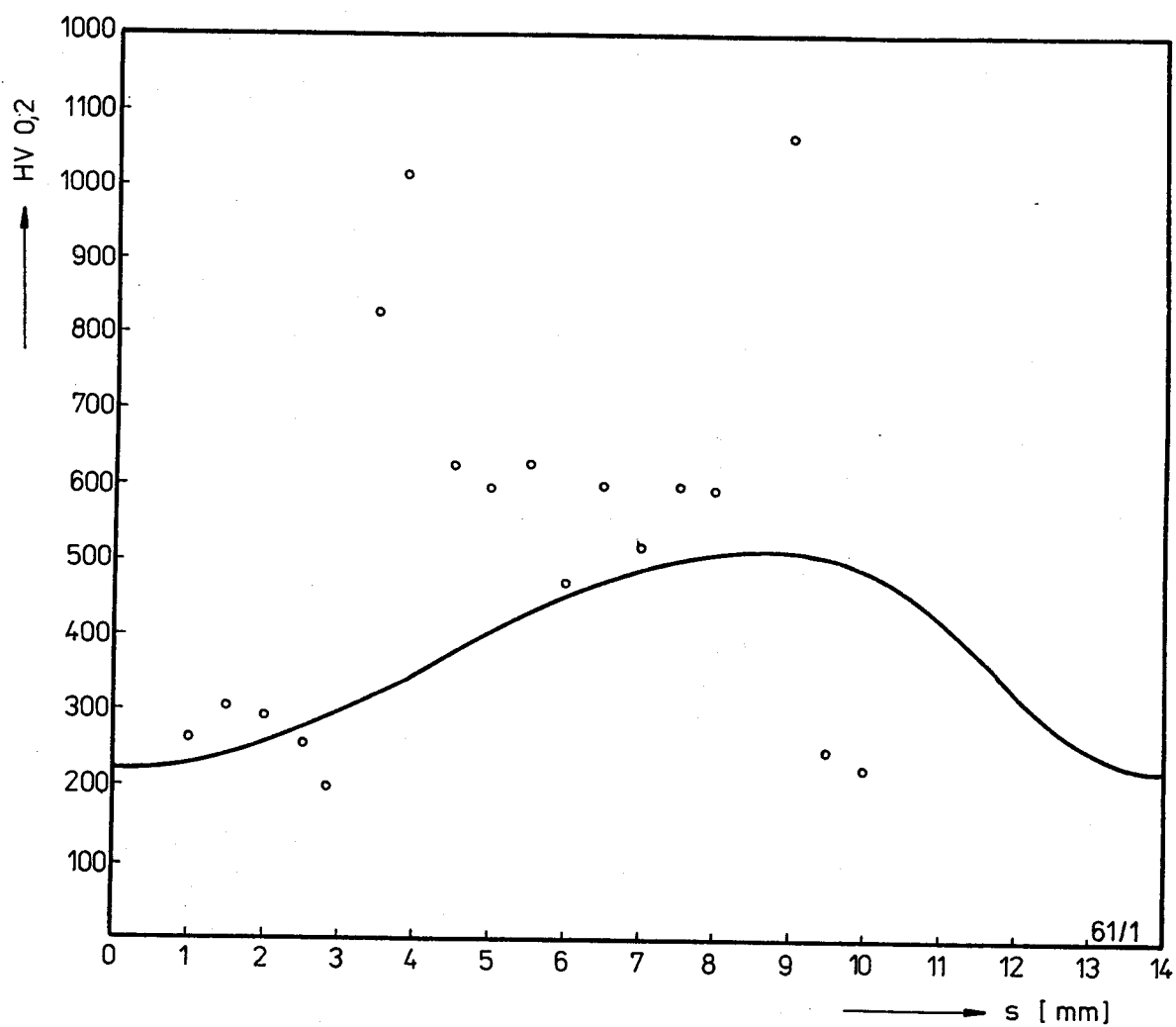
Příloha č. 33 - Graf měření mikrotvrdosti na povrchu
(vzorek č. 61, měření 1)



