



OPTIMALIZACE PROCESU POVRCHOVÉHO KALENÍ SOUČÁSTÍ Z LITINY GJL 250 DIODOVÝM LASEREM

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 – Strojírenská technologie
Autor práce: **Bc. Martin Kysel**
Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Daďourek, CSc.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

OPTIMIZING PROCESS OF SURFACE HARDENING PARTS FROM CAST IRON GJL 250 BY MEANS OF A DIODE LASER

Diploma thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2303T002 – Engineering Technology
Author: **Bc. Martin Kysel**
Supervisor: doc. Ing. Karel Daďourek, CSc.



Tento list nahradte
originálem zadání.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací procesu povrchového kalení litiny GJL 250 diodovým laserem. V teoretické části je proveden rozbor jednotlivých druhů grafitických litin včetně vhodné matrice pro následné tepelné zpracování a vhodných metod měření povrchové tvrdosti zakalené litiny. Tyto teoretické poznatky byly využity pro experimentální část, jejímž cílem bylo nalézt co největší rychlost laserového kalení, a to z důvodů úspory času daného procesu a zároveň zachovat co největší efektivní hloubku prokalení, kde ještě zakalená vrstva bude dosahovat tvrdosti $500 \text{ HV} \pm 30 \text{ HV}$. Experimentální část je ukončena hodnocením výsledků jednotlivých měření. Jednotlivá doporučení jsou přehledně shrnuta v závěru.

Klíčová slova

Diodový laser, grafitické litiny, kluzné plochy, povrchová tvrdost, laserové kalení litiny, mikroskopie a makroskopie vzorků, mikrotvrdost, ultrazvuková zkouška tvrdosti.

Annotation

This diploma thesis deals with optimizing process of surface hardening cast iron GJL 250 by means of a diode laser. There has been analysis performed for particular kinds of graphitic cast irons including a suitable mold for a consecutive thermal treatment and suitable measuring methods for the hardened cast iron surface hardness. These theoretical knowledge had been used for an experimental part with a target consisting in finding a possible utmost velocity of the laser hardening because of reducing time of the particular process along with saving the possible biggest effective depth of the through-hardening for reaching the hardened layer hardness of $500 \text{ HV} \pm 30 \text{ HV}$. The experimental part has been finished by evaluation of particular measurement results. The particular recommendations are well-arranged summarized in the conclusion.

Key Words

Diode laser, graphitic cast irons, hardness testing by the ultrasonic contact impedance method, laser surface hardening of cast iron, microhardness, microscopy and macroscopy of samples, sliding surfaces, surface hardness.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. K. Daňourkovi, CSc za odborné vedení a cenné informace. Dále děkuji panu Ing. J. Poupalovi, konzultantovi společnosti TOS Varnsdorf, a.s., za uvedení do problematiky a V. Čílové za odbornou pomoc během experimentální části této práce.

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ | 11 |
| ÚVOD | 12 |
| 1. TEORETICKÁ ČÁST | 14 |
| 1.1 Grafické litiny | 16 |
| 1.1.1 Faktory ovlivňující vlastnosti a strukturu grafických litin | 16 |
| 1.1.2 Strukturní složky grafických litin | 21 |
| 1.1.3 Přehled jednotlivých druhů grafických litin | 23 |
| 1.2 Povrchové kalení litin | 28 |
| 1.2.1 Povrchové kalení litin diodovým laserem | 29 |
| 1.2.2 Povrchové kalení litin indukci | 32 |
| 1.2.3 Povrchové kalení litin elektronovým paprskem | 34 |
| 1.3 Měření povrchové tvrdosti litiny | 36 |
| 1.3.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella | 36 |
| 1.3.2 Ultrazvuková zkouška tvrdosti – UCI | 40 |
| 2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | 46 |
| 2.1 Dílčí činnosti práce | 46 |
| 2.2 Odlití hranolů podle výkresové dokumentace a následné obrobení | 48 |
| 2.3 Kalení součástí diodovým laserem | 49 |
| 2.4 Zarovnání čel a broušení | 51 |
| 2.5 Měření povrchové tvrdosti | 51 |
| 2.6 Odběr a preparace vzorků | 55 |
| 2.7 Broušení a leštění vzorků | 57 |
| 2.8 Popis materiálu vzorků | 59 |
| 2.8.1 Chemické složení a tvrdost výchozí struktury litiny (před zakalením) | 59 |
| 2.8.2 Metalografické hodnocení struktury litiny (nezakalená část) | 60 |
| 2.9 Makroskopie a mikroskopie vzorků | 62 |
| 2.9.1 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 1 | 63 |
| 2.9.2 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 2 | 65 |
| 2.9.3 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 3 | 68 |
| 2.9.4 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 4 | 70 |
| 2.9.5 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 5 | 72 |
| 2.9.6 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 6 | 74 |
| 2.9.7 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 7 | 77 |

| | |
|---|------------|
| 2.9.8 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 8 | 79 |
| 2.9.9 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 9 | 81 |
| 2.9.10 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 10 | 83 |
| 2.9.11 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 11 | 85 |
| 2.9.12 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 12 | 87 |
| 2.10 Měření mikrotvrdosti | 89 |
| 2.11 Hodnocení výsledků | 108 |
| ZÁVĚR | 111 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 113 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 117 |
| SEZNAM GRAFŮ | 120 |
| SEZNAM TABULEK | 121 |
| SEZNAM PŘÍLOH | 122 |

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

| Symbol | Jednotka měření | Význam |
|----------------------|------------------------|---|
| A_v | mm ² | Plocha šikmého povrchu vtisku |
| C_E | % | Uhlíkový ekvivalent |
| D | mm | Průměr kuličky |
| d | mm | Střední průměr vtisku |
| F | N | Zkušební zatížení |
| h | mm | Hloubka vtisku |
| HBS | – | Tvrдость podle Brinella při použití ocelové kuličky |
| HBW | – | Tvrдость podle Brinella při použití kuličky z tvrdokovu |
| HRC | – | Tvrдость podle Rockwella |
| HV | – | Tvrдость podle Vickerse |
| n | – | Počet měření |
| S_c | – | Stupeň eutektičnosti |

| Zkratka | Význam |
|----------------|--|
| ADI | Izotermicky kalená litina s kuličkovým grafitem na bainitickou strukturu |
| CADI | Izotermicky kalená karbidická litina s kuličkovým grafitem |
| ECD | Efektivní hloubka prokalení |
| GJL 250 | Litina 42 2425 s lupínkovým grafitem |
| LKG | Litina s kuličkovým grafitem |
| LLG | Litina s lupínkovým grafitem |
| UCI | Ultrazvuková metoda měření tvrdosti |
| ZA | Zbytkový austenit |

ÚVOD

Cílem této diplomové práce bylo stanovení optimálních parametrů povrchového kalení dílců z litiny GJL 250 diodovým laserem. Ve firmě TOS Varnsdorf, a.s. jsou některé těžké dílce jako lože, stojan atd. vyráběny z litiny s lupínkovým grafitem, jejichž kluzné plochy jsou pro zvýšení otěruvzornosti povrchově kaleny laserem. V minulosti se výhradně používaly kalené lišty, které byly lepeny na obrobené plochy těchto odlitků. V průběhu času se ukázal tento systém více nákladný a pracný. Moderní technologie spočívá v použití diodového laseru pro kalení litin, který má rychle a efektivně zareagovat na produktivitu práce dnešní doby. K tomu výrazně napomáhá výkonný průmyslový robot, který dovede přesně a v krátkém čase zakalit danou litinu.

Grafitické litiny jsou v současnosti velmi využívané konstrukční materiály, které se vyznačují především **dobrými útlumovými vlastnostmi**. Tato nepostradatelná vlastnost je vhodná především pro těžké obráběcí stroje, které garantují vysokou přesnost obrábění v 0,01 mm.

Po kalení litiny vzniká kompozitní materiál s vysoce hodnotnými vlastnostmi: velmi tvrdý díky martenzitické struktuře, přitom s dobrými kluznými vlastnostmi přítomného grafitu, podporovaný perlitickou strukturou v přechodové vrstvě a houževnatý díky podílu zbytkového austenitu.

Diplomová práce se skládá z teoretické a experimentální části. V teoretické části je vysvětleno, na kterých obráběcích strojích se ve firmě TOS Varnsdorf, a.s. kalí kluzné plochy a z jakého důvodu se používá litina GJL 250. Rozbor jednotlivých druhů grafitických litin, včetně vhodné matrice pro následné tepelné zpracování, je rozebrán v jednotlivých podkapitolách. Je zde uveden důležitý fakt, a to že povrchové kalení litiny s lupínkovým grafitem **není běžným a jednoduchým procesem zvláště u hmotných odlitků**.

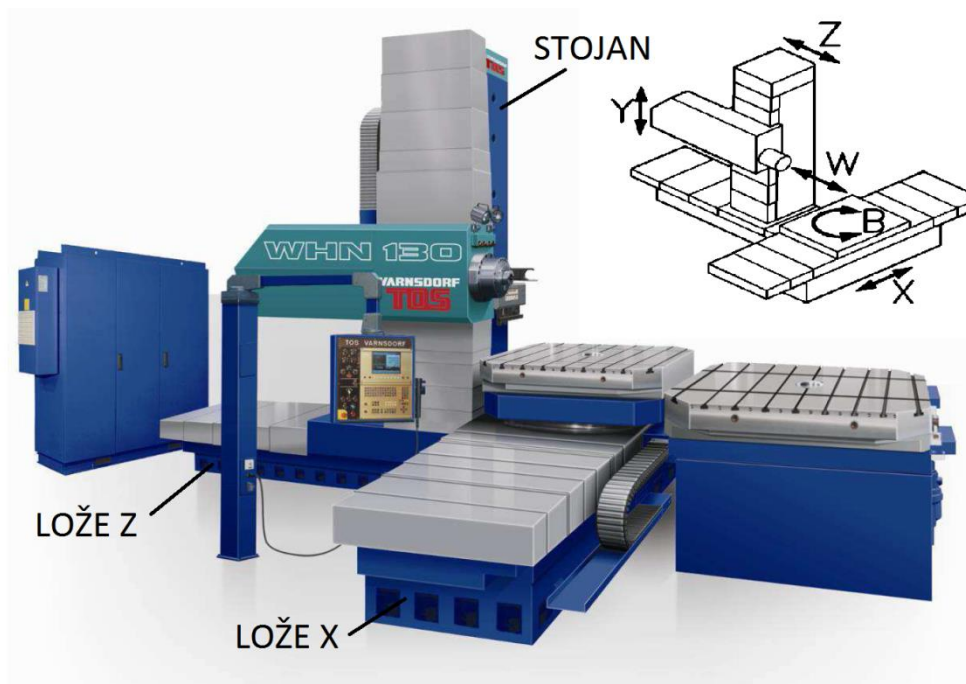
V závěrečné podkapitole jsou zmíněny výhody a nevýhody jednotlivých metod měření povrchové tvrdosti s důrazem na problematický výběr vhodné varianty **kvůli zakalenému povrchu litiny s heterogenní strukturou**.

Cílem experimentální části je optimalizace procesu povrchového kalení součástí z litiny GJL 250 diodovým laserem. Zejména najít co největší rychlost laserového kalení, a to z důvodu úspory času daného procesu a zároveň zachovat co největší efektivní hloubku prokalení, kde ještě zakalená vrstva bude dosahovat tvrdosti $500 \text{ HV} \pm 30 \text{ HV}$, která je daná výrobním předpisem. Experimentální část je ukončena hodnocením výsledků jednotlivých měření. Jednotlivá doporučení jsou přehledně shrnuta v závěru.

Prostudování této diplomové práce by mělo vést k plnému porozumění sledované problematiky a k získání ucelených informací o povrchovém kalení litiny laserem, např. že není možné se řídit při kalení laserem běžnými diagramy tepelného zpracování, a že volba kalící teploty je závislá na mnoha faktorech. **Z tohoto důvodu nelze přejímat jednotlivá doporučení ostatních firem, s výjimkou totožných podmínek povrchového kalení.**

1. TEORETICKÁ ČÁST

Vodící plochy, které jsou laserově kaleny, se používají na horizontálních frézovacích a vyvrtávacích strojích WHN110(Q, MC), WHN130(Q, MC), WH105CNC a WHN(Q)13CNC. Vedení lineárních skupin jsou kluzná. Kalené plochy se vyskytují na skupině STOJAN, vůči kterému se pohybuje vřeteník, dále na skupině LOŽE X na kterém se pohybují saně stolu a nakonec na skupině LOŽE Z, kde jsou uloženy saně stojanu. Schéma rozmístění jednotlivých celků je znázorněno na obrázku 1. **Největší problém spočívá v nastavení vhodných parametrů, při kterých by kalený povrch odolával tlaku pohybující se hmoty v řádech několika tun – na jednu kalenou plochu i 10 t.** Největší rychlost při rychloposuvu dosahuje 10000 mm/min. Mezi pohybující se kluznou dvojicí je olejový film – tzv. ztrátový olej, který neustále protéká. **Další bod, který je zásadní v případě ovlivnění výsledné struktury, spočívá ve zvolení vhodného materiálu.** Jako výchozí materiál byla použita litina GJL 250 (litina s lupínkovým grafitem), která se ve firmě používá více než 50 let. Oproti jiným litinám je poměrně levná a v porovnání se svařovanou konstrukcí je cenově výhodná, pokud se nejedná o kusovou výrobu.



Obr. 1: Příklad rozložení jednotlivých skupin na stroji WHN130 [15]

Ukázku laserového kalení kluzných ploch stroje nalezneme v příloze A.

Výhody laserového kalení v porovnání s kalenými ocelovými lištami:

- úspora času;
- snížení nákladů (odpadá lepení, frézování drážky pro lišty, výroba jednotlivých lišt);
- menší přídavek na broušení;
- snížení průběžné doby výroby.

Nevýhody laserového kalení v porovnání s kalenými ocelovými lištami:

- nehodí se pod valivá vedení;
- náchylnost na kvalitu materiálu;
- vnesení deformace (odlitek se musí propnout, obrobení do konkávního tvaru, kalením se srovná).

1.1 Grafitické litiny

Grafitické litiny jsou v současnosti velmi využívané konstrukční materiály, které se vyznačují především **dobrými útlumovými vlastnostmi**. Nejlepší útlumové vlastnosti vykazuje litina s lupínkovým grafitem. [9] Tato nepostradatelná vlastnost je vhodná především pro těžké obráběcí stroje, které garantují vysokou přesnost obrábění v 0,01 mm. Tvar grafitu ovlivňuje výslednou schopnost útlumu. Například lupínkový grafit tlumení zvětšuje, kdežto zrnitý působí na útlum mírněji. Výhodná je i **pořizovací cena** a **technologické vlastnosti litin** – zabíhavost, slévatelnost. Specifické vlastnosti jednotlivých litin, vhodných pro povrchové kalení, budou popsány dále.

1.1.1 Faktory ovlivňující vlastnosti a strukturu grafitických litin

Dle podmínek ovlivňující strukturu litiny – **chemické složení taveniny, rychlost ochlazování, zárodečný stav taveniny nebo způsobu tepelného zpracování atd.** vzniká eutektikum, které může být **cementitické – ledeburit** nebo **grafitické**. Grafit zbarvuje lomové plochy litiny šedě a cementit bíle. Z tohoto důvodu se dělí litiny na **grafitické** a **litiny ledeburitické**. Litina maková (přechodová) tvoří přechod mezi litinou bílou a grafitickou. [9, 14, 16]

Struktura grafitických litin je tvořena **základní kovovou maticí a grafitem**. Tyto litiny vznikají podle stabilní soustavy Fe-C za vzniku grafitu. Kdyby krystalizace probíhala rychleji podle metastabilní soustavy Fe-C, vnikl by ledeburit – bílá litina. [9, 11]

Pro výzkum této diplomové práce je důležité (viz dále), jakou bude mít litina matici. Nejvýhodnější z hlediska tepelného zpracování (kalení) je **perlitická matrice**. Pro její vytvoření je nezbytné, aby eutektoidní přeměna proběhla podle metastabilního diagramu a ne stabilního. K tomu dopomáhají výše zmíněné faktory, které ovlivňují strukturu a vlastnosti grafitických litin.

Vliv chemického složení

Chemické složení je nejdůležitější činitel, který má vliv na mechanické vlastnosti odlitků (mikrostrukturu).

Hlavními (primárními) prvky, jež se objevují u grafitických litin, jsou **C, Si, Mn, S, P** a prvky z očukujících a modifikačních přísad. [11]

C – uhlík

- podporuje grafitizaci;
- zlepšuje útlumové vlastnosti;
- kompenzuje smršťování.

Si – křemík

- podporuje grafitizaci (nejdůležitější grafitotvorná přísada);
- snižuje teplotu tání, zvyšuje tekutost;
- feritotvorný (čím je větší obsah, tím hrubší je grafit);
- snižuje pevnost (nejen zvyšováním stupně grafitizace, ale také feritizací základní hmoty);
- zvyšuje tvrdost (nad 3 %) – sníží se množství grafitu a zvýší obsah křemíku ve feritu (tzv. silikoferit – zvýšená tvrdost);
- snižuje tažnost a houževnatost.

Mn – mangan (vliv je celkem malý)

- zjemňuje strukturu;
- karbidotvorný prvek – stabilizuje cementit;
- zvyšuje pevnost (do cca 0,8 až 1,2 % Mn, při středním obsahu uhlíku 2,8 až 3,4 %);
- přebytek manganu zvyšuje tvrdost (odolnost proti otěru) a křehkost;
- důležitý pro odsíření litiny (bývá 0,4 až 0,8 %).

S – síra (nežádoucí prvek)

- s větším obsahem S se zhoršují mechanické vlastnosti – křehkost;
- zvětšuje smrštění odlitku, zmenšuje homogenitu odlitku;
- brzdí rozpad cementitu;
- nutný z hlediska nukleace (do 0,04 %);
- nepříznivý vliv síry lze kompenzovat zvýšením obsahu manganu.

P – fosfor

- zvyšuje křehkost;
- zhoršuje obrobitelnost a houževnatost;
- výrazně segreguje;
- tvoří fosfidické sít'oví (0,8 %);
- zlepšuje zabíhavost (do 1 %). [4, 9, 10, 11, 16]

Pozn.: přítomnost křemíku, ale i fosforu v litině posouvá eutektický bod (4,26 % C) doleva – eutektické složení má obsah nižší než 4,26 %. [9]

Z tohoto důvodu se při hodnocení litin musí brát v úvahu současný vliv těchto prvků a **sledovat tzv. ekvivalentní uhlík (uhlíkový ekvivalent) - C_E a stupeň eutektičnosti**. Uhlíkový ekvivalent a stupeň eutektičnosti je vypočítán v praktické části.

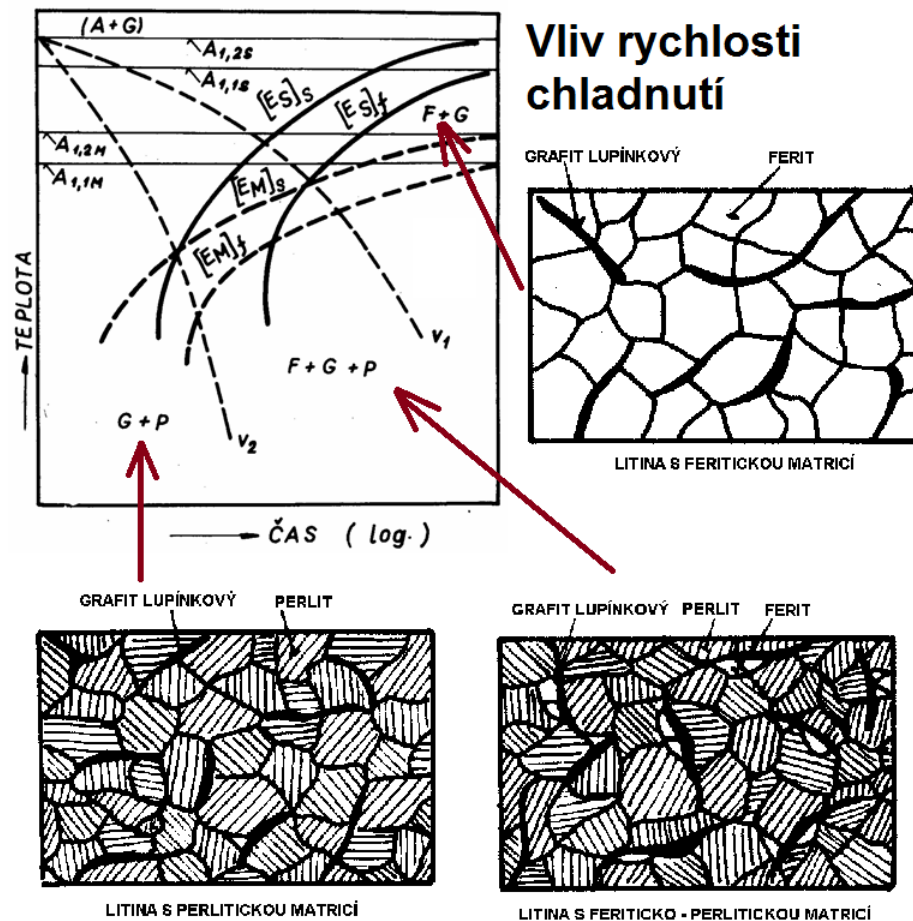
Vliv rychlosti chladnutí

Dříve než bude popsána eutektoidní přeměna austenitu (mechanismus ochlazování austenitu), je vhodné se zmínit o důležité součásti struktury litiny, a to je **základní kovová hmota – matrice**. Dle toho, za jakých podmínek proběhne transformace, může být matrice:

- **feritická;**
- **feriticko-perlitická (perliticko-feritická);**
- **perlitická.**

Za určitých podmínek např. tepelným zpracováním je i **martenzitická** či **bainitická**. [9, 11]

Při ochlazování litiny z eutektické teploty je přeměna austenitu (při eutektoidní teplotě) závislá na rychlosti ochlazování. Na obrázku 2 je pro jednoduchost zobrazen kinetický diagram eutektoidní transformace litin Fe-C-Si.



Obr. 2: Diagram eutektoidní transformace litin Fe-C-Si (upraveno) [14]

$A_{1,2S} - A_{1,1S}$ teplotní interval tvorby stabilního eutektoidu

$A_{1,2M} - A_{1,1M}$ teplotní interval tvorby metastabilního eutektoidu

$[E_S]_s, [E_S]_f$ začátek a konec vzniku stabilního eutektoidu – **feritu**

$[E_M]_s, [E_M]_f$ začátek a konec vzniku metastabilního eutektoidu – **perlitu**

Z diagramu vyplývá, že při vyšších rychlostech ochlazování (vyšší než v_2 protínající oblast $[E_M]_s$) se austenit přemění na metastabilní eutektoid – **perlit**. Výsledkem je litina s grafitem, jejíž **matrice je čistě perlitická**. Naopak pokud ochlazujeme pomalu (nižší rychlost než v_1 , které neprotínají oblast $[E_M]_s$), dochází k přeměně austenitu na stabilní eutektoid – **téměř čistý ferit**. Struktura litiny má **čistě feritickou matici**. Mezi rychlostmi v_2 a v_1 se austenit začíná na křivce $[E_S]_s$ přeměňovat na stabilní eutektoid – ferit a při poklesu teploty na křivku $[E_M]_s$ pokračuje tato přeměna austenitu tvorbou metastabilního eutektoidu – perlitu. Přeměna se ukončí na křivce $[E_M]_f$. Výsledkem je **perlit a ferit**. Litina má **feriticko-perlitickou matici**, ve které je uložen grafit.

Vliv tepelného zpracování

Pro dosažení vysokých mechanických hodnot je nutné tepelné zpracování, díky němuž dochází k transformaci perlitu a feritu na další strukturální složky jako **martenzit, bainit, austenit atd.** [11]

Např. povrchovým kalením diodovým laserem či nitridováním lze zajistit vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení.