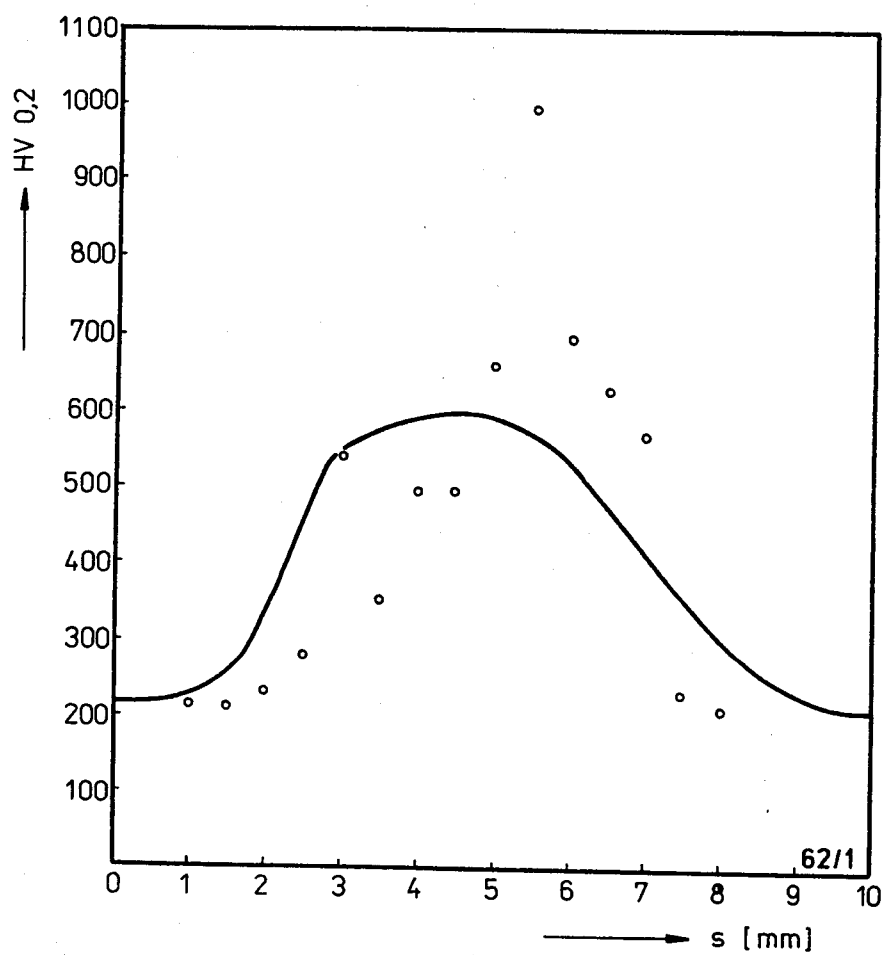
Příloha č. 34 - Graf měření mikrotvrdosti na povrchu
(vzorek č. 61, měření 2)



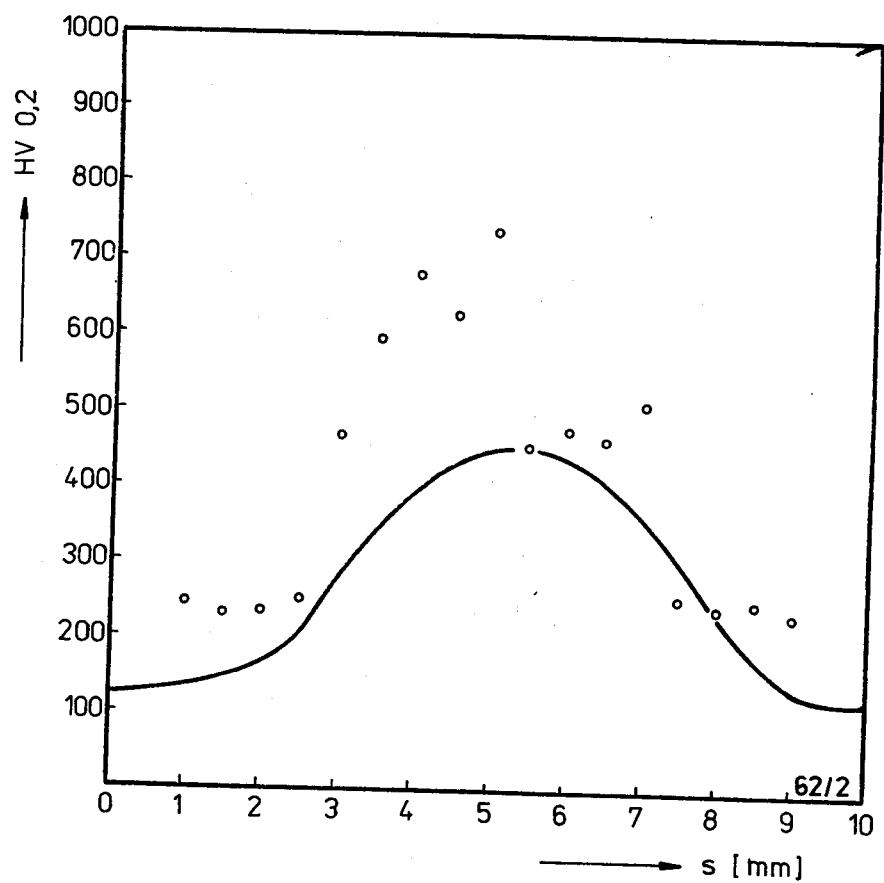
Příloha č. 33 - Graf měření mikrotvrdosti na povrchu
(vzorek č. 61, měření 1)



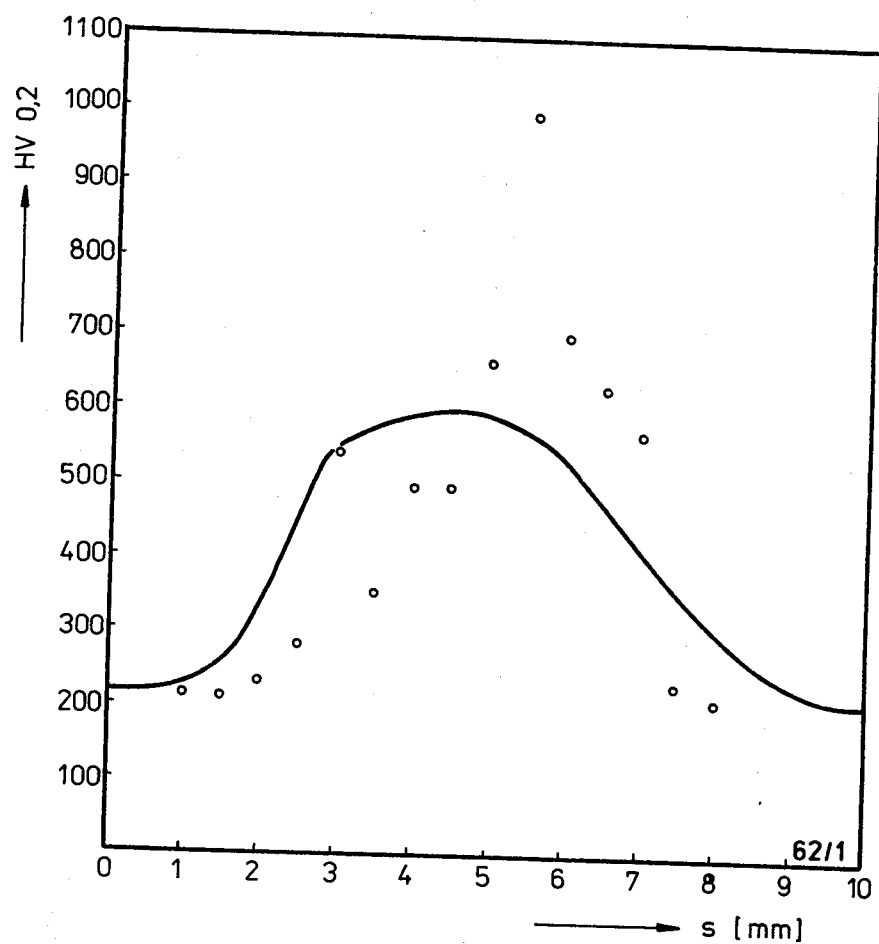
Příloha č. 35 Graf měření mikrotvrdosti na povrchu
(vzorek č.62, měření 1)



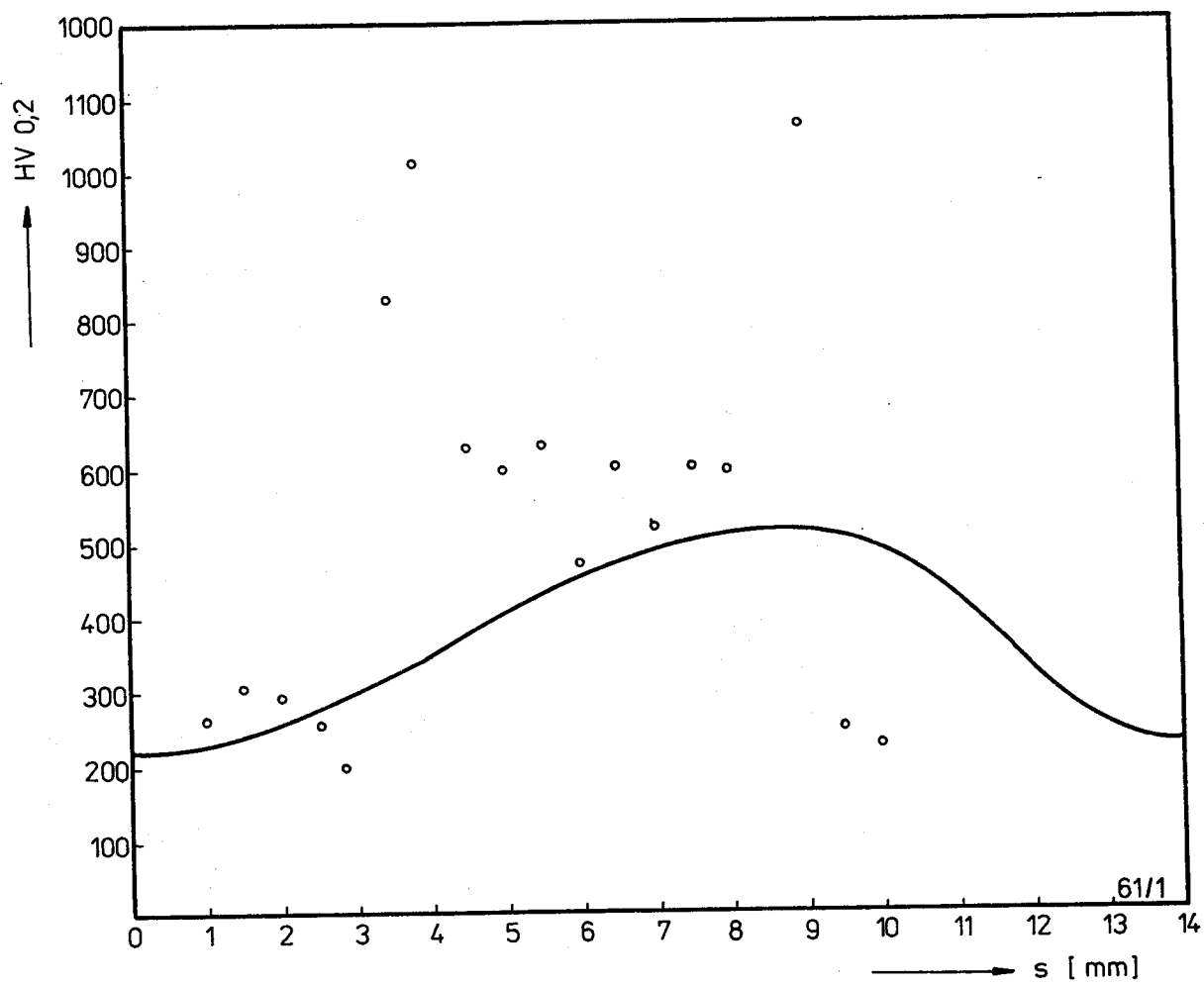
Příloha č. 37 - Graf měření mikrotvrdosti na povrchu
(vzorek č. 62, měření 2)