Pro povrchové kalení litiny s lupínkovým grafitem má být výchozí struktura **perlitická s podílem feritu do 15 % bez ledeburitického cementitu, podíl ternárního fosfidického eutektika minimální a lupínky grafitu jemně rovnoměrně rozložené.** [10]

Základní předpoklad, který zajistí maximální tvrdost při povrchovém kalení diodovým laserem je právě **perlitická matrice s obsahem kolem 0,8 % uhlíku** – podobně jako při cementované vrstvě. Takto je dosažena **velmi vysoká tvrdost nad 65 HRC**. **V případě litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem se dosahuje hodnoty 800 HV - 900 HV (64 – 67 HRC).** [7, 26]

V případě nitridování se dosahuje tvrdosti až **900 HV**. K tomu jsou vhodné litiny s lupínkovým grafitem (2,5 až 2,8) % C, (1 až 2,5) % Si, (0,3 až 0,7) % Mn, (1,2 až 1,5) % Cr, (0,8 až 1,2) % Al, (0,2 až 0,4) % Mo. Podmínkou je malé množství jemně vyloučeného grafitu, což zajistí malý obsah C + Si, avšak grafitizační vliv uhlíku je vyvážen stabilizačním účinkem chromu. [9]

1.1.2 Strukturní složky grafitických litin

Grafitické litiny mají strukturu velmi různorodou. Vlastnosti těchto litin ovlivňuje: **tvár, velikost, množství a rozložení grafitu, ale i základní kovová hmota**. Je nutné strukturu litiny posuzovat komplexně. Zhodnocení strukturních součástí popisuje norma ČSN 42 0461. [9, 11]

Grafit – elementární uhlík krystalující v hexagonální soustavě; je výsledkem eutektické přeměny v podmínkách stabilní rovnováhy. Zůstává ve struktuře litiny bez ohledu na to, zda její další přeměny probíhají dle metastabilní či stabilní rovnováhy. Tvar a rozložení grafitu ovlivňuje celistvost základní kovové hmoty a **má zásadní vliv na mechanické vlastnosti**. Zvětšuje nosný průřez odlitků a tím **snižuje mechanické vlastnosti součástí, působí vrubovým účinkem** a tím dochází k nerovnoměrnému rozložení napjatosti v celém průřezu odlitku. Grafit vykazuje v porovnání s kovovou maticí litiny **téměř zanedbatelnou pevnost**. [9, 11]

Důležitá je morfologie grafitu – jeho tvar. Za obvyklých podmínek krystalizace dochází k vyloučení grafitu ve formě lupínků. Avšak **po přidání určitého množství tzv. modifikátoru do taveniny způsobí vyloučení jiného tvaru grafitu než lupínkového** a tak může vzniknout celá řada morfologických (tvarových) variant, které vytvářejí plynulý přechod od lupínkového grafitu až po grafit zrnitý (globulární resp. kuličkový). [9, 11]

V litině se objevují i další strukturní součásti: **ferit, perlit, cementit, steadit** či nerovnovážné strukturní složky: **martenzit, bainit, transformovaný ledeburit** nebo některé **vměstky**. [9, 11, 14]

Ferit – tuhý roztok uhlíku a křemíku v železe α ; ve struktuře **snižuje tvrdost, odolnost vůči opotřebení, pevnost v tahu**, ale zároveň **zvyšuje vrubovou houževnatost**. Je **měkký, tvárný a dobře obrobitelný**. [9, 16]

Perlit – eutektoid vzniklý rozpadem austenitu podle metastabilního systému; u litin se vyskytuje v lamelárním stavu. **Mechanické vlastnosti** (tvrdost, mez pevnosti v tahu) **se zvyšují s větším množstvím perlitu, avšak na úkor tvárnosti a obrobitelnosti litiny**. **S vyšším obsahem perlitu roste i odolnost proti opotřebení a zvyšuje se tvrdost litiny**.

[9, 10, 14] Z výše uvedeného vyplývá, že perlitická matrice litiny je velmi žádoucí a poskytuje ty nejlepší předpoklady, aby výsledná struktura po tepelném zpracování (povrchové kalení či nitridování litiny) byla co nejtvrději a měla vysokou odolnost proti opotřebení.

Cementit – jeho vznik je zapříčiněn rozpadem ledeburitu (fázová směs složená z austenitu a cementitu). V litině je nežádoucí, protože **se vyznačuje tvrdostí a křehkostí, horší obrobitelností a téměř žádnou tvárností.** [9]

Steadit – ternární fosfidické eutektikum, směs karbidu železa a fosfidu železa – je další **velmi tvrdá strukturní součást litiny**, která má tvar „pavučinek“. Toto nepříznivé ternární fosfidické eutektikum vzniká při vyšším obsahu fosforu (cca 0,3 %). Vyskytuje se po hranicích eutektickým buněk, kde dochází vlivem odměšení k nahromadění karbidotvorných prvků a fosforu. Teplota tání steaditu je nízká, okolo 950 °C. [9] **Zvyšuje tvrdost, odolnost pro opotřebení, křehkost, zlepšuje zabíhavost a zhoršuje obrobitelnost.** [10, 14, 16]

Martenzit – je definován jako nerovnovážený přesycený tuhý roztok uhlíku v železe α . Vzniká při rychlém odvodu tepla např. olejem, vodou či u povrchového kalení laserem tzv. samoochlazovacím efektem materiálu z teplot stabilní existence austenitu do oblasti teplot, kde je potlačena difúze intersticiálních a substitučních atomů bezdifúzní přeměnou austenitu (střihovou přeměnou). Produktem této přeměny může být dvojčatový martenzit – desková morfologie či dislokační martenzit – jehlicové morfologie s jemně nebo hrubě vyloučenými martenzitickými jehlicemi. [11] **Vyznačuje se vysokou tvrdostí, ale pevnost je nižší.**

Bainit – nelamelární feriticko-karbidická směs; vzniká při teplotách cca 550 °C až po Ms. Během této bainitické přeměny dochází ke změně plošně středěné mřížky železa γ v prostorově středěnou mřížku α (změna v rozložení uhlíku a vznik karbidické fáze). [11] Rychlost této přeměny je nižší než při martenzitické transformaci. Struktura této nelamelární feriticko-karbidické směsi se výrazně mění s teplotou přeměny i chemickým složením austenitu. Vzniká tzv. horní nebo dolní bainit. Horní bainit nad teplotou 350 °C a dolní bainit v oblasti 350 °C až Ms. U dolního bainitu se vlastnosti spíše blíží martenzitu

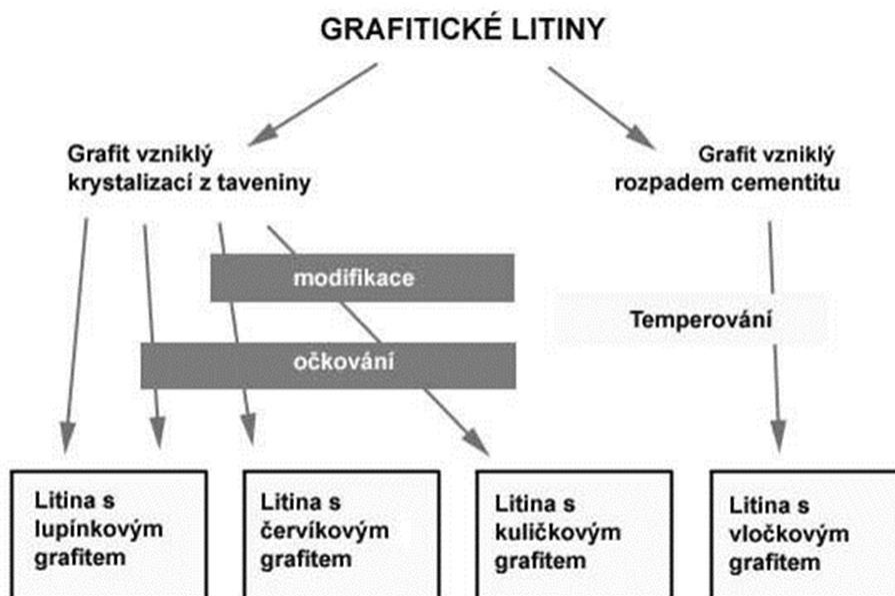
(je jemnější než horní bainit). **Vysoká pevnost a tvrdost. Tvrdost bainitu je nižší než u martenzitu, ale vyšší než u perlitu.**

Transformovaný ledeburit (transformované eutektikum vzniklé v metastabilní soustavě Fe-Fe₃C) – zákalka, vzniká v místech s rychlým odvodem tepla [14]

Vměstky – vyskytují se v podobě sirníků (FeS či MnS), přebytek síry stabilizuje cementit [11, 14]

1.1.3 Přehled jednotlivých druhů grafitických litin

Na obrázku 3 je zobrazeno základní rozdělení grafitických litin.



Obr. 3: Rozdělení grafitických litin [14]

Litina s lupínkovým grafitem

Litina s lupínkovým grafitem (LLG), dříve označovaná jako **šedá litina**, je „slitina železa s uhlíkem, křemíkem a dalšími doprovodnými prvky, v níž množství uhlíku přesahuje

maximální hodnotu rozpustnosti v austenitu (2,14% – bez vlivu jiných prvků), přičemž převážná část uhlíku je vyloučena jako lupínkový grafit.“ [30 s. 1]

LLG je celosvětově nejrozšířenější slitina železa. Jedná se o cenově výhodný konstrukční materiál, který vyniká velmi dobrými technologickými vlastnosti. Odlitky se nejčastěji používají ke stavbě strojů [9, 11]

Mezi hlavní přednosti patří **pořizovací cena, vysoká pevnost v tlaku, útlum rázů či chvění**. Její nevýhodou je takřka **nulová tažnost**, která je nepříznivě ovlivněná přítomností grafitových lamel. Podíl a velikost grafitu se zvětšují s rostoucím uhlíkovým ekvivalentem. Nejnepříznivější účinek na mechanické vlastnosti má grafit ve tvaru lupínků (v porovnání se všemi tvary grafitů). Avšak grafit (částice působí jako vnitřní vruby) uděluje litině i některé cenné vlastnosti jako např. **malá citlivost k vnějším vrubům blížící se nule, vysoká dynamická houževnatost** (snižuje špičková napětí) a **velmi dobrá pevnost v tlaku, která je 3krát až 4krát větší než pevnost v tahu**. Při dynamickém namáhání je srovnatelným materiálem s ocelí. Volný cementit není v litině žádoucí, zvyšuje křehkost, tvrdost a snižuje obrobitelnost. [4, 9, 11]

Struktura základní hmoty tepelně nezpracované litiny s lupínkovým grafitem může být **perlitická, feritická či feriticko-perlitická**.

Aby byla dosažena velká povrchová tvrdost litin po tepelném zpracování, budou dále uvedeny jen takové matrice, které se hodí pro tepelné zpracování – především kalení.

Perlitická matrice vzniká, jestliže je obsah grafitizačních přísad v dokonalém souladu s rychlostí chladnutí. Litina vykazuje vyšší mechanické vlastnosti (v porovnání s feritickou maticí), zejména pevnost a tvrdost (klesá hrubost a množství grafitu, případně se zjemňuje perlit). **Tvrdost perlitické matrice tepelně nezpracované litiny dosahuje cca 220 HB (feritická matrice cca 120 HB)**. Litina s perlitickou maticí se řadí mezi hodnotné konstrukční materiály. Většina odlitků se vyrábí z perlitické litiny s lupínkovým grafitem o podeutektickém složení. Litiny nadeutektického nebo eutektického složení se používají minimálně – vyznačují se především dobrými kluznými vlastnosti, ty podporují především dlouhé lupínky grafitu. **Nejpříznivější mechanické vlastnosti vykazuje litina s jemně a rovnoměrně vyloučeným lupínkovým grafitem typu A s jemnou perlitickou**

strukturou. Čím je eutektické (licí) zrn jemnější, tím jsou lepší mechanické vlastnosti – především pevnost. Eutektické zrn má také vliv na velikosti vyloučenin grafitu a na průběh krystalizace – na těchto činitelích závisí pevnost litiny. [4, 11]



Obr. 4: Perlitická litina s lupínkovým grafitem (200x) [11]

Modul pružnosti litiny se pohybuje **od 60 do 160 [GPa]**. Pro zlepšení mechanických vlastností litiny se **doporučuje litinu očkovat** – získá se tím větší množství menších lupínků grafitu. [9, 10]

Litina s kuličkovým grafitem

Litina s kuličkovým grafitem (LKG), dříve označovaná jako **tvárná litina**, je „slitina železa s uhlíkem, křemíkem a dalšími doprovodnými prvky, v níž množství uhlíku přesahuje maximální hodnotu rozpustnosti v austenitu (2,14% – bez vlivu jiných prvků), přičemž převážná část uhlíku je vyloučena jako zrnitý grafit.“ [30 s. 1]

Tvárná litina se svojí povahou blíží uhlíkové oceli, v jejíž struktuře je volně vyloučen grafit ve formě globulí (kuliček – zrn). U šedé litiny s lupínkovým grafitem se mechanické vlastnosti řídí nejen tvarem, rozložením a množstvím grafitu, ale i stavem základní matrice. Vlastnosti tvárné litiny **lze měnit pouze změnou základní matrice**. Vliv velikosti a počtu grafitových zrn ve struktuře má na vlastnosti tvárné litiny relativně malý vliv. [13]

Litina s kuličkovým grafitem má **většinu mechanických vlastností lepších** než litina s lupínkovým grafitem, ale **zároveň ztrácí některé cenné vlastnosti**, jako je malá citlivost k vnějším vrubům, schopnost útlumu, dynamická houževnatost a podobně. [13]

Mezi hlavní přednosti, v porovnání s LLG s perlitickou maticí, patří **vyšší pevnost, modul pružnosti a tvrdost, nepatrně vyšší tažnost (2 %)**. Jedná se o **nejkvalitnější litinu** [14]

Aby mohlo dojít k vyloučení grafitu v litině ve tvaru kuliček, používají se modifikátory na bázi Ni-Mg, Al-Mg, Cu-Mg. Po modifikaci následuje očkování ferossiliciem, který slouží k eliminaci stabilizačního účinku hořčíku. [9]

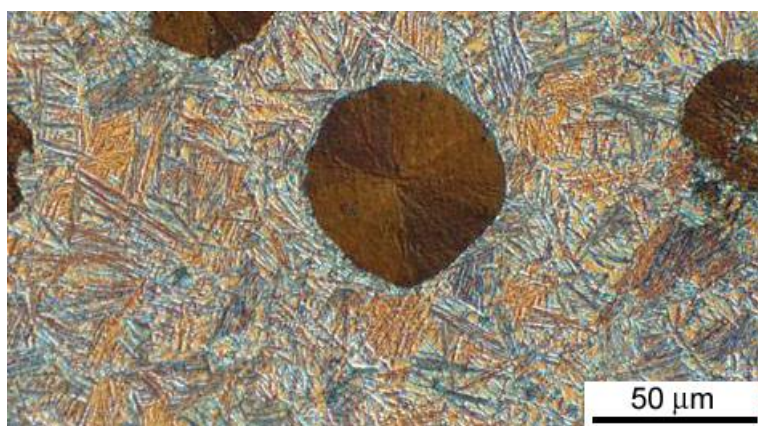
Struktura základní hmoty tepelně nezpracované litiny s kuličkovým grafitem může být **perlitická, feritická, feriticko-perlitická či perliticko-feritická**. [13]

Všeobecně čistě perlitická matrice se nedá bez přísady některých prvků v širším rozsahu tlouštěk stěn odlitku získat. Dochází-li ke zvyšování obsahu manganu a zároveň snižuje-li se obsah křemíku pro získání čistě perlitické struktury, je vysoká pravděpodobnost, že se v slabších stěnách odlitků současně vyloučí karbidy – cementit. Úplně perlitickou maticí bez volných karbidů lze získat přísadou prvků, jako jsou **měď a cín**. Tyto prvky brzdí přímou i nepřímou feritizací. Tvrdost perlitické matrice dosahuje až **280 HB**. Pevnost v tahu až **600 MPa**. Modul pružnosti litiny se pohybuje **od 160 do 180 [GPa]** [9, 13]



Obr. 5: Perlitická litina s kuličkovým grafitem (200x) [14]

Zvýšení mechanických vlastností LKG lze docílit speciálními technologiemi tepelného zpracování. Jedná se o izotermicky kalenou tvárnou litinu na bainitickou strukturu - **ADI způsob** nebo izotermicky kalenou karbidickou tvárnou litinu – **CADI způsob**. ADI se vyznačuje vysokou flexibilitou svých vlastností, vysokým poměrem mechanických vlastností ke své hmotnosti, dobrou obrobitelností a odolností proti opotřebení, vysokou pevností při zachování dobré houževnatosti a velmi dobrými únavovými vlastnostmi. Jeho způsob výroby je shodný s výrobou normální tvárné litiny. Své vlastnosti pak získává izotermickým tepelným zpracováním. [13]



Obr. 6: Izotermicky kalená tvárná litina na bainitickou strukturu (ADI způsob)

CADI – zde je vyvolána karbidická struktura např. legováním. Dosahuje vynikající odolnost proti opotřebení při dobré houževnatosti litiny. [13]

1.2 Povrchové kalení litin

Povrchové kalení litiny **není jednoduchým procesem** kvůli heterogenitě a hrubozrnnosti litého materiálu **především u hmotných odlitků**. Důležitá je volba teploty kalení, protože má výrazný vliv na strukturu a vlastnosti. Podmínkou kalitelnosti litiny je obsah uhlíku, který musí být minimálně 0,22 %. [7, 23]

Před samotným povrchovým kalením je nezbytné, aby litina měla perlitickou matici, která zajistí maximální vytvrzení.

Při povrchovém kalení je velmi rychle ohřáta povrchová vrstva na austenitizační teplotu. Následuje velmi krátká výdrž na teplotě a ihned prudké ochlazení (voda, olej, tepelná vodivost materiálu atd.). Teplota ohřevu je vyšší než u klasického kalení. Vše také záleží na způsobu ohřevu. Podle způsobu ohřevu dochází k zakalení povrchu dílce do určité hloubky. Hlavním účelem je získání **vyšší otěruvzdornosti a tvrdosti zakaleného povrchu při zachování původních vlastností jádra** – v případě litiny útlum rázů či chvění od obrábění, vysoká odolnost v tlaku atd.

Vysoká otěruvzdornost a povrchová tvrdost jsou důležité vlastnosti při vzájemném pohybu dvou součástí (např. kluzný pohyb). Zásadní vliv má právě povrch materiálu.[3]

Při tepelném zpracování se zvyšují teploty fázových přeměn. Ve většině případů neproběhne ani homogenizace austenitu – nedochází k rozpadu všech karbidů. Dále je třeba se zmínit o vlivu různých struktur povrchu a jádra. V povrchově zakalené vrstvě vzniká vždy **vnitřní tlakové napětí**, které může dosahovat 50 až 60 MPa. Toto napětí zapříčiňuje martenzit, protože má větší objem než ferit. Důsledkem je značný vzrůst únavové pevnosti, který brání vzniku trhlin při tahovém namáhání povrchu. **Avšak v litině může napětí lehce vyvolat vznik povrchových trhlin – malá pevnost grafitu.** [2] **To ale neplatí u kalení litin laserem, kde náchylnost ke vzniku těchto povrchových trhlin je prakticky nulová.**

Nárůst zbytkového austenitu dokáže zmenšit výslednou tvrdost zakalené litiny. Oproti tomu ale dochází k rozpouštění měkkých lupínků či grafitických globulí a jejich přeměnu na martenzit nebo ledeburit, část uhlíku obohacuje nejbližší okolí a tím stabilizuje

právě austenit. [7] **Vzniká kompozitní materiál s neobyčejnými vlastnostmi:** velmi tvrdý díky martenzitické struktuře, přitom s dobrými kluznými vlastnostmi přítomného grafitu, podporovaný perlitickou strukturou v přechodové vrstvě a houževnatý díky podílu zbytkového austenitu. Litina je materiál cenově výhodný – bez drahých legur a je zpracovaný **relativně levným povrchovým kalením.**

Hloubka povrchového kalení se určuje **metalograficky** či **z průběhu měření mikrotvrdosti.**

Existuje více druhů povrchového kalení, a to podle způsobu ohřevu na austenitizační teplotu či druhu ochlazení – **indukční, plamenem, ponorné, elektrolytické, laserové, laserové legování povrchu, elektronovým paprskem, plazmou a další.**

V této kapitole byl kladen důraz na povrchové kalení indukcí a na relativně moderní metody povrchového kalení energetickými svazky – laserové a elektronovým paprskem.

1.2.1 Povrchové kalení litin diodovým laserem

Při laserovém kalení dochází k rychlému ohřevu, výdrži na teplotě a prudkému ochlazení vlivem tepelné vodivosti. Rychlým ohřevem se rozumí **více jak 1000 °C/s.** Teplota ohřevu je nastavitelná – většinou **mezi 900 až 1400 °C** a monitoruje se pomocí pyrometru nebo termokamery. Pyrometr či termokamera udržuje teplotu s přesností několika stupňů. Po dosažení kalící teploty, která je mnohem vyšší než u běžného tepelného zpracování, se začne laserový paprsek pohybovat a zároveň plynule zahřívá povrch ve směru posuvu. Tím dochází k austenitizaci (pomalejší než u ocelí). Jakmile se laserový paprsek pohybuje dále, okolní materiál velmi rychle odvede teplo. Díky rychlému ochlazení se nemůže mřížka kovu vrátit do své výchozí formy a **vzniká martenzit (ledeburit).** Tím dochází ke zvýšení tvrdosti povrchu při současném zachování houževnatosti jádra. Výsledkem je poměrně rovnoměrná zakalená vrstva i povrchová tvrdost, samozřejmě s ohledem na homogenitu struktury.

Kalení litin diodovým laserem se provádí prostřednictvím průmyslových robotů. Takto se dosáhne **vysoké přesnosti a spolehlivosti** operace. Daný proces je možno řídit **teplotou či výkonem a rychlostí pohybu paprsku laseru**.

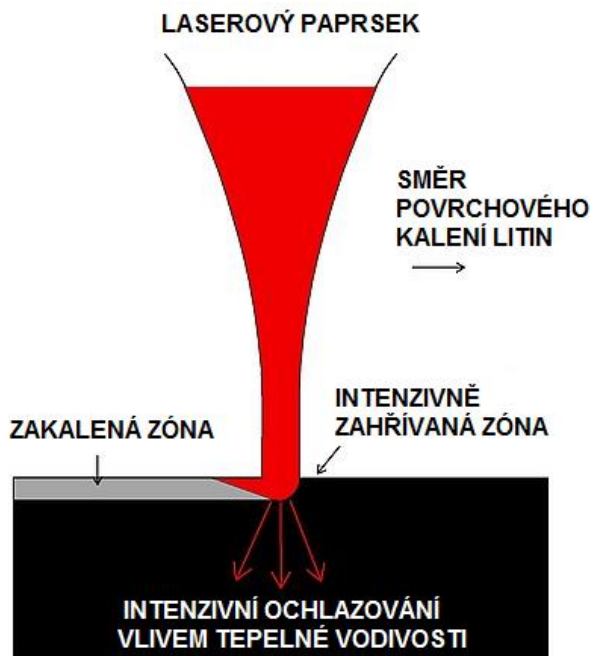
Výsledek povrchového kalení závisí **na teplotě či výkonu, rychlosti pohybu paprsku laseru či jiných faktorů – typu litiny, tepelné vodivosti litiny, velikost ozářené plochy laserem, hmoty odlitku, podílu uhlíku v základní matrici atd. a nelze se řídit běžnými diagramy pro tepelné zpracování**.

Množství a forma výskytu grafitu se významně uplatní na tepelné vodivosti materiálu, což má pro průběh tepelného zpracování diodovým laserem velký význam. Různé typy litin mají jiné součinitele tepelné vodivosti a při užití totožných parametrů tepelného zpracování laserem je dosaženo rozdílné hloubky vytvrzení. [18]

Při velmi rychlých ohřevech se uplatní pouze uhlík obsažený v základní matrici. Grafít zůstane v zakalené struktuře zachován. Tím vykazuje spolu se základní martenzitickou strukturou **velmi příznivé tribologické vlastnosti**. [18]

Kalením litin lze dosáhnout zpravidla hloubky **do 2mm**. Čím větší má být hloubka při kalení diodovým laserem, tím větší musí být okolní objem, který dokáže rychle odvést teplo. Ke kalení se používá skenerové optiky. Pohybuje se laserovým paprskem s kruhovým ohniskem velmi rychle zleva doprava. Na litině takto vznikne linie s téměř rovnoměrným výkonem. Takto lze vytvořit pruhy kalení až o **šířce 60 mm**. [22]

Na obrázku 7 je zobrazen princip povrchového kalení litiny laserem.



Obr. 7: Princip povrchového kalení diodovým laserem - upraveno[21]

Nejtvrdší povrchy se dosahují **u litin s lupínkovým a kuličkovým grafitem s perlitickou matricí**. V jednotkách HRC jsou laserem dosahovány tvrdosti mezi 60 a 66 HRC. Pokud proběhne přetavení povrchu litiny, dojde k rozpuštění grafitu, v podstatě cementace podpovrchové vrstvy za vzniku ledeburitu a martenzitu. Což se nazývá bílá ledeburitická litina. Zde **tvrdost dosahuje hranice 70 HRC**. Vysoká rychlost ohřevu v řádech 1000 °C/s omezuje hrubnutí zrna a zpevňujících precipitátů - velikost martenzitických struktur je velmi nízká. **Kalení indukcí či plamenem lze ve všech případech úspěšně nahradit laserovým kalením. Mezi jedinou výjimku patří prokalení litin do větších hloubek než 2mm.** [8]

Společnost Mapex intenzivně pracuje na unikátním hybridním pracovišti kombinující laserový paprsek s indukčním ohřevem, kde by bylo možné dosahovat prokalení **až 6mm**. Tento požadavek vznikl na základě dosažení vysoké odolnosti vůči otěru společně s přenášením velkého měrného zatížení.

Povrchové kalení laserem si zachovává důležitost především **svojí jednoduchostí a cenou**. Laserové kalení litin také úspěšně nahrazuje nitridaci a cementaci a tím snižuje vzniklé náklady. [7, 21]

Výhody laserového kalení litin:

- jednoduchost technologické operace;
- snadná automatizace procesu;
- on-line řízení procesní teploty;
- ekologičnost procesu;
- energetická účinnost;
- není třeba kalící médium;
- lokální povrchové kalení v přesně požadovaných místech při zachování;
- nedochází k „vypálení grafitu“ a povrch si zachovává své kluzné vlastnosti;
- přídavky na opracování jsou minimální, někdy nejsou potřeba;
- menší náchylnost ke vzniku povrchových trhlin;
- nízké teplotní deformace;
- vysoká procesní rychlost a efektivita;
- kalení na velmi těžko přístupných místech;
- nízká oxidace povrchu. [7, 23]

Nevýhody laserového kalení litin:

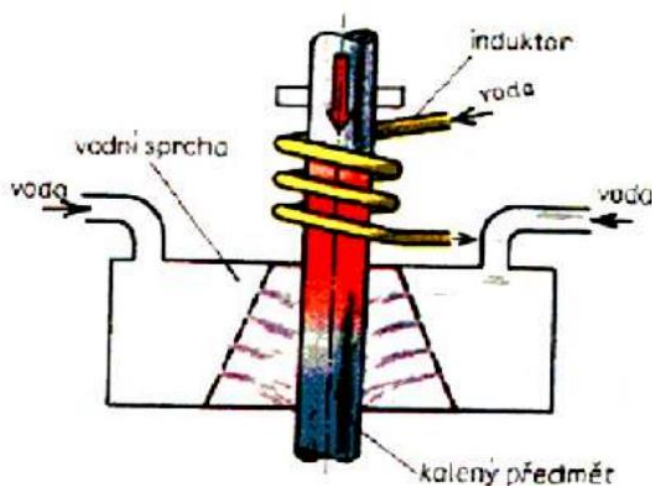
- vysoké investiční náklady;
- nemožnost vyšší hloubky prokalení než 2 mm;
- kvůli špatné tepelné vodivosti probíhá austenitizace pomalu (v porovnání s ocelí). [7]

1.2.2 Povrchové kalení litin indukci

Princip indukčního ohřevu spočívá v použití indukovaných proudů střední a vysoké frekvence (pomocí induktoru). Vlivem elektromagnetické indukce vznikají v povrchové vrstvě vířivé proudy o stejné frekvenci a tím se povrch zahřívá. Dochází k velmi rychlému ohřevu povrchu, po kterém následuje prudké ochlazení v lázni či vodní sprchou. [2, 5] Zde je třeba poznamenat, že **oproti kalení laserem je indukční ohřev pomalejší** – u vysokofrekvenčního ohřevu trvá i několik vteřin a tím může dojít k rozpuštění grafitu v povrchově zakalené vrstvě.

Energie magnetického pole se především soustřeďuje ve feromagnetickém materiálu. **Cementit, martenzit a ferit** jsou feromagnetické do teploty Curiova bodu (ferit 760 °C). Nad Curiovým bodem se silně zpomalí ohřev, jelikož se energie pole začne rozptylovat do okolí. Prudce se zvýší hloubka průniku do litiny. **Austenit a grafit** nejsou feromagnetické. Ohřívají se mnohem pomaleji, ale do mnohem větší hloubky. **Ohřev litiny je pomalejší než u oceli.** [2]

Indukcí lze ohřívát libovolně elektricky vodivý materiál – kov (např. litina). Mezera mezi induktorem a kaleným předmětem musí být vždy stejná. Jako zdrojů střídavého proudu se používá středofrekvenčních generátorů do 15000 Hz nebo elektronkových generátorů k hodnotám 500 kHz. **Tloušťka zakalené vrstvy závisí na použité frekvenci.** Nejmenší tloušťka u velmi vysoké frekvence dosahuje **1mm.** Při použití nižších frekvencí až **10 mm.** [2, 5]



Obr. 8: Princip povrchového kalení indukcí [2]

Ohřev:

- jednorázový;
- postupný.

Ochlazení:

- sprchové;

- ponořením.

Výhody indukčního kalení litin:

- vhodné pro velké série;
- možnost automatizace;
- velmi dobře regulovatelné;
- malé okujení vlivem rychlého ohřevu – zpravidla nevyžaduje další úpravy;
- vysoká procesní rychlost a efektivita;
- existence přenosných zařízení na indukční kalení.

Nevýhody indukčního kalení litin:

- vysoké investiční náklady;
- dochází k „vypalování grafitu“ v porovnání s laserem;
- náchylnost ke vzniku povrchových trhlin;
- u vodní sprchy či lázně dochází k největšímu možnému pnutí, po kterém musí následovat popuštění;
- rovnoměrnost pohybu a konstantní vzdálenost induktoru od povrchu;
- konstrukce induktoru podle tvaru součástky. [2, 5, 8]

1.2.3 Povrchové kalení litin elektronovým paprskem

Technologie povrchového kalení elektronovým paprskem využívá stejně jako u laserového kalení rychlého ohřátí povrchu – 10^3 až 10^4 K·s⁻¹, výdrži na teplotě – od desetin až po jednotky sekund a prudkého ochlazení vlivem tepelné vodivosti materiálu. Tím dochází k samozakalení a vzniku martenzitické struktury s minimální velikostí tepelně ovlivněné oblasti. Prohřátí základního materiálu je **do 2 mm**. [19] Důležité je, aby materiál byl dostatečně tepelně vodivý.

Množství odvedeného tepla z tepelně ovlivňované zóny má přímý dopad na tloušťku zakalené vrstvy a závisí na celkovém objemu součástí. V případě nedostatečně rychlého odvodu energie dochází k prohřívání součásti, což má za následek snížení

teplotního gradientu mezi povrchem zakalené vrstvy a jádrem - původní strukturou litiny. Rychlost ochlazování poté nedosahuje potřebné kritické hodnoty pro vznik martenzitu (ledeburitu). [19]

Tloušťka zakaleného povrchu je také závislá na úhlu dopadu paprsku na povrch součásti. Například při úhlu dopadu 60° činí energetické ztráty v ovlivňované zóně bez dalších opatření přibližně 50 %. **Množství ztrátového tepla lze částečně korigovat naklápěním součásti či úpravou ozařovaného pole.** [19] Uplatnění povrchového kalení elektronovým paprskem je např. u kluzných ploch obráběcích strojů.



Obr. 9: Princip povrchového kalení elektronovým paprskem [1]

Výhody a nevýhody povrchového kalení litin elektronovým paprskem jsou podobné jako u laserového kalení. Avšak **proces kalení pomocí elektronového paprsku musí probíhat ve vakuové komoře – což je hlavní nevýhoda.**

1.3 Měření povrchové tvrdosti litiny

Pro měření povrchové tvrdosti hrubozrnných materiálů – především grafitických litin se výhradně používá zkouška tvrdosti podle Brinella. **Avšak pro měření povrchově zakalené vrstvy litiny GJL 250 do maximální hloubky 2 mm není výběr metody zcela jednoznačný.** V jednotlivých podkapitolách bude rozebrána zkouška tvrdosti podle Brinella a ultrazvuková zkouška tvrdosti (UCI).

1.3.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Tato metoda se používá pro měkké a heterogenní materiály **především pro grafitické litiny, ale také pro neželezné kovy.**

Na začátku této podkapitoly je důležité zmínit se o značení tvrdosti. Tvrdost podle Brinella se označuje písmeny **HBS**, kde se jako vnikací těleso používá ocelová kulička nebo **HBW** při použití kuličky z tvrdokovu. **Avšak přednost mají tvrdosti zjištěné pomocí kuličky z tvrdokovu, která se proti ocelové kuličce méně deformuje.** To je zapříčiněno značně vyšším modulem pružnosti tvrdokovu. [27]

Platná norma **ČSN EN ISO 6506-1 - Kovové materiály. Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda** uvádí pouze použití vnikacího tělesa s kuličkou z tvrdokovu (HBW). V normě je psáno, že se nemá zaměňovat s dřívějším značením HB nebo HBS. **Proto níže uvedené údaje byly přednostně brány dle této normy.**

Dále je třeba zmínit skutečnost, že použití ocelové kuličky je pro materiály s tvrdostí **nepřesahující 450 HBS**. Kulička z tvrdokovu se používá pro materiály **s tvrdostí do 650 HBW**. Hodnoty tvrdosti získané použitím kuličky z tvrdokovu a ocelové kuličky se podstatně liší při tvrdostech **nad 350 HBW (HBS)**. [6]

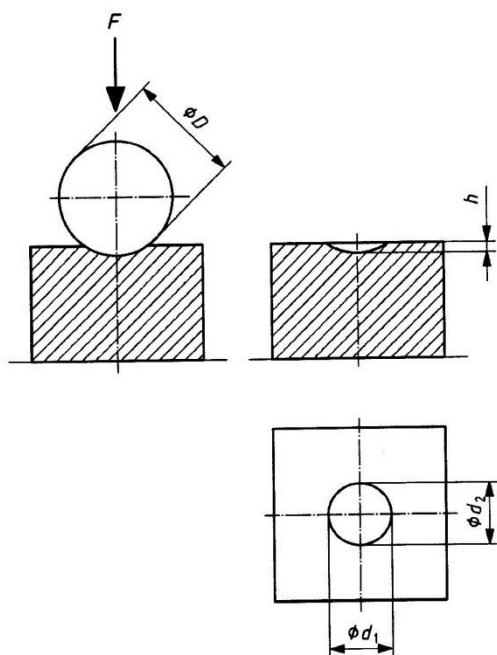
Princip metody

Vnikací těleso – kulička z tvrdokovu se o průměru D zatlačuje do povrchu zkušebního tělesa. Po odlehčení zkušebního zatížení je změřen průměr vtisku d , který zůstane na povrchu. [34]

Předpokládá se, že vtisk má stálý tvar koule. Plocha jeho povrchu je vypočítána ze středního průměru vtisku a průměru kuličky. [34]

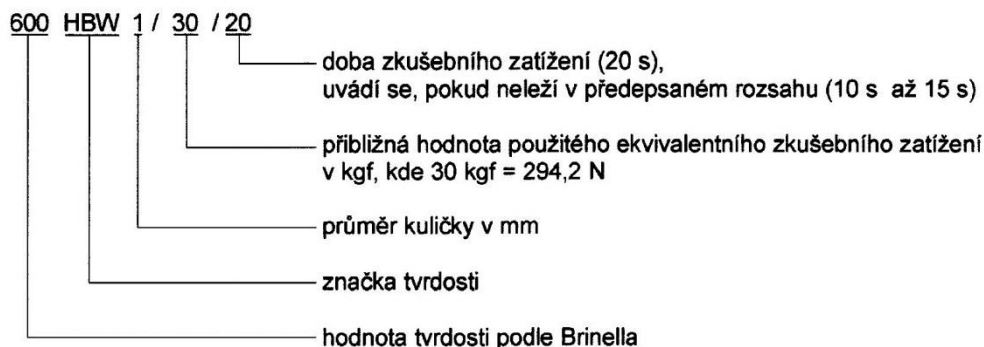
Tab. 1: Značky a zkrácené termíny [34]

| Značka/Zkrácený termín | Význam | Jednotka |
|--|--|-------------------|
| D | Průměr kuličky | mm |
| F | Zkušební zatížení | N |
| d | Střední průměr vtisku $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ | mm |
| d_1, d_2 | Průměry vtisku měřené ve dvou navzájem kolmých směrech | mm |
| h | Hloubka vtisku $h = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{1 - d^2/D^2} \right)$ | mm |
| HBW | Tvrdost podle Brinella = Konstanta $\times \frac{\text{Zkušební zatížení}}{\text{Plocha povrchu vtisku}}$ $\text{HBW} = 0,102 \times \frac{2F}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - d^2/D^2} \right)}$ | |
| $0,102 \times F/D^2$ | poměr zatížení k průměru | N/mm ² |
| POZNÁMKA Konstanta = $0,102 \approx \frac{1}{9,806\,65}$, kde 9,806 65 je převodní faktor z kgf na N. | | |



Obr. 10: Princip zkoušky [34]

Příklad značení tvrdosti podle Brinella (HBW) je na obrázku 11.



POZNÁMKA V dřívějších normách byla tvrdost podle Brinella v případech, kdy se používala ocelová kulička, udávána jako HB nebo HBS.

Obr. 11: Příklad značení tvrdosti podle Brinella (HBW) [34]

Postup měření tvrdosti

1. Zkouška se obvykle provádí při teplotě v mezích 10 až 35 °C, za řízených podmínek při teplotě 23 ± 5 °C.
2. Při zkoušce musí být použito zkušební zatížení odpovídající zkoušenému materiálu a velikosti kuličky.
3. Volba zkušebního zatížení musí být taková, aby se průměr vtisku **nacházel mezi hodnotami 0,24D a 0,6D**.
4. Z důvodu obsazení co největší reprezentativní plochy zkušebního tělesa se musí zvolit co největší průměr zkušební kuličky. **Přednostně se používá kulička o průměru 10 mm, avšak s ohledem na tloušťku zkušebního tělesa.**
5. Zkušební těleso musí být při zkoušce položeno na tuhou podložku. Kontaktní plochy musí být čisté a bez cizích tělísek (olej, nečistoty atd.).
6. Vnikací těleso se zatlačuje do zkoušeného povrchu vzorku zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu, bez otřesů, chvění či silových překmitů. Doba od začátku zatěžování po dosažení úplného zatížení nesmí být kratší než 2 s, avšak nesmí převýšit 8 s. Doba působení zkušební síly je 10 s až 15 s. U některých materiálů mohou být použity delší časy, ty však musí být dodržovány s přesností ± 2 s.

7. Zkušební stroj musí být zabezpečen před otřesy či vibracemi, které by ovlivnily výsledek zkoušek.
8. Nejmenší vzdálenost mezi středy dvou sousedních vtisků **má být minimálně trojnásobek středního průměru vtisku** a vzdálenost středu každého vtisku od okraje zkoušeného materiálu **minimálně 2,5násobek středního průměru vtisku**.
9. Průměr každého vtisku je měřen ve dvou navzájem kolmých směrech. K výpočtu tvrdosti je brán aritmetický průměr dvou údajů.
10. **Pro určení tvrdosti dle Brinella se u zkoušek na rovných plochách musí použít výpočetní tabulky z normy ISO 6506-4.** [6, 34]

Norma ČSN EN ISO 6506-1 dále udává, že **tloušťka zkušebního tělesa musí dosahovat nejméně osminásobku hloubky vtisku**. Dále je psáno, že jmenovitý průměr kuličky záleží na zkoušeném materiálu. U litiny musí být minimálně **2,5 mm, 5 mm nebo 10 mm**. [34]

Tab. 2: Minimální tloušťka zkušebního tělesa ve vztahu k střednímu průměru vtisku - upraveno[34]

Rozměry v milimetrech

| Střední průměr vtisku d | Minimální tloušťka zkušebního tělesa | | | |
|------------------------------|--------------------------------------|-----------|---------|----------|
| | $D = 1$ | $D = 2,5$ | $D = 5$ | $D = 10$ |
| 0,2 | 0,08 | | | |
| 0,3 | 0,18 | | | |
| 0,4 | 0,33 | | | |
| 0,5 | 0,54 | | | |
| 0,6 | 0,80 | 0,29 | | |
| 0,7 | | 0,40 | | |
| 0,8 | | 0,53 | | |
| 0,9 | | 0,67 | | |
| 1,0 | | 0,83 | | |
| 1,1 | | 1,02 | | |
| 1,2 | | 1,23 | 0,58 | |

JMENOVITÝ PRŮMĚR
KULIČKY PRO LITINU

Z tabulky 2 je zřejmé, že tato **metoda není vhodná pro zakalenou vrstvu litiny**. Neboť i při nejmenším průměru kuličky 2,5 mm (pro litinu) a předpokladu nejmenšího středního průměru vtisku (pro $D = 2,5$ mm) musí být minimální tloušťka zkušebního tělesa 0,29 mm. V tomto případě povrchově zakalená vrstva litiny diodovým laserem. Přitom nejmenší naměřená tloušťka zakalené vrstvy litiny diodovým laserem dosahuje v oblasti překryvu hodnoty 0,1 mm – viz praktická část. **Z tohoto důvodu by zřejmě u několika**

vzorků s překryvem došlo k proražení povrchově zakalené vrstvy a tím i k ovlivnění výsledné tvrdosti. Dále je třeba upozornit na skutečnost, že kulička z tvrdokovu je použitelná jen do 650 HBW. Přitom naměřená tvrdost povrchově zakalené litiny s lupínkovým grafitem průměrně dosahuje 800 HV. Je možné, že by se kulička z tvrdokovu deformovala o povrchově zakalenou litinu. Dále je třeba se zmínit, že touto metodou se nedají měřit přímo na místě odlitky dlouhé několik metrů – jako např. lože či stojan. **Proto tato metoda nebyla použita pro měření povrchově zakalené vrstvy litiny.**

1.3.2 Ultrazvuková zkouška tvrdosti – UCI

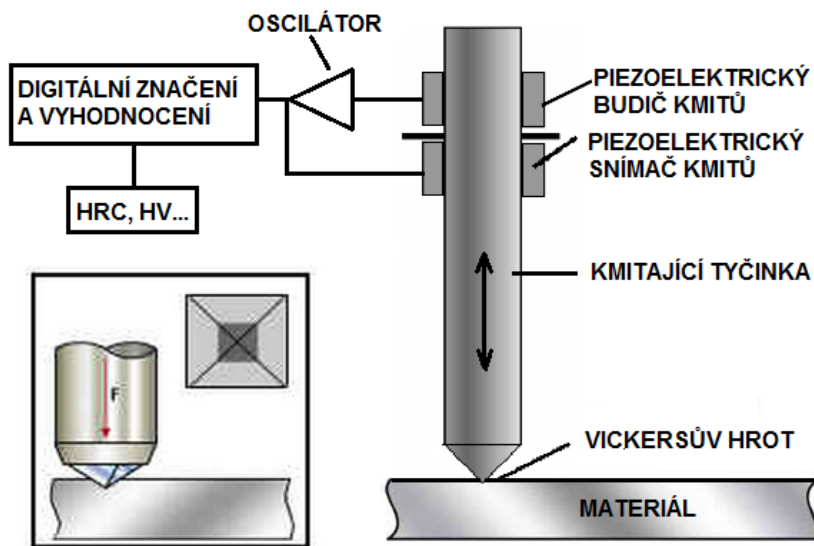
U klasických tvrdoměrů jako Brinell, Rockwell, Vickers se musí zkoušený vzorek donést k přístroji – ne vždy je to možné. Přenosné tvrdoměry byly navrženy tak, aby se daly použít přímo na pracovišti. [24] **Tato vlastnost je vhodná především u těžkých dlouhých odlitků, u kterých se povrchově kalí kluzné plochy kvůli otěruvzdornosti (tvrdosti).**

V této části byl kladen důraz na přenosný **ultrazvukový tvrdoměr Krautkramer Branson MIC 10** (použitý při měření), který pracuje na principu změny frekvence kmitající tyčinky s Vickersovým diamantovým hrotem. Změna frekvence nastane po vniknutí diamantu do testovaného materiálu. Ta je vyhodnocena a elektronicky převedena dle konverzní tabulky na tvrdost v HBW, HRC, HV atd. Konverzní tabulky do požadované stupnice tvrdosti jsou uloženy v paměti tohoto přístroje. Výsledná hodnota tvrdosti se zobrazí na LCD displeji. [24]

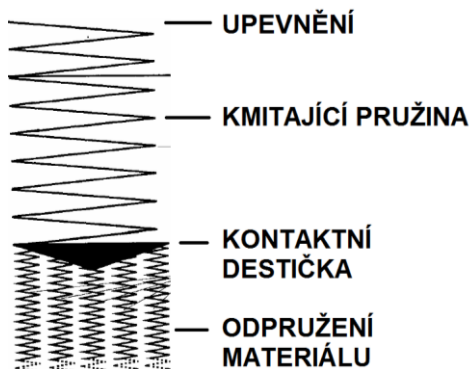
U standardních metod pro zjištění tvrdosti dle Brinella či Vickerse jsou úhlopříčky vtisku odečteny opticky. Avšak **u ultrazvukových tvrdoměrů je určena elektronicky plocha vtisku měřením změny ultrazvukové frekvence.** [24]

UCI sonda (Ultrasonic Contact Impedance) je složena z Vickersova diamantového hrotu ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou o vrcholovém úhlu 136°, který je připojen na konec kovové tyčinky (viz obrázek 12) Pomocí piezoelektrických měničů (přeměňuje mechanické kmity na elektrické a naopak) je tyčinka rozkmitána do podélného kmitání ve frekvenci přibližně 70 kHz. Pro představu je možné

tyčinku nahradit za velkou pružinu, jejíž jeden konec s diamantem kmitá ve frekvenci 70 kHz a druhý konec je upevněn. Testovaný materiál, který je v kontaktu s diamantem se chová jako soustava malých pružin orientovaných kolmo k povrchu (viz obrázek 13). Dochází ke stlačení jedné pružiny diamantovým hrotem a tím k vytvoření vtisku do materiálu. Pružina – testovaný materiál je akusticky spojen s velkou pružinou – s kovovou tyčinkou s diamantovým hrotem. Díky tomu dochází ke změně frekvence kmitu velké pružiny. [24]



Obr. 12: Schématický obrázek UCI sondy – upraveno [24]



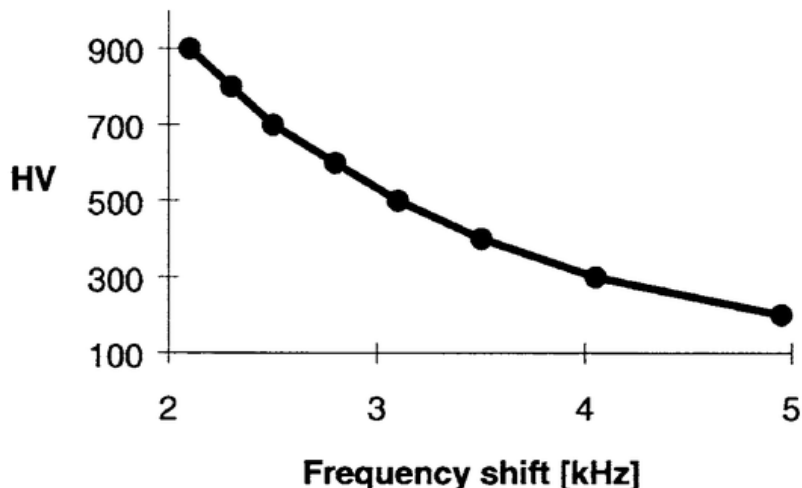
Obr. 13: UCI princip jako myšlený experiment - upraveno[24]

Změna frekvence se mění v závislosti na velikosti vtisku Vickersova hrotu.

$$\Delta f \approx E_{\text{elast}} \cdot \sqrt{A}$$

$$HV = F/A$$

Δf – změna frekvence, E_{elast} – Youngův modul pružnosti, A – plocha vtisku, HV – hodnota tvrdosti (Vickers), F – síla aplikovaná při měření tvrdosti dle Vickerse. [29]



Obr. 14: Závislost hodnoty tvrdosti na změně frekvence kmitající tyčinky – upraveno[29]

Změna frekvence také závisí **na Youngově modulu pružnosti**, který je materiálovou konstantou (tuhost jednotlivých pružin viz obrázek 13). **Přístroj se musí kalibrovat dle zkoušeného materiálu, protože pro různé materiály jsou odlišné moduly pružnosti.** [24]

Zkouška se musí vykonat dle normy ASTM A 1038-05 - Standard Practice for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method.