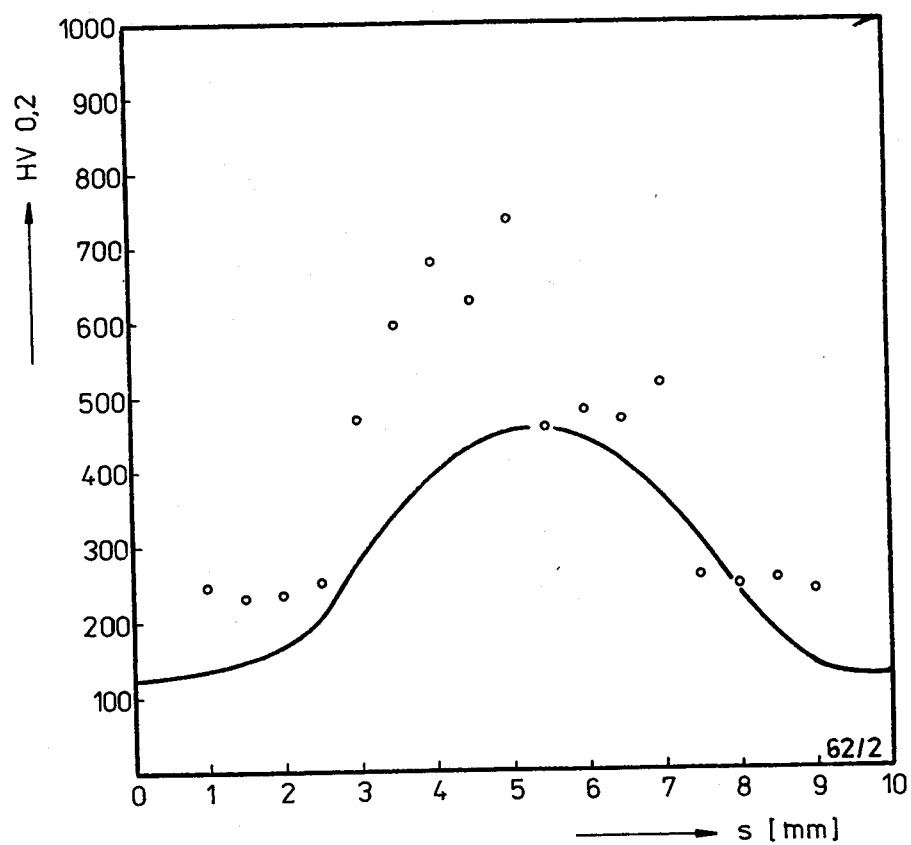
Příloha č. 35 Graf měření mikrotvrdosti na povrchu
(vzorek č.62, měření 1)