Norma udává, že před vlastním měřením je nutno zbavit povrch prachu, mastnoty a koroze. Drsnost povrchu musí být menší než 30 % hloubky vtisku. **Minimální tloušťka materiálu je stanovena na desetinásobek uvedené hloubky vtisku.** [29]

Postup měření tvrdosti dle ASTM A 1038-05

- 1) Zapnutí přístroje a nastavení požadovaných jednotek pro připojenou sondu.
- 2) Pomocí ergonomického nástavce je možné zajistit stabilitu sondy (přístupná místa).

- 3) Sondu je nutné držet kolmo na zkušební povrch a v obou rukách.
- 4) Vyvinutí síly proti povrchu měřené součásti. Je nutné po celou dobu přitlačení kontrolovat pozici sondy.
- 5) Maximální přípustná odchylka od osy měření – 5°. Aby nedošlo ke sklouznutí z povrchu, není přípustné kroucení sondy v axiální ose.
- 6) Hodnoty měření jsou zobrazeny na LCD. [29]

Příklad značení tvrdosti dle normy ASTM A 1038-05 (HV, HRC, HBW)

446 HV (UCI) 10 - značí tvrdost 446 podle Vickerse, ekvivalentní zkušební zatížení 10 kgf.

Pokud jsou číselné hodnoty převedeny přístrojem do jiných měřítek (HRC, HBW):

45 HRC (UCI) 10 – značí tvrdost 45 podle Rockwella, ekvivalentní zkušební zatížení 10 kgf.

220 HBW (UCI) 10 - značí tvrdost 220 podle Brinella při použití kuličky z tvrdokovu, ekvivalentní zkušební zatížení 10 kgf.

Výpočet hloubky vtisku diamantovým hrotem

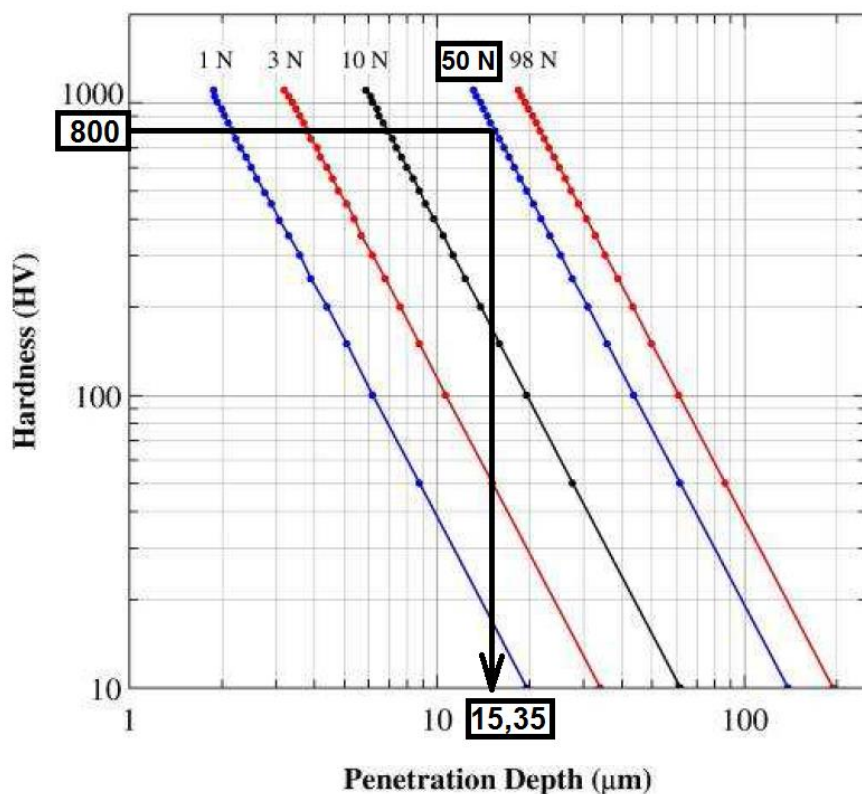
V praktické části je měřena zakalená vrstva litiny pomocí ultrazvukového tvrdoměru **Krautkramer Branson MIC 10**. Nominální hodnota zkušebního zatížení je $F = 49,03$ [N] (HV 5). Přitom naměřená tvrdost povrchově zakalené litiny s lupínkovým grafitem průměrně dosahuje 800 HV.

$$h[mm] = 0,062 \cdot \sqrt{\frac{F [N]}{Tvrdost [HV]}} = 0,062 \cdot \sqrt{\frac{49,03}{800}}$$

$$h[mm] = 0,0153$$

h – hloubka vtisku (Vickersův diamantový hrot)

Jelikož nejmenší naměřená tloušťka zakalené vrstvy litiny diodovým laserem dosahuje v oblasti překryvu hodnoty 0,1 mm (viz praktická část), tak i při zatížení 5 kg nedojde k jejímu proražení.



Obr. 15: Závislost hloubky vtisku na tvrdost pro různé zatížení – upraveno [24]

Velká výhoda přenosného tvrdoměru Krautkramer Branson MIC 10, ale i ostatních ultrazvukových tvrdoměrů je v jejich mobilitě. Tato vlastnost se hodí pro těžké a dlouhé odlitky. **Je vhodný pro měření vrstev a tvrzených povrchů.** Dle výrobce se pro měření litiny hodí částečně, avšak **pro měření zakaleného povrchu litiny dostačuje.** Jelikož **je zakalený povrch litiny broušen, je zde menší nepřesnost měření, než v případě nebroušeného povrchu.** Také výrobce doporučuje maximální drsnost povrchu u tvrdoměru MIC 10 na $\leq 1,6 \mu\text{m}$. **Vliv heterogenity zakalené litiny je možné eliminovat větším zatížením – 5 kg,** při kterém nedochází k měření pouze na struktuře. **Při tomto zatížení nedochází k proražení povrchově zakalené vrstvy a tím i k ovlivnění výsledné tvrdosti** (viz výpočet hloubky vtisku).

Ultrazvukový tvrdoměr Krautkramer MIC 10 s Vickersovým hrotem **je dostačující pro měření zakaleného povrchu litiny, a to i s ohledem na univerzálnost vnikací zkoušky pomocí Vickersova hrotu a ve firmě TOS Varnsdorf, a.s. se v praxi běžně používá.**

2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Předmětem experimentální části byla optimalizace laserového kalení litiny GJL 250 diodovým laserem s cílem nalézt takové parametry kalení, při kterých by se dosáhla co největší hloubka zakalené vrstvy a zároveň největší rychlost procesu. Rychlost je důležitá z hlediska technologických časů, které by měly být co nejmenší, ale s ohledem na kvalitu zakalené plochy.

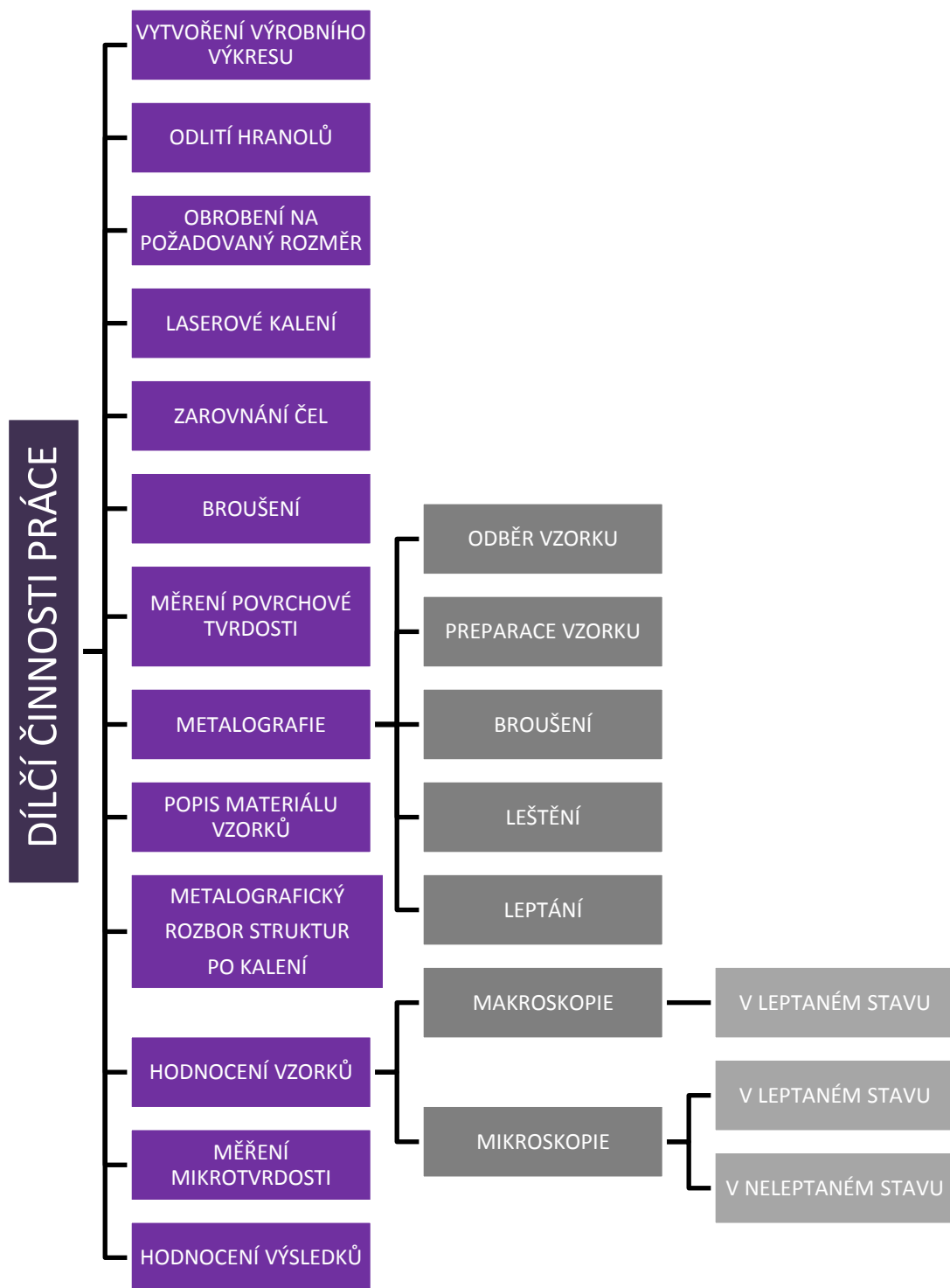
Standardně jsou ve firmě laserově kaleny těžké dílce při těchto parametrech:

- výkon: **4660 [W]**, rychlost: **12,5 [cm/min]**,
- hloubka zakalení: **maximálně 1,3 – 1,4 mm**.

Pro optimalizaci procesu bylo navrženo šest shodných odlitků z litiny GJL 250, které by co nejpřesněji simulovaly podmínky laserového kalení na těžkých dílcích ve firmě TOS Varnsdorf, a.s. Každý odlitek byl kalen dvakrát (z obou stran) – ve variantě s překryvem a bez překryvu. Vzniklo dvanáct zakalených ploch při různých parametrech.

2.1 Dílčí činnosti práce

Pro získání konkrétních výsledků, bylo nutno provést několik dílčích operací od vytvoření výrobního výkresu odlitku, přes měření povrchové tvrdosti, měření mikrotvrdosti, měření tloušťky vrstvy, až po vyhodnocení jednotlivých struktur pod mikroskopem. Výsledky byly shrnuty a vyjádřeny v jednotlivých doporučeních pro budoucí kalení litin diodovým laserem ve firmě TOS Varnsdorf, a.s. **Jednotlivé dílčí činnosti práce jsou přehledně znázorněny na obrázku 16.**



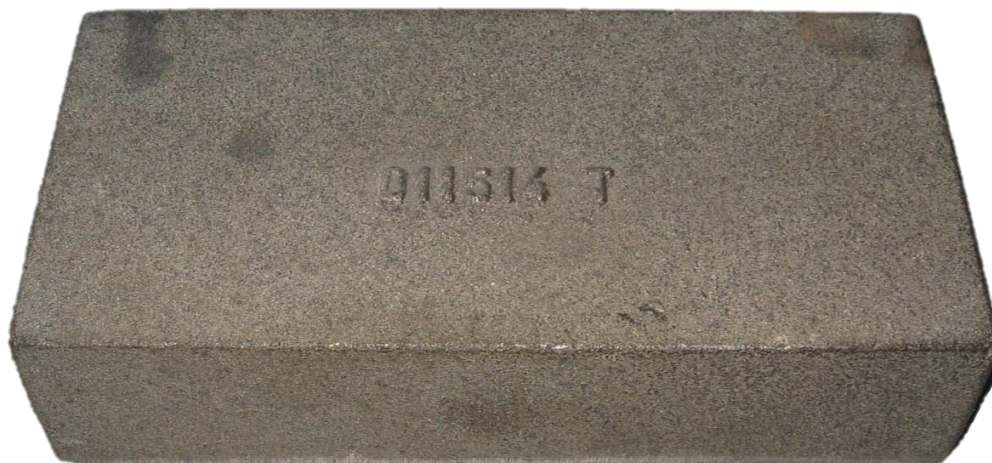
Obr. 16: Chronologicky uspořádané dílčí činnosti práce

V příloze B je sled operací znázorněn jiným způsobem. Jednotlivé činnosti jsou vyjádřeny čísly.

2.2 Odlití hranolů podle výkresové dokumentace a následné obrobení

Výkres byl vytvořen na základě dvou požadavků. Navržený hranol přiblížit co nejvíce charakteristice při kalení těžkých dílců. To znamená, aby byl odvod tepla hranolu co nejblíže odvodu tepla lože či stojanu. A dále aby teplotní ovlivnění laserem bylo v porovnání co nejblíže u sebe. Z tohoto důvodu by bylo vhodné nakreslit co největší rozměry hranolu blížící se těžkým dílcům. Druhý požadavek spočíval v obrobení hranolu takovým způsobem, který by umožňoval jeho uříznutí pomocí kotoučové pily pro následnou metalografii. **Z těchto dvou podmínek byl zvolen kompromis a následně nakreslen výkres hranolu s číslem 010151400.**

Dle výkresové dokumentace bylo odlito ve firmě TSS, spol. s.r.o. do pěnového polystyrenu šest hranolů z litiny GJL 250 (litina s lupínkovým grafitem), která se běžně používá ve firmě TOS Varnsdorf, a.s. u těžkých dílců jako např. lože, saně, stojan, domky pro kuličkové šrouby aj. Obsahem přílohy C je výkres hranolu včetně dokumentů a obrázků ze slévárny.



Obr. 17: Odlitek z litiny GJL 250 (číslo modelu 011514)

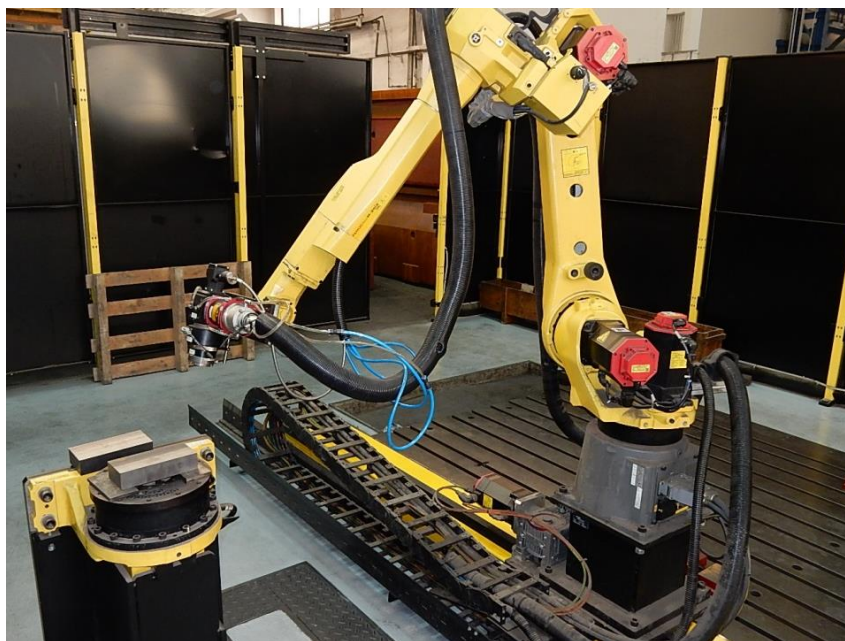
Poté byl obroben odlitek dle výkresu na rozměr **200 mm x 90 mm x 45 mm** (**d x š x v**). Na obrázku 18 je vidět výsledné opracování odlitku ze všech stran.



Obr. 18: Obrobení odlitku dle výkresu

2.3 Kalení součástí diodovým laserem

Kalení diodovým laserem o výkonu 6 kW bylo provedeno na specializovaném pracovišti v prostorách firmy TOS Varnsdorf, a.s. (viz obrázek 19)



Obr. 19: Specializované pracoviště určené pro kalení diodovým laserem (typ laseru: LDF 6000 - 100)

Před samotným kalením bylo nutné všechny dílce označit čísly pomocí raznic a také vyznačit směr kalení – příloha B. Směr se razil z důvodu tepelného ovlivnění kalených součástí. Na začátku operace byla součást chladná (20 °C), ale postupně se zahřívala, až v místech na konci, kde probíhalo kalení dílce, dosahovala cca 200 °C. Teplotní podmínky pro zakalení součástí byly různé. **U těžkých dílců (lože, stojan) můžeme ale tento faktor zanedbat, protože odvod tepla je daleko větší.**

Po naprogramování angulárního robota FANUC M-20iA s technologickým efektozem (hlavice obsahující diodový laser), proběhlo kalení šesti obrobků z obou stran. V případě kalení druhé strany bylo nutné dílec odstavit do úplného vychladnutí (cca dvě hodiny; z důvodu většího tepelného spádu při kalení). Odstavení dílce bylo provedeno i před kalením druhé stopy technologie s překryvem. Efektor byl po celou dobu nastaven ve vzdálenosti 250 mm nad obrobkem. Většina kalení byla řízena výkonem, pouze dvě byly řízeny teplotou. Byla použita technologie kalení s překryvem i bez překryvu. V tabulce viz níže je vidět, při jakých parametrech proces proběhl.

Tab. 3: Zvolené parametry pro kalení součástí diodovým laserem

| Laserové kalení | | Nastavení jednotlivých parametrů | | | | | |
|----------------------------|----|----------------------------------|-----------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|
| | | Řízeno | Výkon [W] | Teplota [°C] | Rychlost [cm/min] | Technologie | Kalená šířka [cm] |
| Vyražené číslo na vzorcích | 1 | výkonem | 4660* | - | 12,5* | bez překryvu | 50 |
| | 2 | výkonem | 4660* | - | 12,5* | s překryvem | 45/45 |
| | 3 | výkonem | 5500 | - | 12,5 | bez překryvu | 50 |
| | 4 | výkonem | 5500 | - | 12,5 | s překryvem | 45/45 |
| | 5 | výkonem | 4660 | - | 10,0 | bez překryvu | 50 |
| | 6 | výkonem | 4660 | - | 10,0 | s překryvem | 45/45 |
| | 7 | výkonem | 6000 | - | 17,5 | bez překryvu | 50 |
| | 8 | výkonem | 6000 | - | 17,5 | s překryvem | 45/45 |
| | 9 | výkonem | 6000 | - | 15,0 | bez překryvu | 50 |
| | 10 | výkonem | 6000 | - | 15,0 | s překryvem | 45/45 |
| | 11 | teplotou | - | 1190 | 15,0 | bez překryvu | 50 |
| | 12 | teplotou | - | 1150 | 15,0 | bez překryvu | 50 |

Pozn.: * Při těchto parametrech se běžně kalí ve firmě TOS Varnsdorf, a.s.

Předmětem přílohy D jsou obrázky technologie kalení hranolů – s překryvem a bez překryvu.

2.4 Zarovnání čel a broušení

Po kalení dílců následovalo zarovnání čel z obou stran válcovou frézou v délce 15mm. (viz příloha B). Jakmile byla čela obrobena, dopravily se dílce na rovinnou brusku BPH – 20 NA (viz obrázek 20). Každá součást se postupně vložila na elektromagnetickou desku. Po zapnutí magnetu se brousilo na jedné polovině dílce. Součást se poté otočila, vypodložila pomocí kostek, jelikož byl na dílci způsoben odskok po předchozím broušení. Dále byl postup analogický. Technologický postup broušení je zřejmý z přílohy E.



Obr. 20: Rovinná bruska BPH – 20 NA

2.5 Měření povrchové tvrdosti

Po zbroušení povrchu byly na každém dílci v broušené části v určitých roztečích označeny měřící místa permanentním popisovačem (viz příloha B). Zkouška proběhla ultrazvukovou metodou (UCI) dle normy ASTM A 1038-05 (Standard Practice for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method). K tomu byl použitý ultrazvukový tvrdoměr Krautkramer Branson MIC 10-34100, který je vhodný pro tvrdé kalené vrstvy. V nastavení přístroje byl zvolen přepočít na hodnoty podle Vickerse. Nominální hodnota zkušebního zatížení byla $F = 49,03$ [N] (HV 5). Pro zajištění přesnosti výsledků bylo nutné provést kalibraci přístroje dle příslušné kalibrační konstanty pro daný materiál. Vzhledem k objektivnosti jednotlivých měření bylo na každém dílci

provedeno sto vtisků. Z důvodu velikosti jsou tabulky s hodnotami povrchové tvrdosti v příloze F.

Vtisky přímo ve středu stopy nebyly možné, protože vznikl odskok z důvodu broušení jedné poloviny dílce – vtisky odskočeny od středu stopy o 4 mm. Výbrus, kde je zahrnutá broušená i nebroušená část se zkoumala pod mikroskopem.

Tab. 4: Některé statistické hodnoty z měření povrchové tvrdosti

| Měření povrchové tvrdosti | vzorek č.1 | vzorek č.2 | vzorek č.3 | vzorek č.4 |
|---------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Počet měření | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Minimum | 686 HV | 726 HV | 685 HV | 650 HV |
| Maximum | 870 HV | 880 HV | 884 HV | 849 HV |
| Průměrná hodnota | 787 HV | 799 HV | 770 HV | 751 HV |
| Směrodatná odchylka | 43,60 | 35,77 | 44,62 | 40,71 |

| Měření povrchové tvrdosti | vzorek č.5 | vzorek č.6 | vzorek č.7 | vzorek č.8 |
|---------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Počet měření | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Minimum | 733 HV | 588 HV | 745 HV | 737 HV |
| Maximum | 888 HV | 857 HV | 922 HV | 886 HV |
| Průměrná hodnota | 806 HV | 765 HV | 830 HV | 821 HV |
| Směrodatná odchylka | 35,37 | 57,26 | 33,69 | 31,29 |

| Měření povrchové tvrdosti | vzorek č.9 | vzorek č.10 | vzorek č.11 | vzorek č.12 |
|---------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Počet měření | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Minimum | 763 HV | 729 HV | 754 HV | 738 HV |
| Maximum | 908 HV | 888 HV | 901 HV | 942 HV |
| Průměrná hodnota | 825 HV | 814 HV | 835 HV | 831 HV |
| Směrodatná odchylka | 33,43 | 39,79 | 30,06 | 39,63 |

Z tabulky 4 je patrné, že **směrodatná odchylka každého vzorku odpovídá danému účelu** – jednotlivé hodnoty tvrdosti jsou více rozptýleny od průměru hodnot tvrdosti. Největší hodnota byla dosažena u vzorku č. 6. **Důsledek vysokých směrodatných odchylek u jednotlivých vzorků je zapříčiněn zakalenou heterogenní strukturou litiny – především vliv grafitu.**

Jak bylo uvedeno výše, vedení lineárních skupin jsou kluzná. Přesto na některých laserově kalených plochách docházelo i k valivému pohybu. Tento pohyb vykonávaly přítlačné valivé jednotky umístěné na vřeteníku, které se pohybovaly po plochách stojanu.

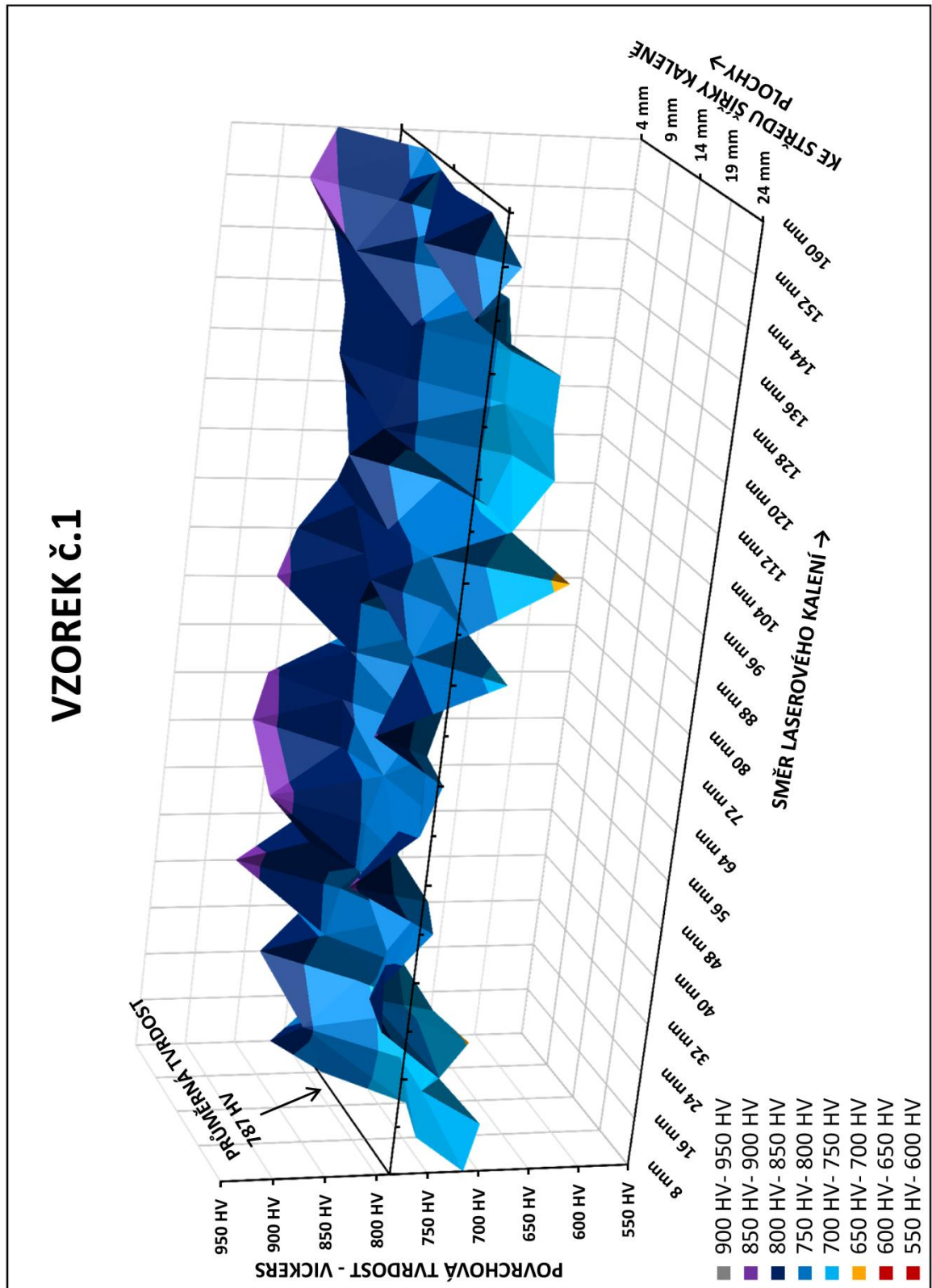
Od tohoto způsobu se upustilo, protože na jednotlivých plochách při pojezdu vřeteníku docházelo k postupnému vymílání drážky. Příčina mohla být mimo jiné také ve velkém rozptylu hodnot tvrdosti. Na těchto rizikových místech se začaly používat lepené kalené lišty, které vykazují lepší povrchovou odolnost. **Z toho vyplývá, že laserově kalené plochy na odlitcích nejsou vhodné pro valivý pohyb, ale pro kluzný pohyb, kde zatížení působí na větší ploše. Tím se také dostatečně eliminuje vliv heterogenity.**



Obr. 21: Ultrazvukový tvrdoměr Krautkramer Branson MIC 10-34100

V grafu 1 vzorku č. 1 je zobrazen průběh tvrdosti s vyznačenou průměrnou tvrdostí dané součásti. Ostatní grafy jsou pro svojí velikost a pro zachování čitelnosti umístěny v příloze G. **Z jednotlivých grafů je patrné, že odchylky naměřené povrchové tvrdosti jsou místní (lokální) a proto při kluzném pohybu nevadí.**

Graf 1: Povrchová tvrdost vzorku č. 1



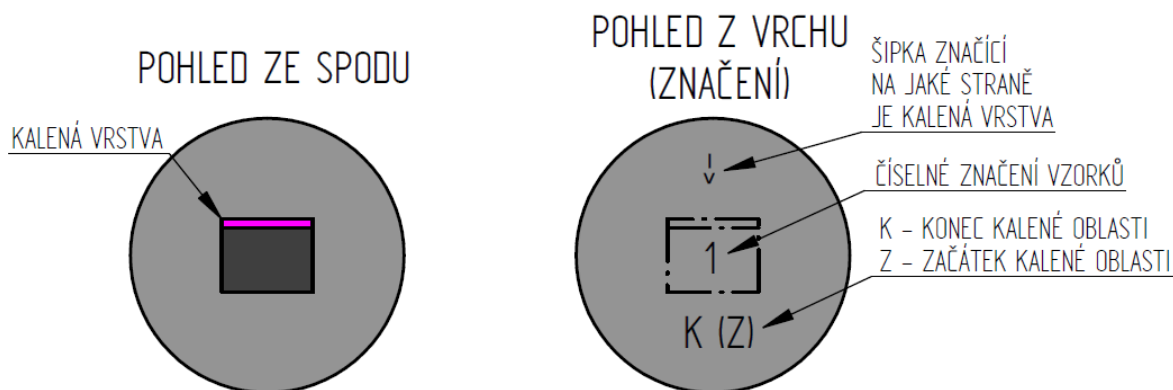
2.6 Odběr a preparace vzorků

Pro zkoumání mikrostruktury a makrostruktury povrchově kalené litiny bylo nejprve nutné z každého hranolu odříznout pomocí pily cca 10mm silný plátek. Tento plátek se pak dále rozdělil takovým způsobem, aby vznikl vzorek naznačený v příloze B (označeno růžovou barvou). Při odběru byl použit řezný kotouč od firmy HANYKO Praha s.r.o. s označením HHH, HRC60+, Ø250 x 1,8 x 32 mm, který zaručoval plynulé oddělení materiálu bez zaseknutí. Odvod tepla z řezu byl urychlován neustále proudící emulzí. **Řezání zakaleného obrobku na vzorky probíhalo pomalu – jeden vzorek cca 1 hod., aby nedošlo k tepelnému ovlivnění struktury.**



Obr. 22: Pila Jean Wirtz CUTO 20 [25]

Dále následovala preparace vzorků za tepla pomocí elektro-hydraulického lisu. Vzorek byl umístěn na dno lisovací formy. Poté byl zasypán speciálním práškem z polymeru, který doporučila firma Buehler a následně byla vložena oddělovací ocelová podložka. Na podložku byl kladen jiný vzorek, který se rovněž zasypal. Vše se uzavřelo pomocí bezpečnostního bajonetu. Lis začal pomocí přednastaveného lisovacího programu automaticky pěchovat a dále vlivem ohřívání formy tavit prášek. Ke konci procesu následovalo chlazení. Takto vznikly dva vzorky zároveň. Značení a kladení vzorků na dno formy je zřejmé z obrázku 23.



Obr. 23: Značení a kladení vzorků do lisovací formy

Začátek a konec kalené oblasti byl označen z důvodu nestejných podmínek při kalení (teplota). **Pomocí mikroskopu bylo následně zjištěno, že rozdíl mezi jednotlivými oblastmi je minimální. Z tohoto důvodu bylo zkoumáno jen dvanáct vzorků** (bez ohledu na začátek a konec kalení). Na obrázku 24 je zobrazen elektro-hydraulický lis SIMPLIMET 2000 od firmy Buehler, který byl použit pro preparaci vzorků.



Obr. 24: Elektro-hydraulický lis SIMPLIMET 2000 [20]

2.7 Broušení a leštění vzorků

Broušení a leštění vzorků bylo realizováno na brusce (leštičce) MetaServ 250 s hlavou VECTOR LC 250. Do hlavy byly vloženy čtyři vzorky. Jednotlivé operace jdoucí chronologicky za sebou, přítlaky vzorků na jednotlivé brusné (leštící) papíry či rychlost jsou zobrazeny níže. **Tyto hodnoty byly doporučeny firmou Buehler.**

1) Broušení

- a. Samolepící papír: CarbiMet, Ø254 mm

Brusný typ: SiC P320

Mazadlo: voda

Čas: do roviny

Přítláčná síla: 25 N

Rychlost: 300 otáček za minutu

- b. Samolepící papír: CarbiMet, Ø254 mm

Brusný typ: SiC P600

Mazadlo: voda

Čas: 3 min.

Přítláčná síla: 25 N

Rychlost: 300 otáček za minutu

- c. Samolepící papír: CarbiMet, Ø254 mm

Brusný typ: SiC P1200

Mazadlo: voda

Čas: 2 min.

Přítláčná síla: 25 N

Rychlost: 300 otáček za minutu

2) Leštění

- a. Samolepící papír: TriDent, Ø250 mm, leštící plátno pro leštění diamantem

Brusný typ: MetaDi Suspension, diamantová suspenze, 6 µm

Mazadlo: MetaDi Fluid (smáčedlo pro diamantové suspenze)

Čas: 1:30 – 2:00 min.

Přítlačná síla: 25 N

Rychlost: 150 otáček za minutu

b. Samolepící papír: TriDent, Ø250 mm, leštící plátno pro leštění diamantem

Brusný typ: MetaDi Suspension, diamantová suspenze, 3 µm

Mazadlo: MetaDi Fluid (smáčedlo pro diamantové suspenze)

Čas: 1:30 – 2:00 min.

Přítlačná síla: 25 N

Rychlost: 150 otáček za minutu

3) **Finální leštění**

a. Samolepící papír: MicroCloth, Ø250 mm, leštící plátno pro doleštění

Brusný typ: MasterPrep, Alumina pro jemné leštění, 0,05 µm

Čas: 1:00 min.

Přítlačná síla: 25 N

Rychlost: 150 otáček za minutu



Obr. 25: Buehler bruska (leštička) MetaServ 250 s hlavou VECTOR LC 250 [28]

2.8 Popis materiálu vzorků

Z průvodky kontrolního odlitku (příloha C), která byla vystavena slévárnou TSS, spol. s.r.o., jsou patrné některé údaje – především tvrdost a chemické složení. Tyto údaje sloužily pro ověření litiny GJL 250 dané normou: ČSN 42 2425 – Litina 42 2425 s lupínkovým grafitem. Popis struktury výchozí litiny byl vyhodnocen dle normy: ČSN EN ISO 945 (ČSN 42 0461) – Hodnocení metalografické struktury litin.

2.8.1 Chemické složení a tvrdost výchozí struktury litiny (před zakalením)

- Chemické složení zkoumaných vzorků:

C (uhlík): 3,51 %; **Si (křemík):** 1,56 %; **Mn (mangan):** 0,62 %;
P (fosfor): 0,23 %; **S (síra):** 0,09 %; dále **Sc (stupeň eutektičnosti):** 0,95;
CE (uhlíkový ekvivalent): 3,97 % → **podeutektická litina.**

- Chemické složení dané normou ČSN 42 2425:

Chemické složení volí slévárna podle řady faktorů jako např. druhu tavicích pecí, surovin materiálu forem a dalších výrobních podmínek.

P (fosfor): max. 0,5 %; **S (síra):** max. 0,15 %.

Sc (stupeň eutektičnosti) dle vzorce:

$$Sc = (\% C) / (4,23 - 0,3(\% Si + \% P))$$

Ce (uhlíkový ekvivalent) dle vzorce:

$$CE = \% C + 0,3. (\% Si + \% P)$$

- Tvrdost zkoumaných vzorků

Tvrdost dle Brinella: **203 HB**

- Tvrdost dané normou ČSN 42 2425:

Dle tloušťky stěn odlitku používané v TOS Varnsdorf, a.s.

Tloušťka odlitku: nad 15 mm do 30 mm Tvrdost: **180 až 240 HB**

Tloušťka odlitku: nad 30 mm do 45 mm Tvrдость: **170 až 230 HB**

Tloušťka odlitku: nad 45 mm do 80 mm Tvrдость: **160 až 220 HB**

Tloušťka odlitku: nad 80 mm do 120 mm Tvrдость: **150 až 210 HB**

→ **Chemické složení a tvrdost odpovídá požadavkům normy ČSN 42 2425.**

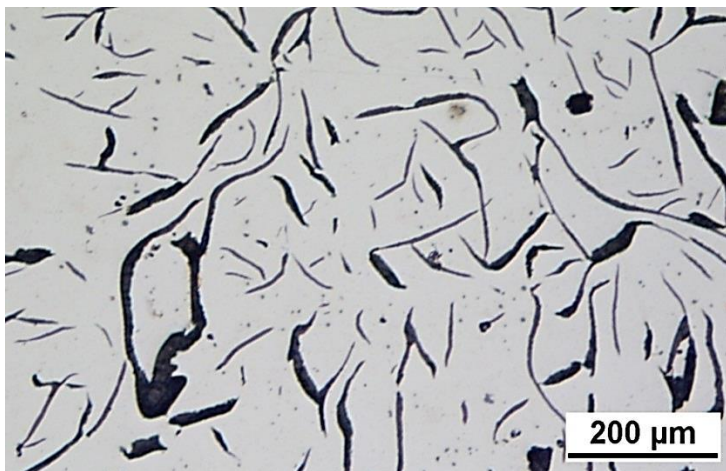
2.8.2 Metalografické hodnocení struktury litiny (nezakalená část)

Dle normy ČSN EN ISO 945 (ČSN 42 0461) proběhlo porovnání struktury zkoumané litiny se strukturními etalony.

Hodnocení grafitu

Grafit je typu **I C 3/4/5**

Charakterizuje grafit lupínkový, rozložení smíšené, velikosti 60 až 500 μm , přičemž převládá velikost v rozmezí 120 až 250 μm .

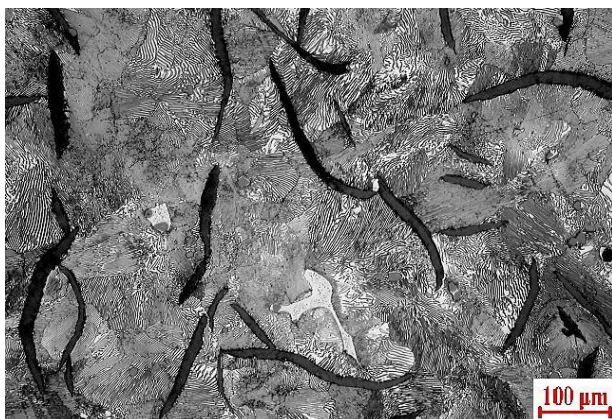


Obr. 26: Hodnocení grafitu (100x), neleptáno

Hodnocení ostatních fází a strukturních součástí

P1 – P 96 – Pd 1,4 – F 2 – Fr 1 – Fv 2000

Charakterizuje strukturu litiny obsahující 94 až 98 % lamelárního perlitu s disperzitou lamel 1,0 až 1,7 μm , dále jemnozrnné ternární fosfidové eutektikum je vyloučené v nesouvislém síťoví. Útvary fosfidového eutektika mají velikost do 2000 μm^2 .



Obr. 27: Hodnocení obsahu perlitu a velikosti útvarů fosfidového eutektika (100x), leptáno



Obr. 28: Hodnocení disperzity perlitu (1000x), leptáno

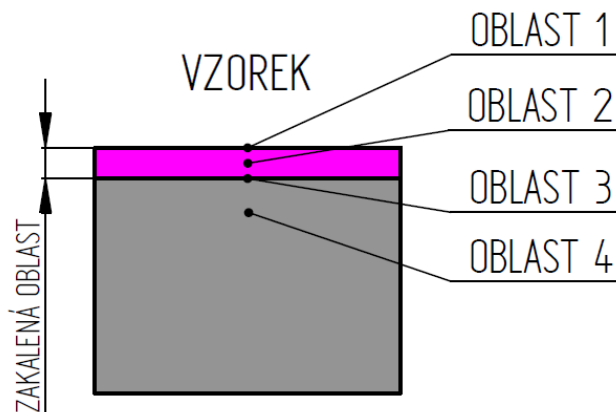


Obr. 29: Hodnocení tvaru perlitu a typu fosfidového eutektika (500x), leptáno

Z uvedeného vyplývá, že matrice je **perlitická**. Struktura je tvořená perlitem s malým množstvím feritu a s lupínkovým grafitem. **Struktura odpovídá litině GJL 250.**

2.9 Makroskopie a mikroskopie vzorků

Pro zviditelnění kalené vrstvy a jednotlivých strukturních součástí bylo třeba každý vzorek leptat leptacím činidlem – 2 % Nital (2 % roztok kyseliny dusičné v etanolu). Po naleptání proběhlo usušení vzorků fénem. Nejprve byla provedena makroskopie označených vzorků. Dále na mikroskopu ZEISS NEOPHOT 32 byla realizována mikroskopie vzorků – tzv. rozbor struktur po kalení. Na obrázku 30 jsou znázorněny oblasti, které byly zkoumány pod mikroskopem.



Obr. 30: Oblasti zkoumané pod mikroskopem

2.9.1 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 1

- bez překryvu; výkon: 4660 W; rychlost: 12,5 cm/min



Obr. 31: Makroskopie vzorku č. 1 – technologie bez překryvu

Na obrázku 31 lze vidět souvislou zakalenou vrstvu. **Hloubka zakalené vrstvy od 0,8 mm do 1,15 mm.**

Oblast 1 - povrch

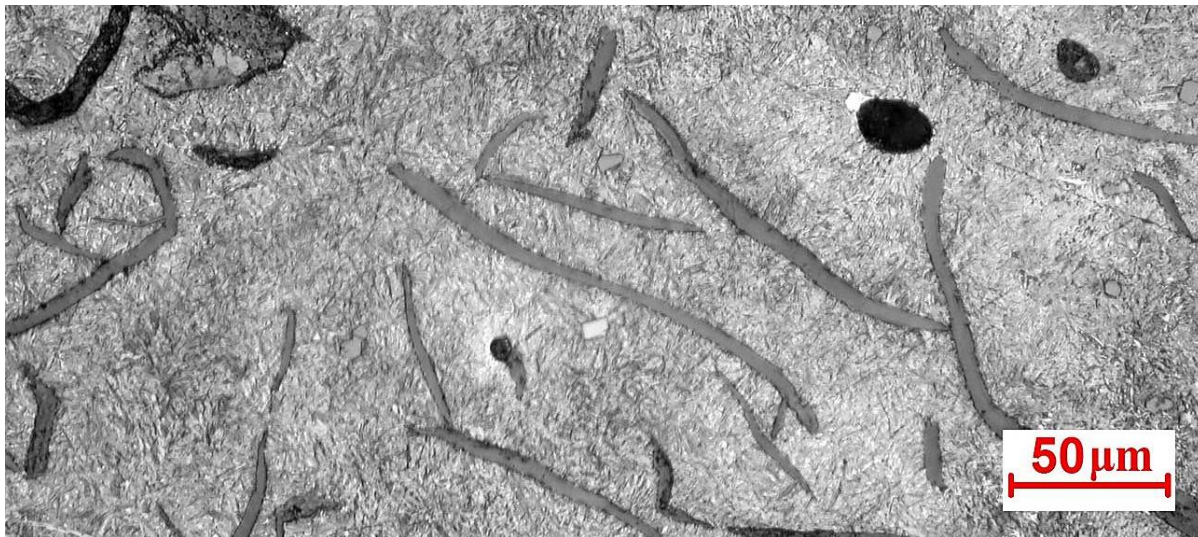
První oblast obsahuje lupínkový grafit a jehlice martenzitu, mezi jehlicemi je malé množství zbytkového austenitu. Blíže k jádru jsou jehličky martenzitu jemnější a zbytkový austenit ubývá.



Obr. 32: Vzorek č. 1 – oblast 1 (200x)

Oblast 2 – uprostřed zakalené vrstvy

V druhé oblasti je vidět velmi jemný martenzit s nepatrným množstvím zbytkového austenitu mezi jehlicemi a lupínkový grafit, v hloubce do 0,5 – 0,6 mm je část zrn feritu. Směrem k přechodové oblasti přibývá.



Obr. 33: Vzorek č. 1 – oblast 2 (200x)

Oblast 3 – přechodová oblast

Přechodová oblast je tvořena lupínkovým grafitem, steaditem a feritem a perlitem.