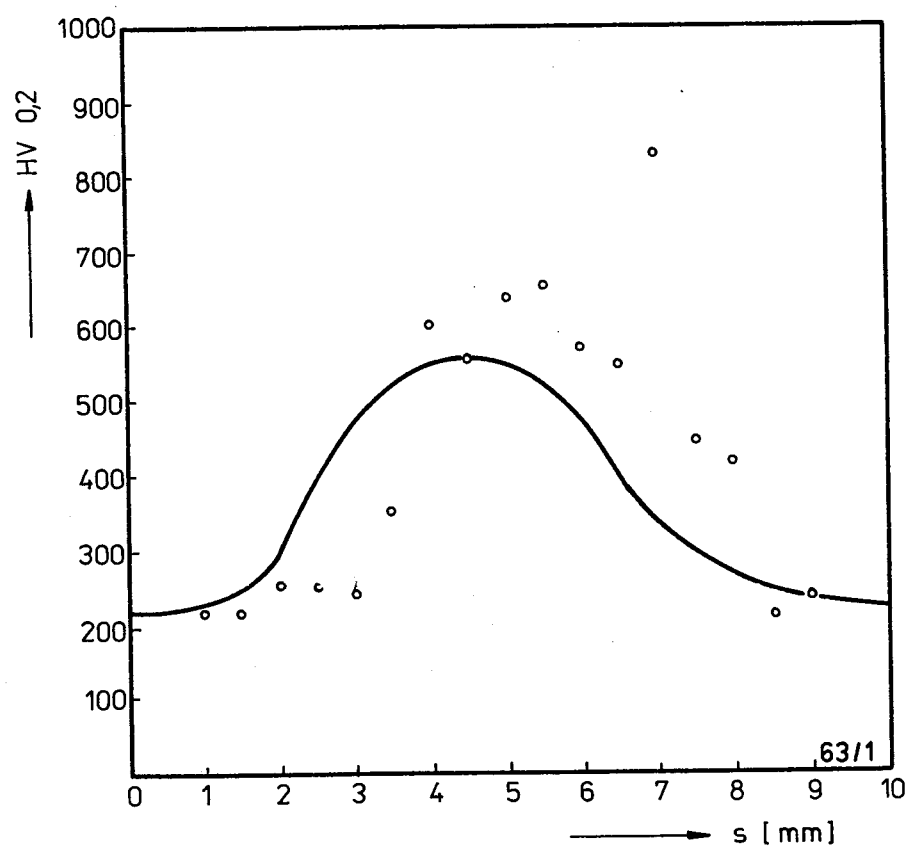
Příloha č. 33 - Graf měření mikrotvrdosti na povrchu
(vzorek č. 61, měření 1)



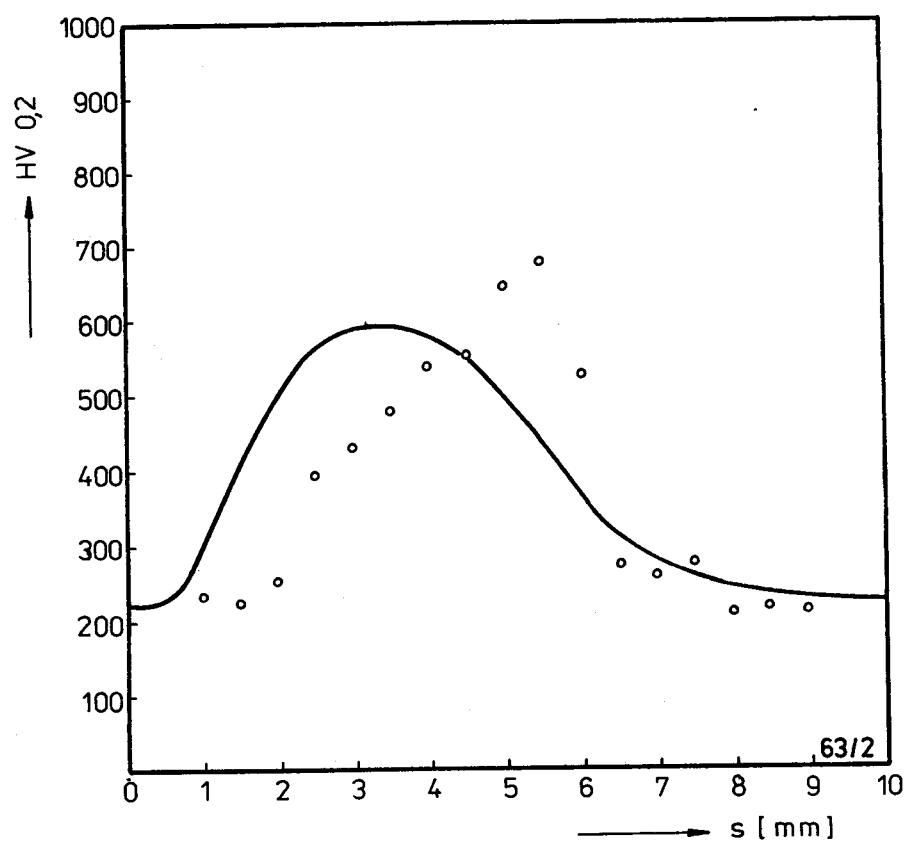
Příloha č. 37 - Graf měření mikrotvrdosti na povrchu
(vzorek č. 62, měření 2)