Obr. 34: Vzorek č. 1 – oblast 3 (200x)

Oblast 4 – nezakalená oblast

Jádro je perlitická litina s malým podílem feritu a s lupínkovým grafitem. Grafit poměrně výrazný. Dále jsou zde jednotlivá zrna fosfidového eutektika (tvořící částečně síťoví po hranicích primárních zrn). **U dalších vzorků se tato struktura opakuje, proto oblast 4 dále nebude zahrnutá.**



Obr. 35: Vzorek č. 1 – oblast 4 (200x)

2.9.2 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 2

- s překryvem; výkon: 4660 W; rychlost: 12,5 cm/min

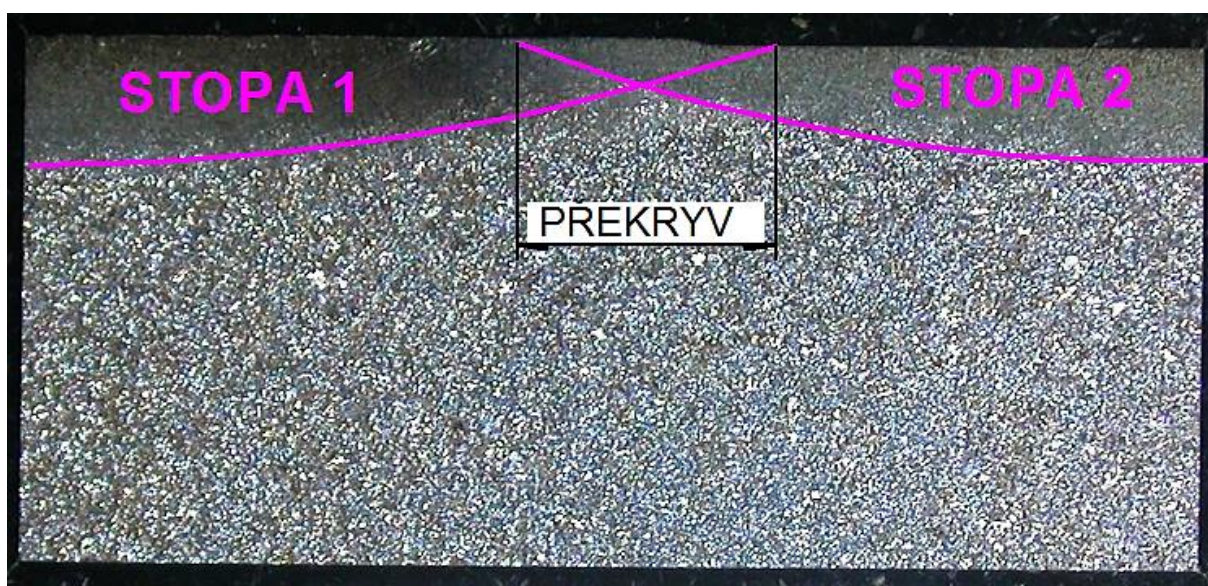


Obr. 36: Makroskopie vzorku č. 2 – technologie s překryvem

Na obrázku 36 lze vidět nesouvislou úzkou zakalenou vrstvu (v překryvu obou stop chybí), která vznikla technologií s překryvem. **Došlo zde k popuštění první kalené stopy – to znamená, že při kalení druhé stopy došlo k opětovnému prohřátí první stopy a tím i k popuštění. Tento problém se vyskytuje u všech vzorků s překryvem.** V popuštěné oblasti má vzorek i menší tvrdost. S tímto jevem se v podstatě nedá nic dělat. Možná je pouze optimalizace velikosti překryvu, která nebyla předmětem této diplomové práce, avšak mohla by být doporučením pro další výzkum.

Největší tloušťka zakalené vrstvy dosahuje 0,7 mm.

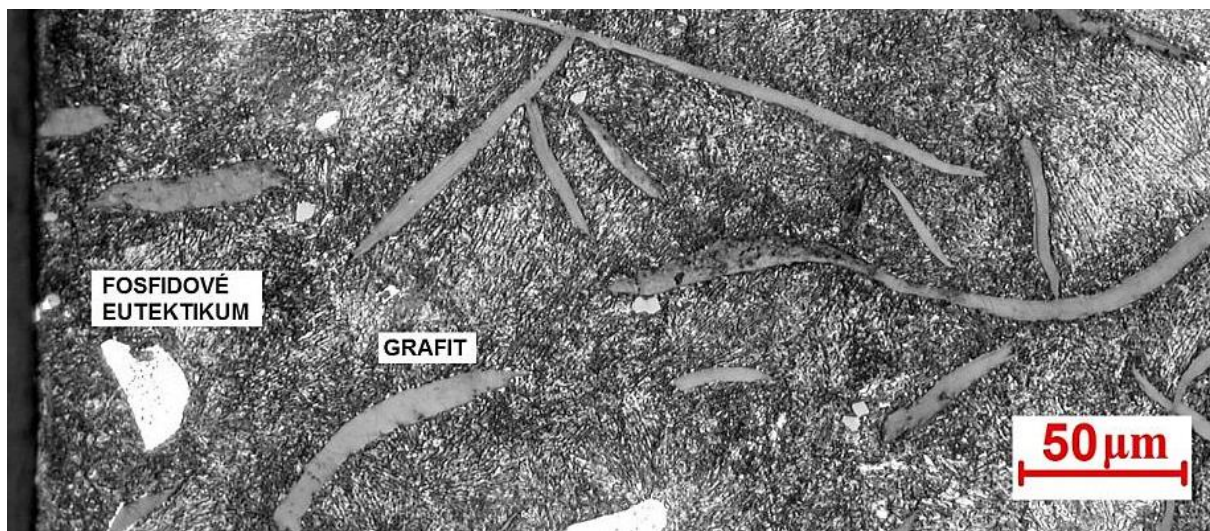
Na obrázku 37 je znázorněn vzorový příklad při překrytí stop (výkon 5500 kW, rychlost 12,5 cm/min).



Obr. 37: Vzorový příklad při překrytí stop

Oblast 1 - povrch

První oblast tvořena velmi jemným martenzitem, lupínkovým grafitem a fosfidovým eutektikem. Minimální množství feritu



Obr. 38: Vzorek č. 2 – oblast 1 (200x)

Oblast 2 – uprostřed zakalené vrstvy

Druhá oblast je prakticky stejná jako první oblast.

Oblast 3 – přechodová oblast

Přechlazený perlit, velmi jemný martenzit a nepatrné množství feritu ostře přechází do základní struktury řidšího lamelárního perlitu. Dále oblast tvoří základní složky litiny.



Obr. 39: Vzorek č. 2 – oblast 3 (200x)

2.9.3 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 3

- bez překryvu; výkon: 5500 W; rychlost: 12,5 cm/min



Obr. 40: Makroskopie vzorku č. 3 – technologie bez překryvu

Na obrázku 40 lze vidět souvislou zakalenou vrstvu. **Hloubka zakalené vrstvy od 1,7 mm do 1,8 mm.**

Oblast 1 - povrch

Na povrchu ledeburitické jehlice do hloubky 0,1 až 0,15 mm, dále strukturu tvoří hrubší jehlice martenzitu a zbytkového austenitu (ZA v množství 50 – 60 % - do hloubky 0,45 až 0,5 mm). Množství zbytkového austenitu do jádra prudce ubývá.



Obr. 41: Vzorek č. 3 – oblast 1 (200x)

Oblast 2 – uprostřed zakalené vrstvy

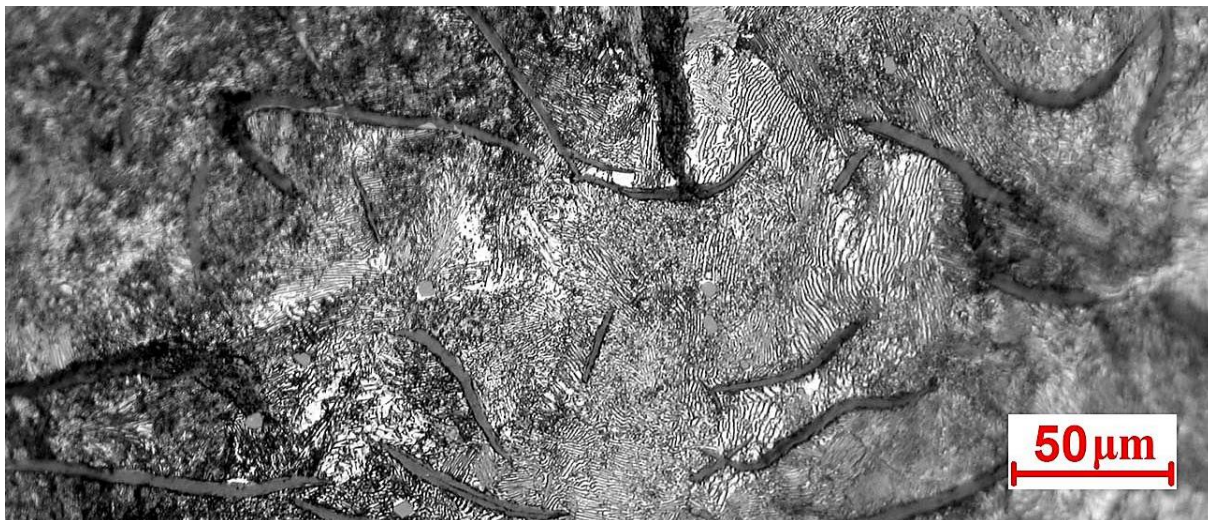
V druhé oblasti je vidět jemný martenzit s malým množstvím zbytkového austenitu (okolo 15 %). Dále oblast obsahuje lupínkový grafit.



Obr. 42: Vzorek č. 3 – oblast 2 (200x)

Oblast 3 – přechodová oblast

Přechodová oblast tvořena velmi jemným martenzitem, jemným lamelárním perlitem a dalšími složky litiny, struktura jádra je stejná.



Obr. 43: Vzorek č. 3 – oblast 3 (200x)

2.9.4 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 4

- s překryvem; výkon: 5500 W; rychlost: 12,5 cm/min



Obr. 44: Makroskopie vzorku č. 4 – technologie s překryvem

Na obrázku 44 lze vidět souvislou zakalenou vrstvu, která se v místě překryvu zmenšuje. **Největší tloušťka zakalené vrstvy dosahuje 1,7 mm, v nejmenší oblasti 1,2 mm.**

Oblast 1 - povrch

Oblast bez ledeburitu: Na povrchu pouze hrubé jehlice martenzitu s větším množstvím zbytkového austenitu (okolo 20 až 30 %). Oblast zasahuje do hloubky 0,2 až 0,25 mm. Dále se ve struktuře objevuje grafit. Množství zbytkového austenitu dále ubývá.

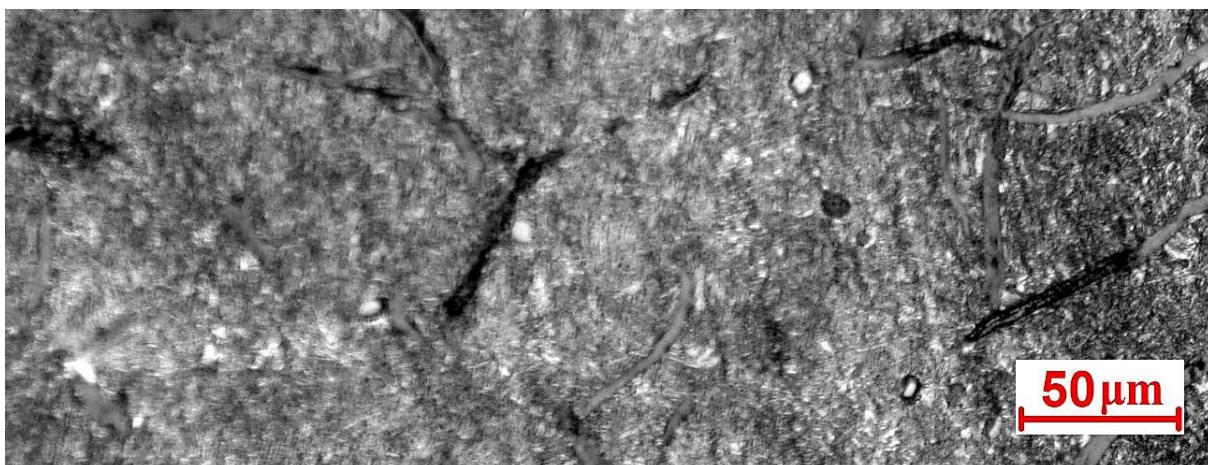
Oblast s ledeburitem: Na povrchu vyloučen ledeburitický cementit do hloubky 0,2 mm, hrubší jehlice martenzitu s větším množstvím zbytkového austenitu (okolo 40 %). Oblast zasahuje do hloubky 0,4 až 0,45 mm. Množství zbytkového austenitu dále ubývá.



Obr. 45: Vzorek č. 4 – oblast 1 (200x)

Oblast 2 – uprostřed zakalené vrstvy

V druhé oblasti vyloučen velmi jemný martenzit. Dále strukturu tvoří lupínkový grafit.



Obr. 46: Vzorek č. 4 – oblast 2 (200x)

Oblast 3 – přechodová oblast

Velmi jemná martenzitická struktura základního materiálu ostře přechází v hrubší lamelární perlitickou strukturu. V oblasti se dále vyskytuje lupínkový grafit.



Obr. 47: Vzorek č. 4 – oblast 3 (200x)

2.9.5 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 5

- bez překryvu; výkon: 4660 W; rychlost: 10,0 cm/min



Obr. 48: Makroskopie vzorku č. 5 – technologie bez překryvu

Na obrázku 48 lze vidět souvislou zakalenou vrstvu. **Hloubka zakalené vrstvy od 1,8 mm do 1,9 mm.**

Oblast 1 - povrch

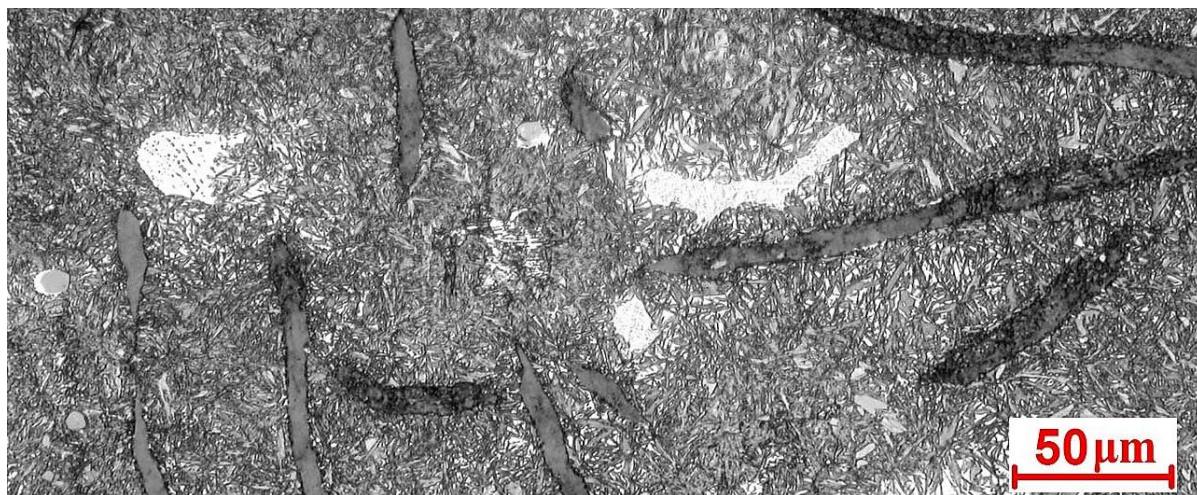
Na povrchu se vyskytují ledeburitické jehlice do hloubky cca 0,15 mm, dále strukturu tvoří hrubší jehlice martenzitu a zbytkového austenitu (v množství 50 %) do hloubky 0,3 až 0,4 mm. Množství zbytkového austenitu do jádra prudce ubývá. Pod ledeburitickou oblastí se začíná objevovat lupínkový grafit.



Obr. 49: Vzorek č. 5 – oblast 1 (200x)

Oblast 2 – uprostřed zakalené vrstvy

V druhé oblasti je vidět jemný martenzit s malým množstvím zbytkového austenitu (okolo 15 %). Dále je oblast tvořena lupínkovým grafitem a fosfidovým eutektikem.



Obr. 50: Vzorek č. 5 – oblast 2 (200x)

Oblast 3 – přechodová oblast

Přechodová oblast je tvořena velmi jemným martenzitem, jemným lamelárním perlitem a dalšími složky litiny, struktura jádra je stejná.



Obr. 51: Vzorek č. 5 – oblast 3 (200x)

2.9.6 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 6

- s překryvem; výkon: 4660 W; rychlost: 10,0 cm/min



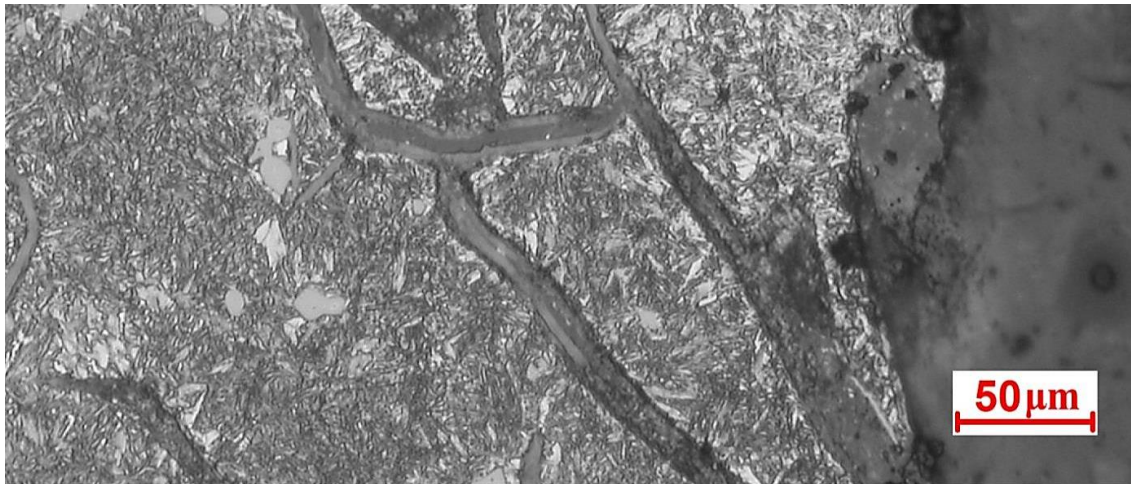
Obr. 52: Makroskopie vzorku č. 6 – technologie s překryvem

Na obrázku 52 lze vidět velmi nerovnoměrnou zakalenou vrstvu, která je v místě překryvu minimální. **Největší tloušťka zakalené vrstvy dosahuje 0,8 mm, v nejmenší oblasti 0,1 mm (překryv).**

Oblast 1 - povrch

Oblast s vrstvou: strukturu tvoří jemné jehlice martenzitu a malý podíl zbytkového austenitu (cca 15 %) do hloubky 0,05 mm a pak už jen jemný martenzit, který přechází do oblasti 2. V oblasti se dále nachází lupínkový grafit.

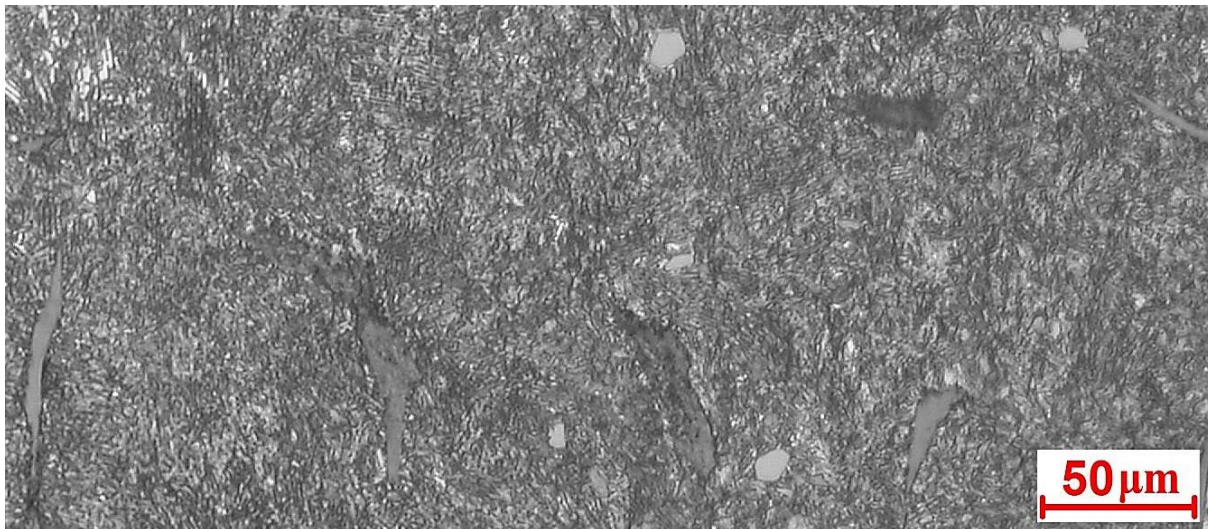
Oblast bez vrstvy: oblast tvořena velmi jemným martenzitem, lupínkovým grafitem a fosfidovým eutektikem. Minimální množství feritu.



Obr. 53: Vzorek č. 6 – oblast 1 (200x)

Oblast 2 – uprostřed zakalené vrstvy

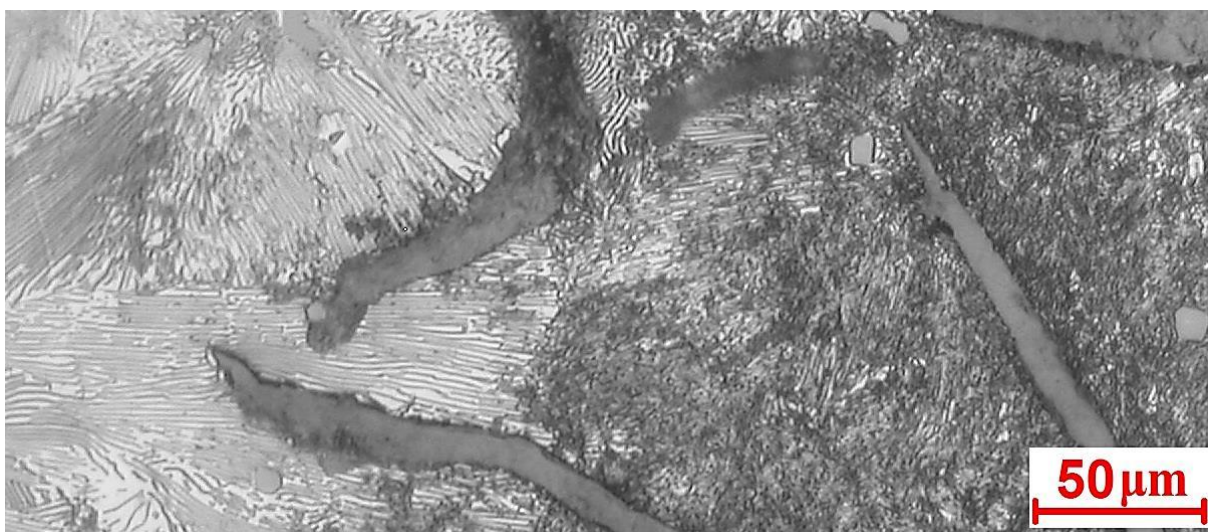
V druhé oblasti je vidět jemný martenzit a místy lupínkový grafit.



Obr. 54: Vzorek č. 6 – oblast 2 (200x)

Oblast 3 – přechodová oblast

Struktura s velmi jemným martenzitem a přechodným perlitem ostře přechází do základní struktury litiny. Oblast je dále tvořena lupínkovým grafitem.



Obr. 55: Vzorek č. 6 – oblast 3 (200x)

2.9.7 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 7

- bez překryvu; výkon: 6000 W; rychlost: 17,5 cm/min

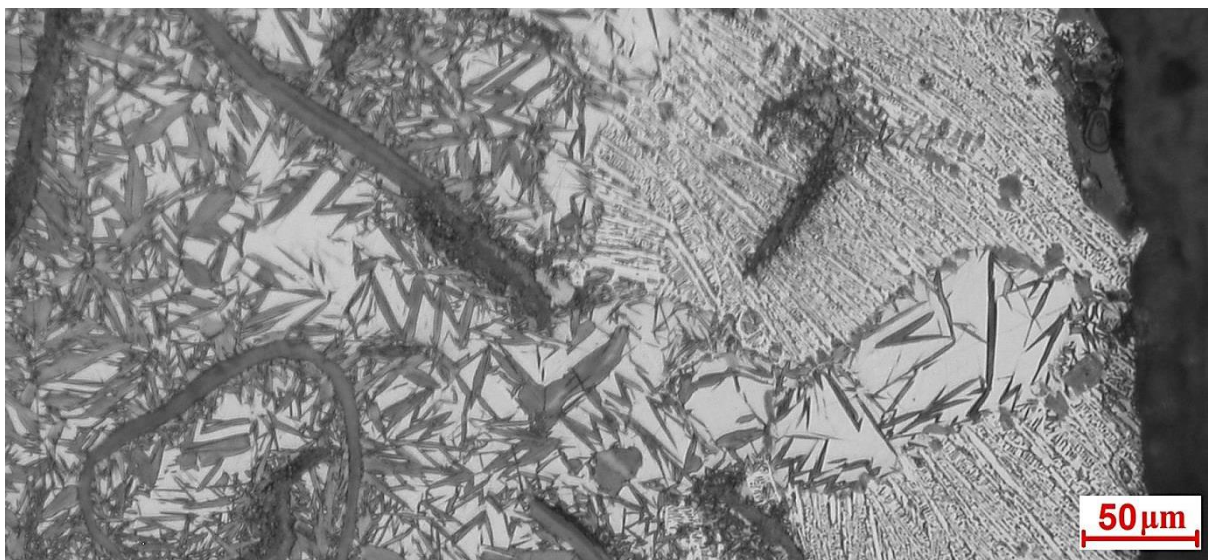


Obr. 56: Makroskopie vzorku č. 7 – technologie bez překryvu

Na obrázku 56 lze vidět souvislou zakalenou vrstvu. **Hloubka zakalené vrstvy od 1,4 mm do 1,5 mm.**

Oblast 1 - povrch

Na povrchu ledeburitické jehlice převážně do hloubky 0,1 mm, místy i nejsou. Dále hrubé jehlice martenzitu se zbytkovým austenitem (50 – 60 %) zasahují do hloubky 0,2 – 0,25 mm. Směrem k jádru zbytkový austenit ubývá a martenzit je jemnější. Pod ledeburitickými jehlicemi se vyskytuje lupínkový grafit.



Obr. 57: Vzorek č. 7 – oblast 1 (200x)

Oblast 2 – uprostřed zakalené vrstvy

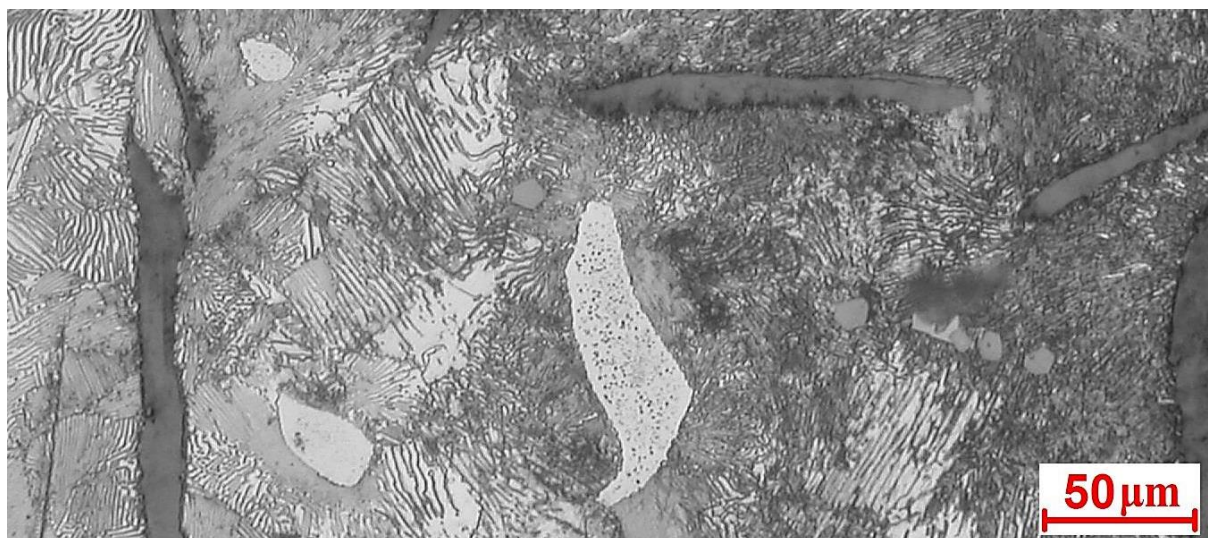
Druhá oblast je tvořena jemným martenzitem a lupínkovým grafitem.



Obr. 58: Vzorek č. 7 – oblast 2 (200x)

Oblast 3 – přechodová oblast

Struktura s velmi jemným martenzitem ostře přechází do základní struktury litiny. Dále oblast tvoří základní složky litiny.



Obr. 59: Vzorek č. 7 – oblast 3 (200x)

2.9.8 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 8

- s překryvem; výkon: 6000 W; rychlost: 17,5 cm/min

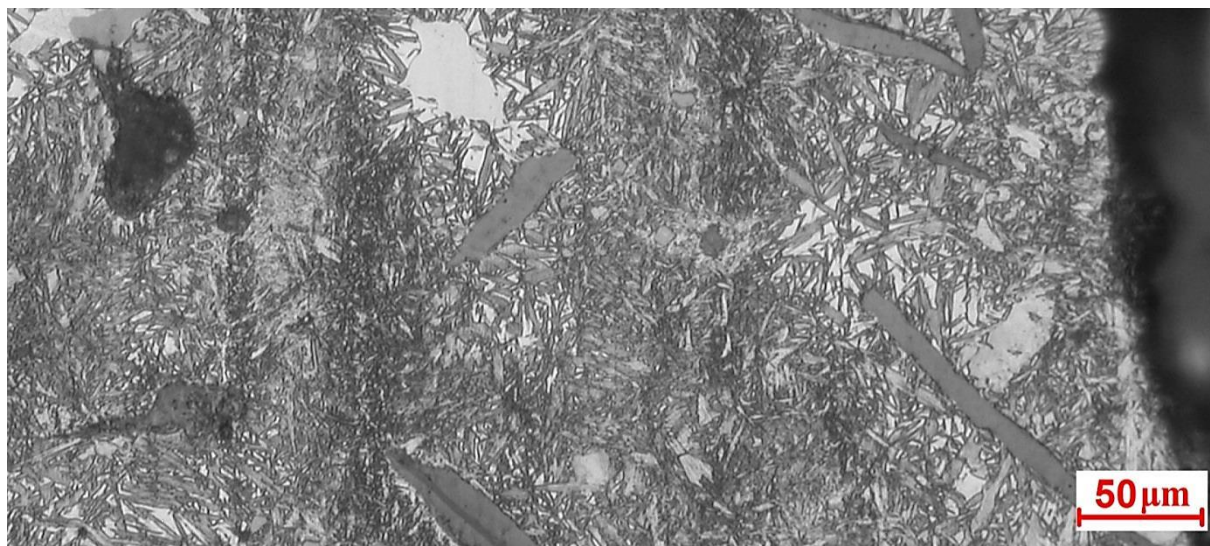


Obr. 60: Makroskopie vzorku č. 8 – technologie s překryvem

Na obrázku 60 lze vidět velmi nerovnoměrnou zakalenou vrstvu, která se v místě překryvu zmenšuje. **Největší tloušťka zakalené vrstvy dosahuje 1,4 mm, v nejmenší oblasti 0,5 mm (překryv).**

Oblast 1 - povrch

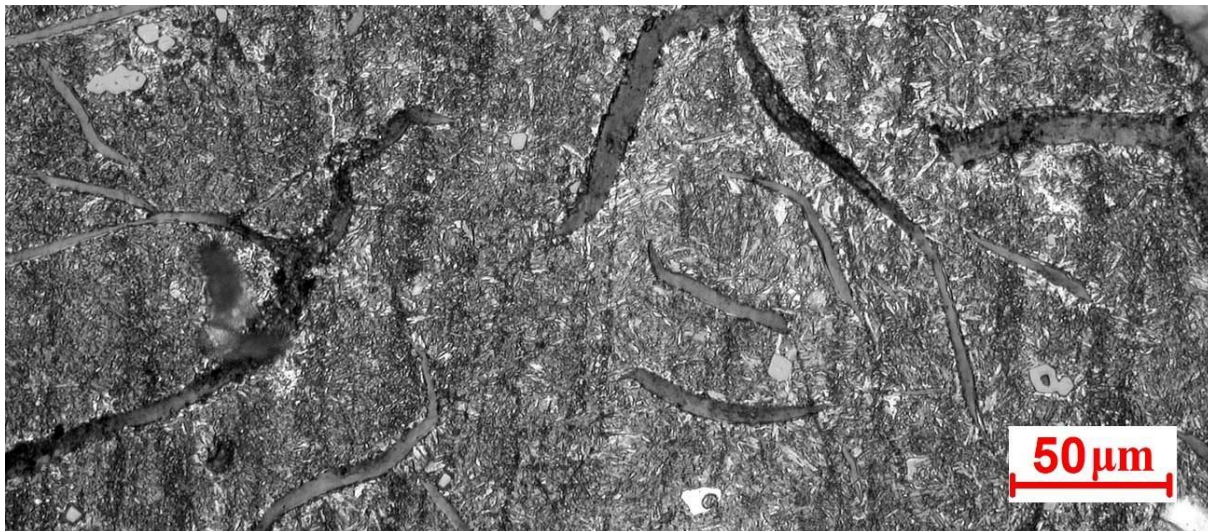
Na povrchu jsou vidět jehlice martenzitu a zbytkový austenit (35 – 40 %) do hloubky 0,15 mm, poté již jen jemný martenzit, který přechází do oblasti 2. Místy se v oblasti objevuje lupínkový grafit.



Obr. 61: Vzorek č. 8 – oblast 1 (200x)

Oblast 2 – uprostřed zakalené vrstvy

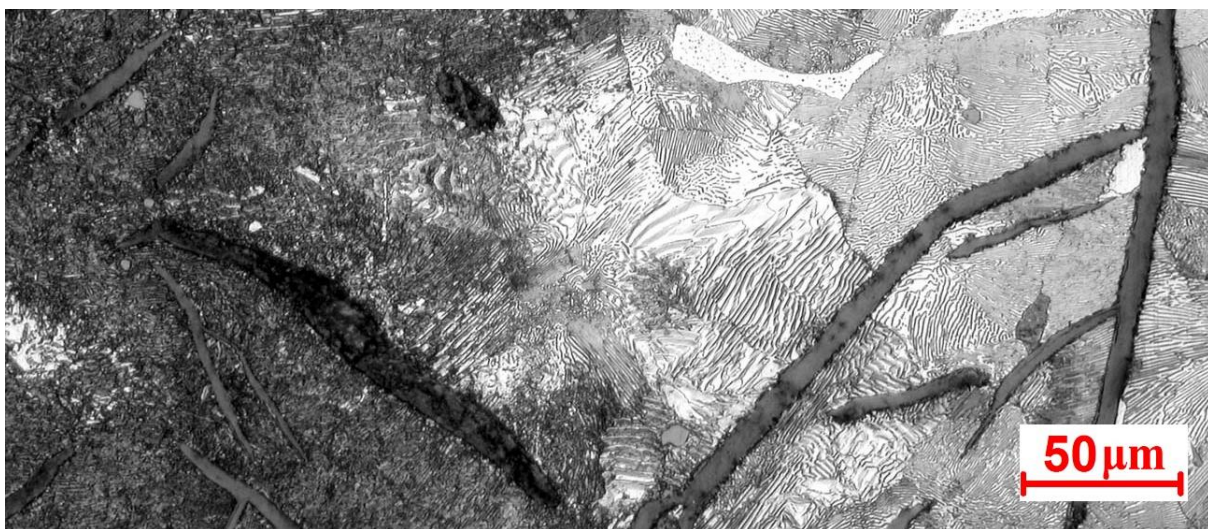
V druhé oblasti je převážně vidět jemný martenzit. Dále se zde objevuje lupínkový grafit.



Obr. 62: Vzorek č. 8 – oblast 2 (200x)

Oblast 3 – přechodová oblast

Struktura s velmi jemným martenzitem přechází ostře do základního materiálu litiny. Oblast dále tvoří základní složky litiny.



Obr. 63: Vzorek č. 8 – oblast 3 (200x)

2.9.9 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 9

- bez překryvu; výkon: 6000 W; rychlost: 15,0 cm/min

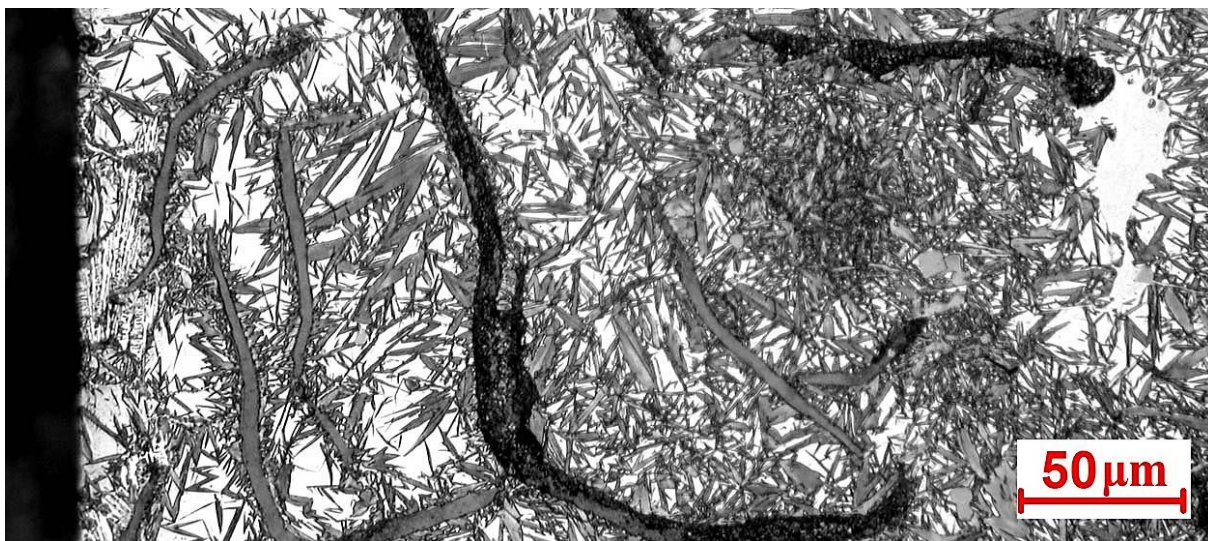


Obr. 64: Makroskopie vzorku č. 9 – technologie bez překryvu

Na obrázku 64 lze vidět souvislou zakalenou vrstvu. **Hloubka zakalené vrstvy od 1,6 mm do 1,7 mm.**

Oblast 1 - povrch

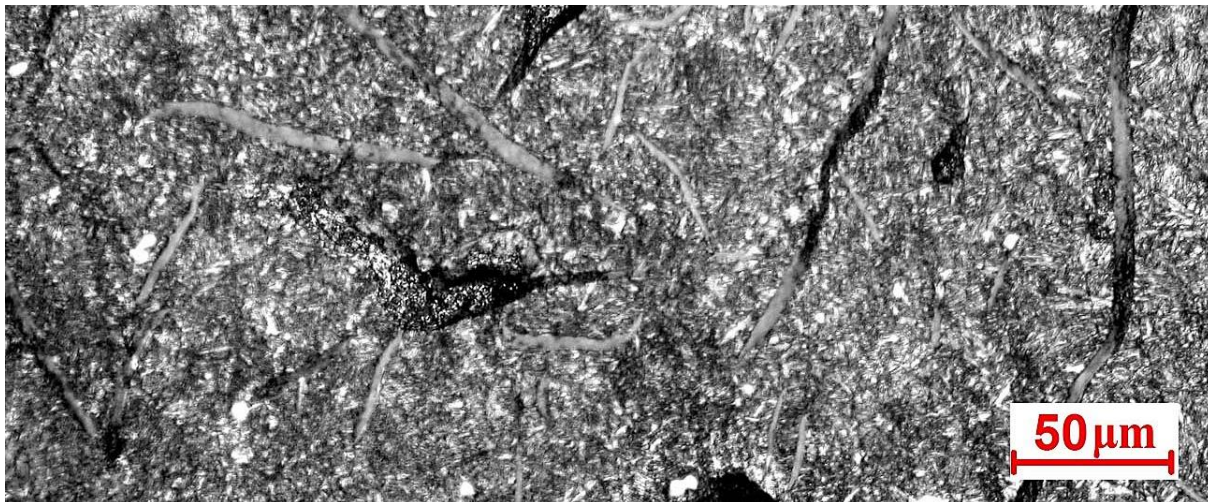
Na povrchu je místy ledeburit zasahující do hloubky 0,15 mm, dále hrubší jehlice martenzitu se zbytkovým austenitem (cca 50 %) do hloubky 0,3 až 0,35 mm. Ve struktuře je dále lupínkový grafit. Na druhé straně vzorku se vyskytuje velmi ojediněle ledeburit, jinak je struktura stejná.



Obr. 65: Vzorek č. 9 – oblast 1 (200x)

Oblast 2 – uprostřed zakalené vrstvy

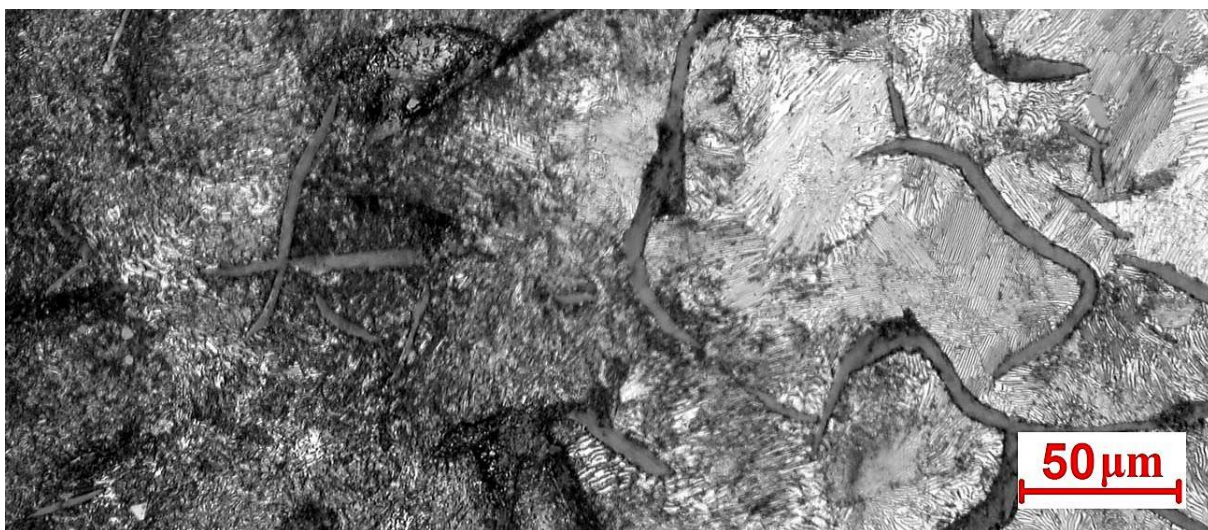
V druhé oblasti je převážně vidět jemný martenzit. Místy se objevuje lupínkový grafit.



Obr. 66: Vzorek č. 9 – oblast 2 (200x)

Oblast 3 – přechodová oblast

Oblast s velmi jemným martenzitem ostře přechází do základní struktury litiny. V oblasti s velmi jemným martenzitem se také vyskytuje lupínkový grafit



Obr. 67: Vzorek č. 9 – oblast 3 (200x)

2.9.10 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 10

- s překryvem; výkon: 6000 W; rychlost: 15,0 cm/min

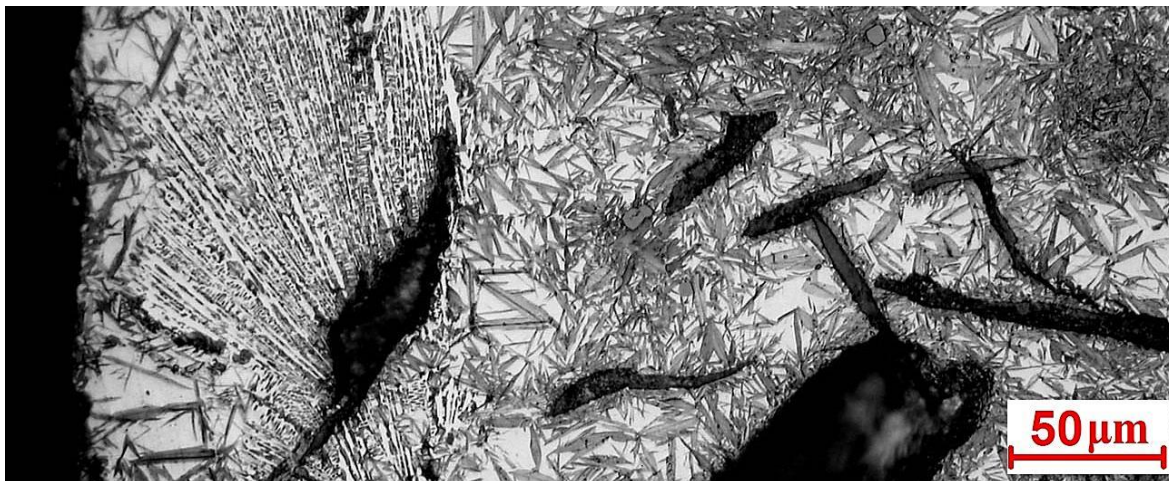


Obr. 68: Makroskopie vzorku č. 10 – technologie s překryvem

Na obrázku 68 je vidět nerovnoměrná zakalená vrstva, která se v místě překryvu zmenšuje. Největší tloušťka zakalené vrstvy dosahuje 1,6 mm, v nejmenší oblasti 0,7 mm (překryv).

Oblast 1 - povrch

Na povrchu je místy ledeburit zasahující do hloubky 0,15 mm. Nikde není souvislá vrstva. V ledeburitu se vyskytují vždy hrubé jehlice martenzitu se zbytkovým austenitem (50 – 60 %). Pod ledeburitem se nachází také hrubší jehlice martenzitu se zbytkovým austenitem (50 %), kterého směrem do oblasti 2 rapidně ubývá. V oblasti je dále vidět lupínkový grafit.



Obr. 69: Vzorek č. 10 – oblast 1 (200x)

Oblast 2 – uprostřed zakalené vrstvy

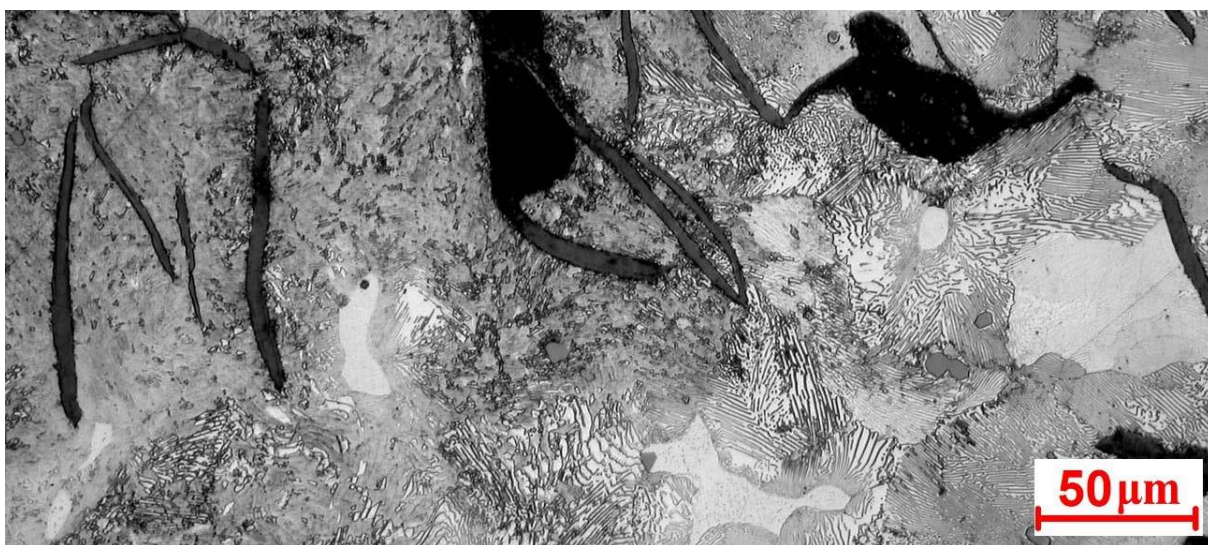
V druhé oblasti je vidět jemný martenzit s ojedinělými zrnky feritu, kterého směrem do jádra přibývá. Oblast je dále tvořena lupínkovým grafitem.