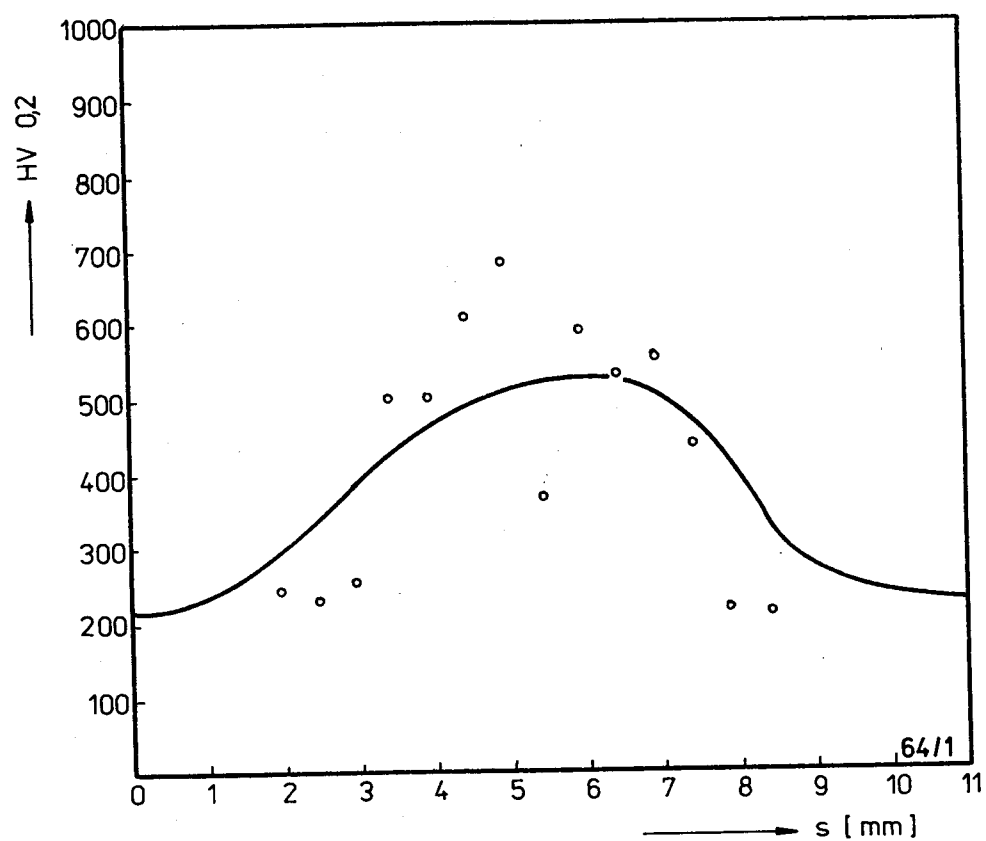
Příloha č. 37 - Graf měření mikrotvrdosti na povrchu
(vzorek č. 63, měření 1)



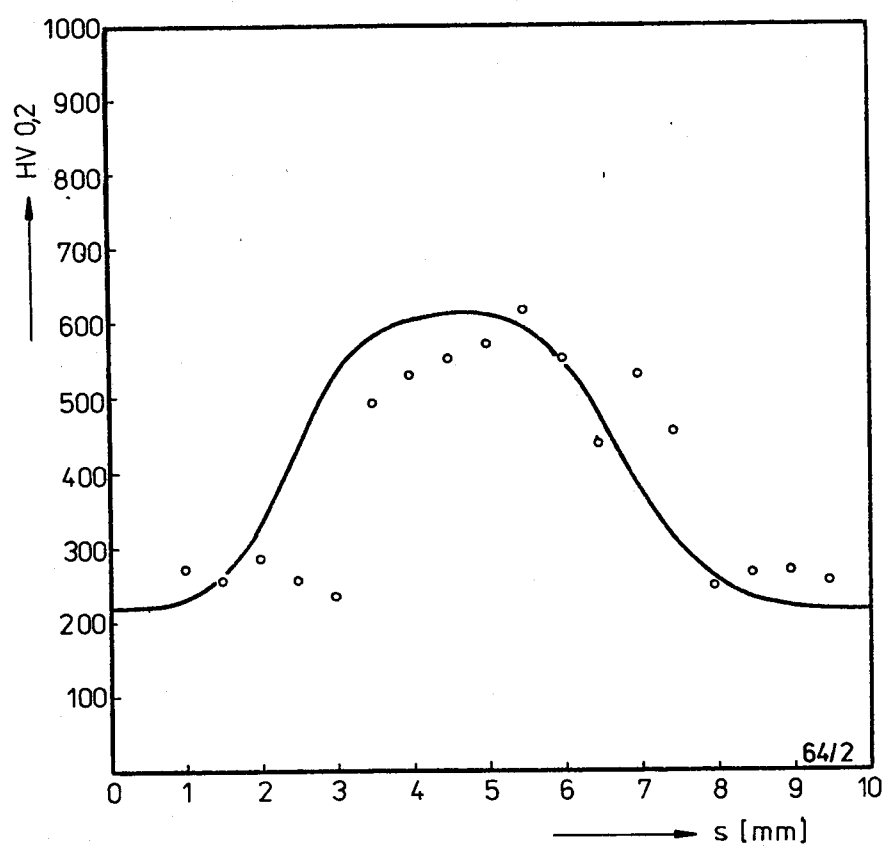
Příloha č. 38 - Graf měření mikrotvrdosti na povrchu
(vzorek č. 63, měření 2)



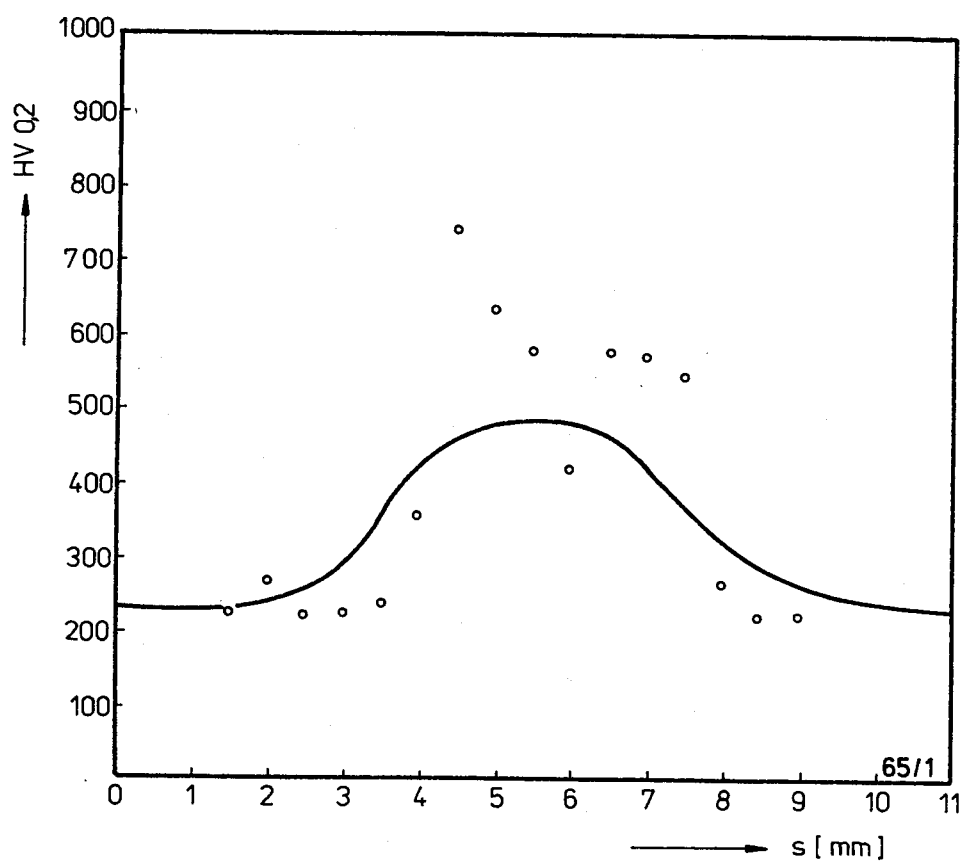
Příloha č. 39 - Graf měření mikrotvrdosti na povrchu
(vzorek č. 64, měření 1)



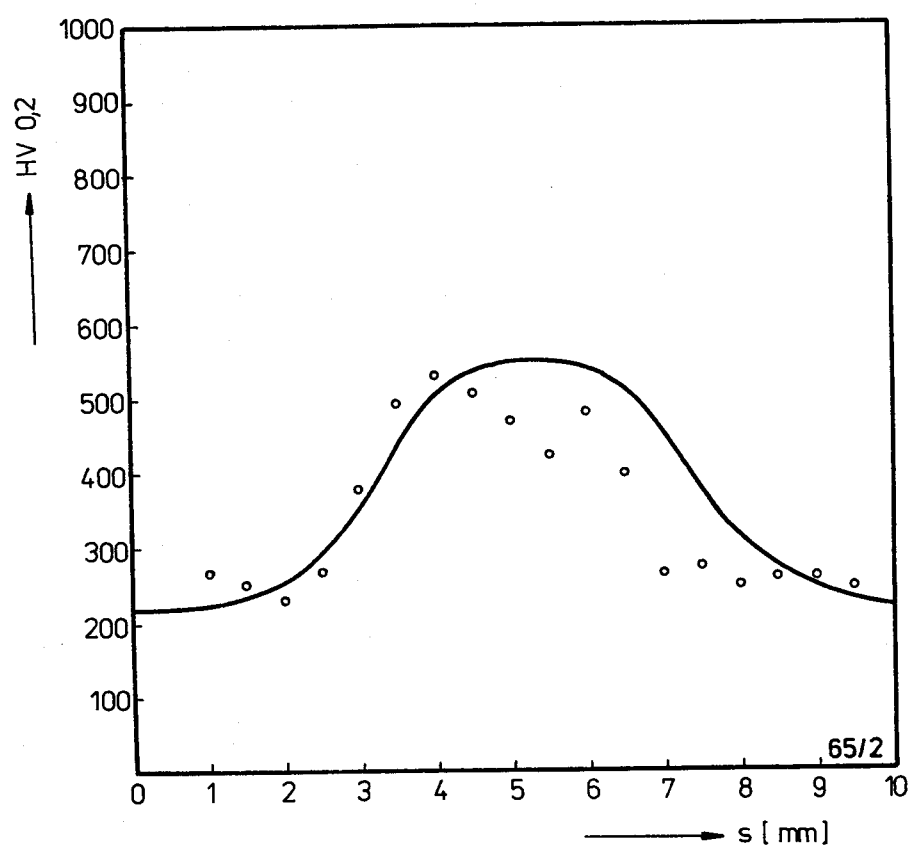
Příloha č. 40 - Graf měření mikrotvrdosti na povrchu
(vzorek č. 64, měření 2)



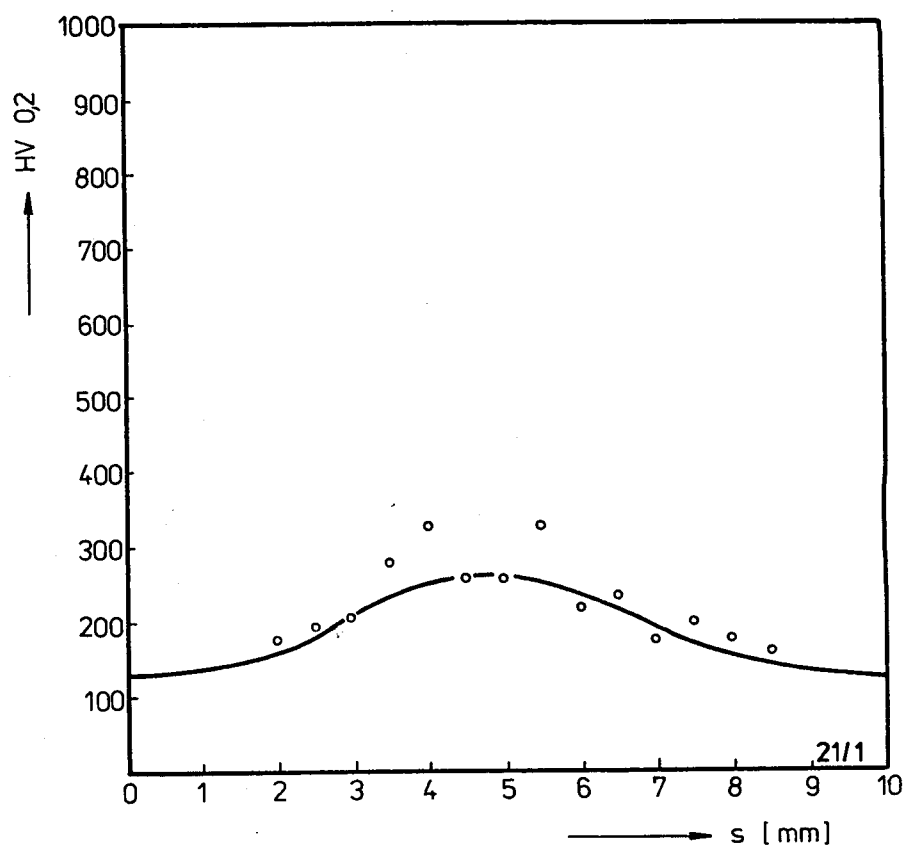
Příloha č. 41 - Graf měření mikrotvrdosti na povrchu
(vzorek č. 65, měření 1)



Příloha č. 42 - Graf měření mikrotvrdosti na povrchu
(vzorek č. 65, měření 2)



Příloha č. 43 - Graf měření mikrotvrdosti na povrchu
(vzorek č. 21, měření 1)



Příloha č. 44 - Graf měření mikrotvrdosti na povrchu
(vzorek č. 21, měření 2)