Obr. 70: Vzorek č. 10 – oblast 2 (200x)

Oblast 3 – přechodová oblast

Struktura s velmi jemným martenzitem a drobnými zrnky feritu ostře přechází do základní struktury litiny. V oblasti s velmi jemným martenzitem se také vyskytuje lupínkový grafit.



Obr. 71: Vzorek č. 10 – oblast 3 (200x)

2.9.11 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 11

- bez překryvu; teplota: 1190 °C; rychlost: 15,0 cm/min



Obr. 72: Makroskopie vzorku č. 11 – technologie bez překryvu

Na obrázku 72 lze vidět souvislou zakalenou vrstvu. **Hloubka zakalené vrstvy od 1,4 mm do 1,6 mm.**

Oblast 1 - povrch

Z jedné strany vzorku je na povrchu téměř souvislá ledeburitická vrstva zasahující do hloubky 0,15 – 0,18 mm, dále do hloubky 0,35 – 0,4 mm tvoří mikrostrukturu hrubší jehlice martenzitu se zbytkovým austenitem (okolo 40 %), kterého do jádra prudce ubývá. V oblasti s martenzitem se také vyskytuje lupínkový grafit.



Obr. 73: Vzorek č. 11 – oblast 1 (200x)

Oblast 2 – uprostřed zakalené vrstvy

V druhé oblasti je vidět jemný martenzit bez výraznějších jehlic s velmi malým podílem zbytkového austenitu a ojedinělými zrny feritu zasahujícími do hloubky 0,5 – 0,7 mm. Dále strukturu místy tvoří výrazný lupínkový grafit.



Obr. 74: Vzorek č. 11 – oblast 2 (200x)

Oblast 3 – přechodová oblast

Struktura je tvořena velmi jemným martenzitem, lamelárním perlitem a dalšími složky litiny (zrny fosfidového eutektika, lupínkovým grafitem – tyto složky jsou patrné i v povrchově tepelně ovlivněné vrstvě).



Obr. 75: Vzorek č. 11 – oblast 3 (200x)

2.9.12 Makroskopie a mikroskopie vzorku č. 12

- bez překryvu; teplota: 1150 °C; rychlost: 15,0 cm/min



Obr. 76: Makroskopie vzorku č. 12 – technologie bez překryvu

Na obrázku 76 lze vidět souvislou zakalenou vrstvu. **Hloubka zakalené vrstvy od 1,3 mm do 1,5 mm.**

Oblast 1 - povrch

Nesouvislá vrstva ledeburitu do hl. 0,1 – 0,12 mm, dále hrubší jehlice martenzitu a zbytkového austenitu (40 – 50 %) zasahuje do hloubky 0,3 – 0,35 mm, kterého směrem k jádru prudce ubývá. Pod nesouvislou vrstvou ledeburitu se také objevuje lupínkový grafit.



Obr. 77: Vzorek č. 12 – oblast 1 (200x)

Oblast 2 – uprostřed zakalené vrstvy

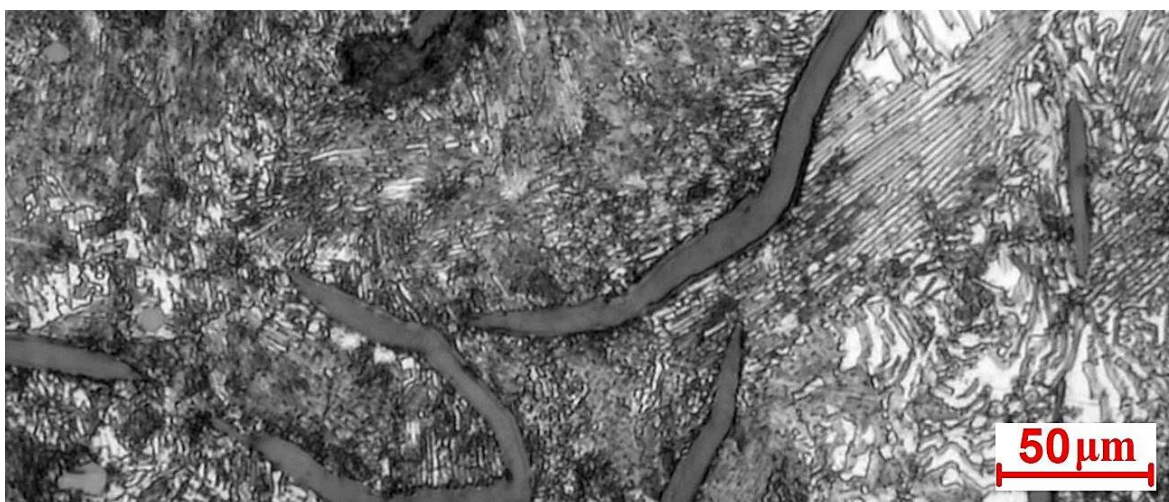
V druhé oblasti je velmi jemný martenzit s velmi malým podílem zbytkového austenitu. V této tepelně ovlivněné oblasti se dále vyskytují základní složky litiny.



Obr. 78: Vzorek č. 12 – oblast 2 (200x)

Oblast 3 – přechodová oblast

Velmi jemný martenzit bez výrazné jehlicové struktury a drobná zrnka feritu přechází ostře do základní struktury litiny. Zakalená oblast také tvořena lupínkovým grafitem.



Obr. 79: Vzorek č. 12 – oblast 3 (200x)

2.10 Měření mikrotvrdoti

Mikrotvrdot byla změřena na příčném řezu zakalené vrstvy po naleptání mikrotvrdoměrem MICROMET 2100 Series (Buehler), který je opatřen kamerou. **Pomocí normy ČSN EN ISO 4516 byly stanoveny parametry zkoušky.** Pro výběr zkušebního zatížení (vnikací těleso podle Vickerse) bylo kritérium tvrdost povlaku. **Jelikož zkoumané vzorky měly tvrdost větší než 300 HV, bylo stanoveno zkušební zatížení $F = 0,981 \text{ N}$ (podmínky zkoušky HV 0,1).** Doba působení zkušebního zatížení byla nastavena na 10 s. Zkouška proběhla při teplotě 24 °C.

Výpočet aritmetického průměru obou jednotlivě měřených úhlopříček:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

d – měřená úhlopříčka [μm]

Výpočet tvrdosti podle Vickerse:

$$HV = \frac{0,102 F}{A_v} = 189,1 \times 10^6 \frac{F}{d^2}$$

A_v – plocha šikmého povrchu vtisku [mm^2]

F – zkušební zatížení [N]

Výpočet směrodatné odchylky

$$s = \sqrt{\frac{\sum(\overline{HV} - HV)^2}{(n - 1)}}$$

$$\overline{HV} = \sum HV / n$$

n – počet měření

Příklad značení tvrdosti pro vzorek č. 1 (vzdálenost 20 μm od povrchu)

821,8 HV 0,1 – mikrotvrдость podle Vickerse 821,8 stanovená použitím zkušebního zatížení 0,981 N po dobu 10 s.



Obr. 80: Mikrotvrdoměr MICROMET 2100 Series (Buehler)

Pro všechny vzorky:

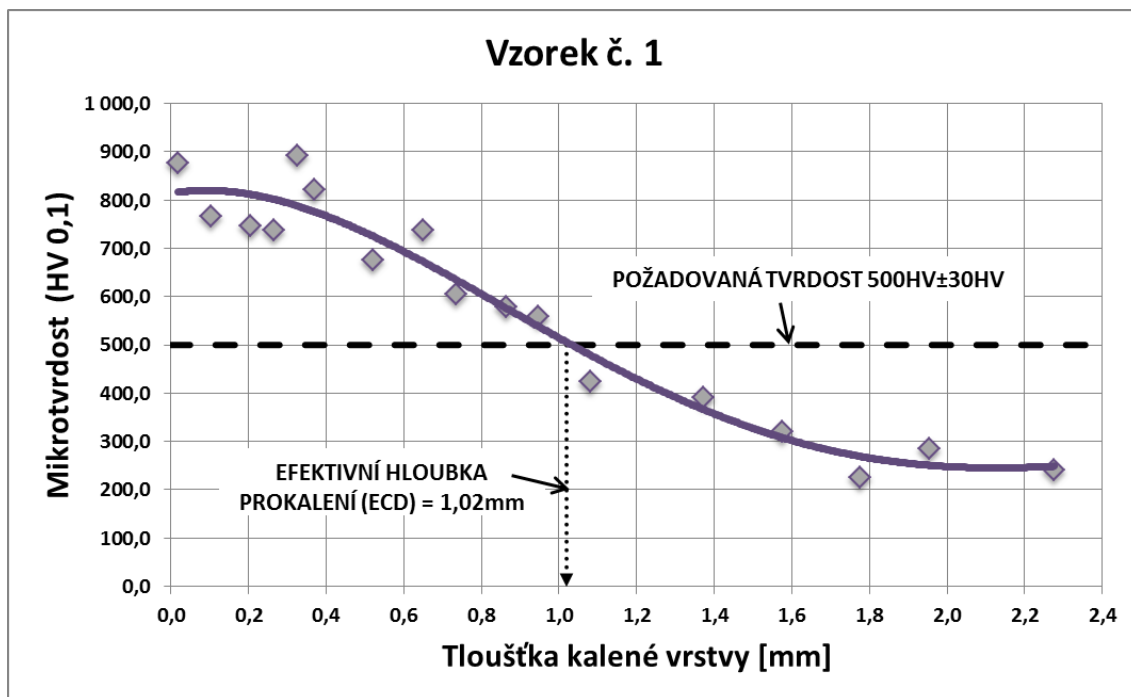
| | |
|-----------------------|---------|
| Metoda: | Vickers |
| Objektiv: | 40 x |
| Zatížení: | 100 g |
| Doba zatížení: | 10 s |

Tabulky s hodnotami mikrotvrdsti pro jednotlivé vzorky jsou obsahem přílohy H.

Vzorek č. 1

(bez překryvu; výkon: 4660 W; rychlost: 12,5 cm/min)

Graf 2: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 1



Minimum: 225,6

Maximum: 892,3

Efektivní hloubka prokalení

Mezní tvrdost: 500

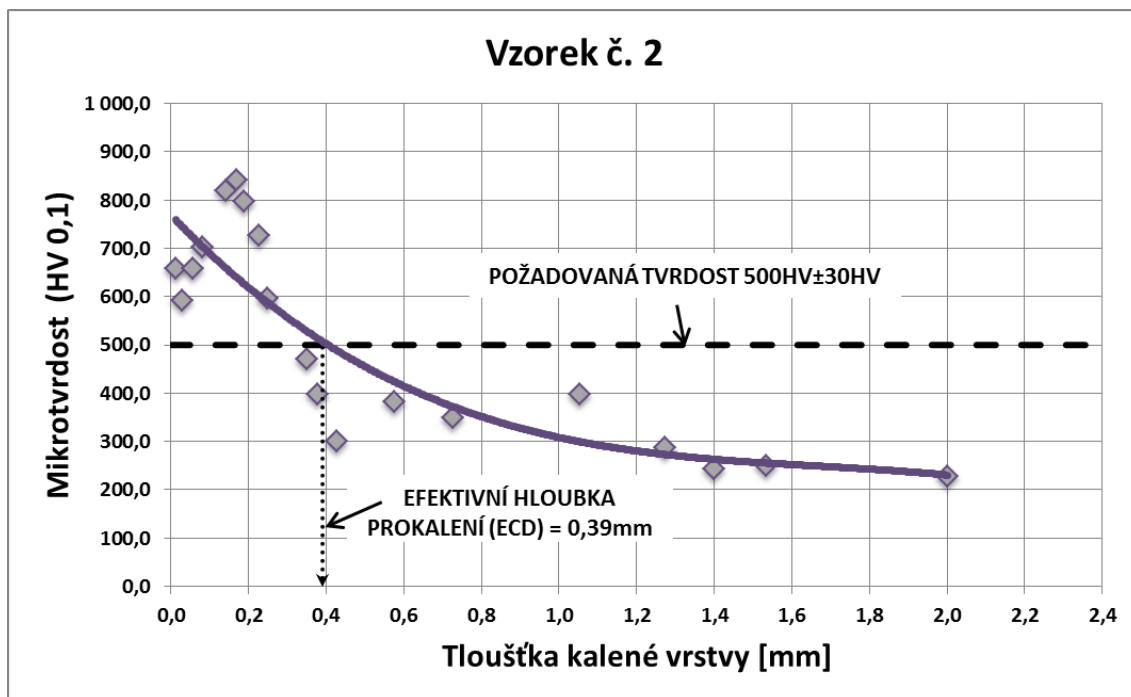
(podle výrobního předpisu)

ECD [mm]: 1,02

Vzorek č. 2

(s překryvem; výkon: 4660 W; rychlost: 12,5 cm/min)

Graf 3: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 2



Minimum: 226,7

Maximum: 841,6

Efektivní hloubka prokalení

Mezní tvrdost: 500

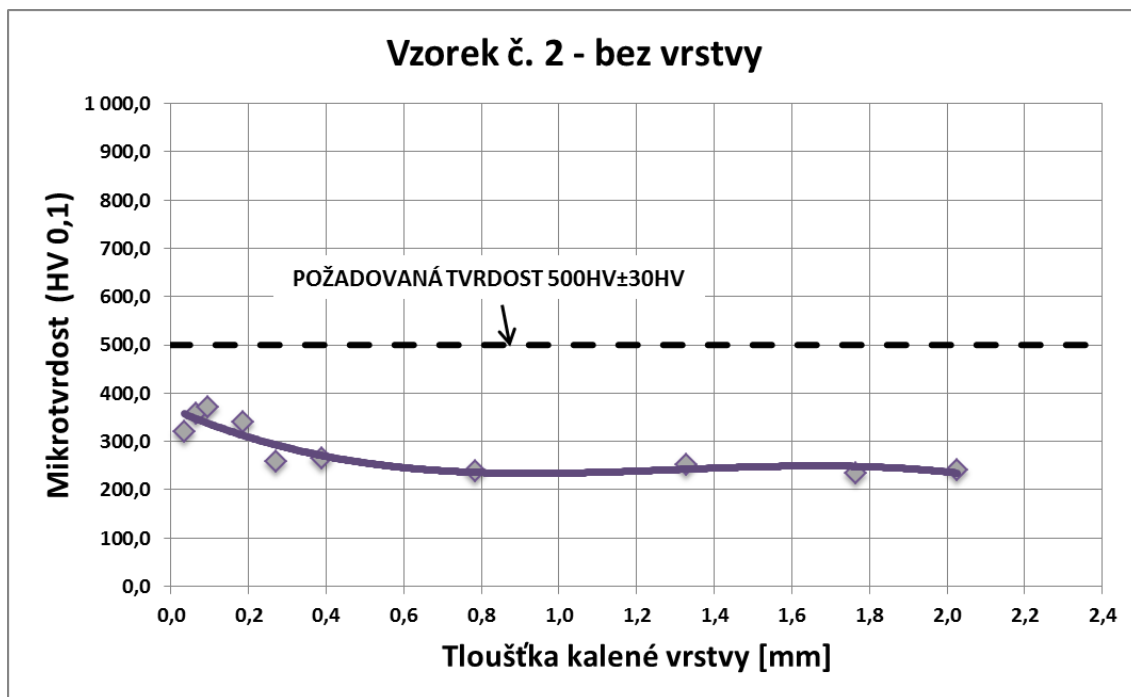
(podle výrobního předpisu)

ECD [mm]: 0,39

Vzorek č. 2 – oblast bez vrstvy

(s překryvem; výkon: 4660 W; rychlost: 12,5 cm/min)

Graf 4: Průběh mikrotvrdości vzorku č. 2 – oblast bez vrstvy



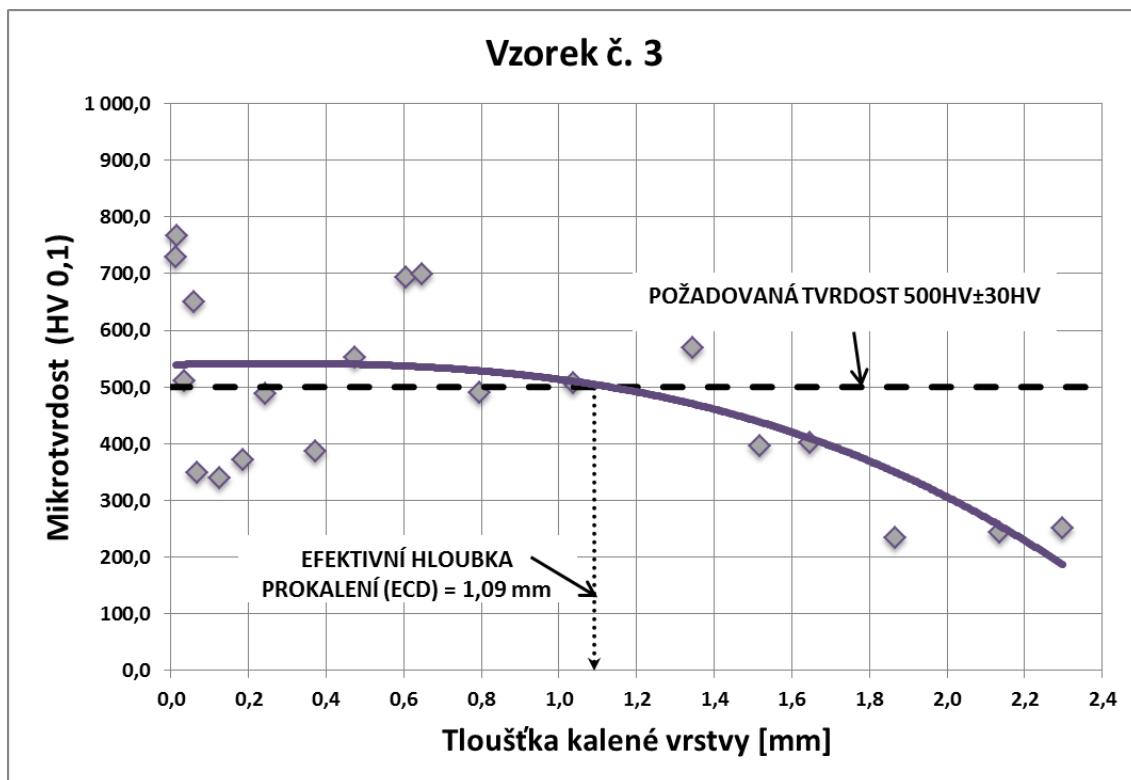
Minimum: 235,2

Maximum: 371,7

Vzorek č. 3

(bez překryvu; výkon: 5500 W; rychlost: 12,5 cm/min)

Graf 5: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 3



Minimum: 234,6

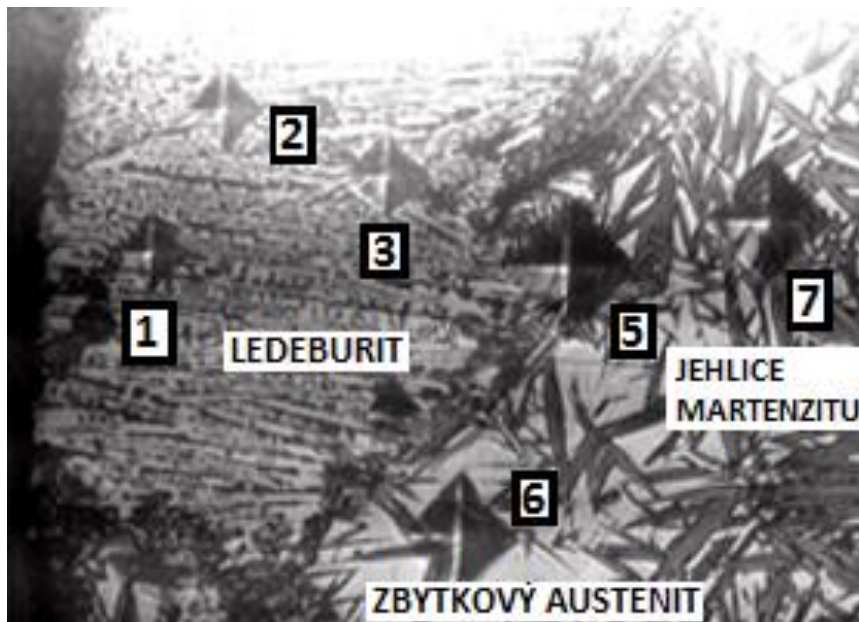
Maximum: 767,3

Efektivní hloubka prokalení

Mezní tvrdost: 500

(podle výrobního předpisu)

ECD [mm]: 1,09



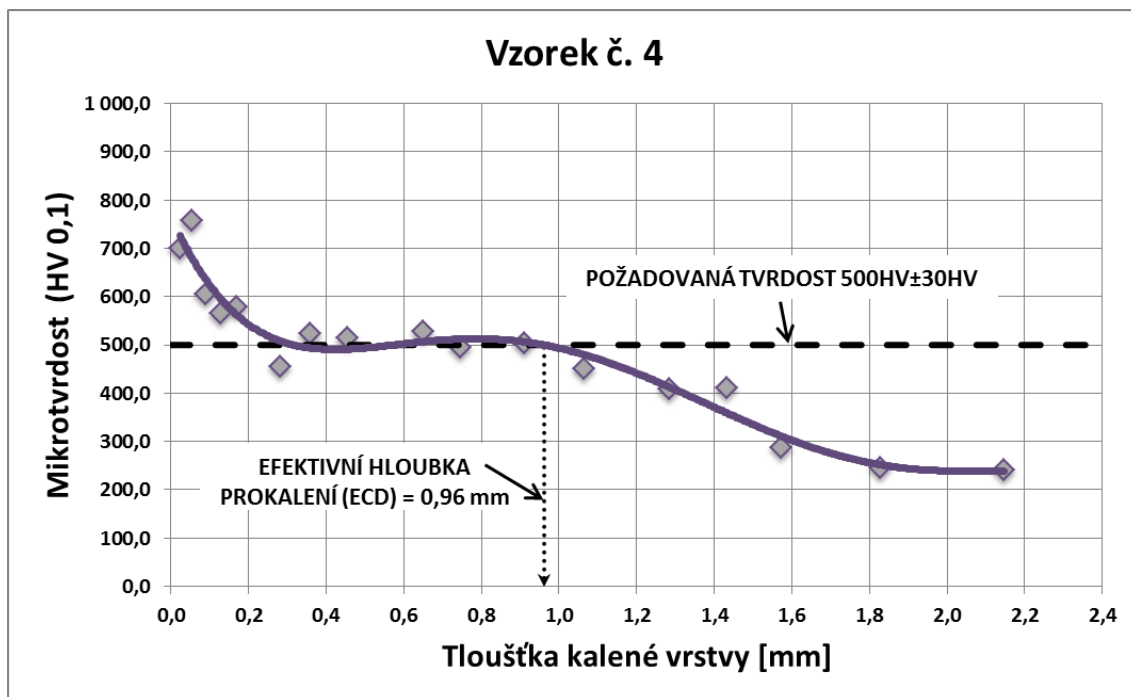
Obr. 81: Vtisky u vzorku č. 3

Na obrázku viz výše je vidět, že vtisky do jednotlivých fází jsou různé. Nejmenší vtisky jsou do ledeburitu (největší tvrdost). Naopak největší vtisky jsou do zbytkového austenitu (nejmenší tvrdost). S rostoucím podílem zbytkového austenitu klesá tvrdost. **Tvrdost, která úzce souvisí s odolností proti opotřebení, nejvíce závisí na struktuře, složení litiny a především tvaru grafitu.**

Vzorek č. 4

(s překryvem; výkon: 5500 W; rychlost: 12,5 cm/min)

Graf 6: Průběh mikrotvrdości vzorku č. 4



Minimum: 241,5

Maximum: 756,7

Efektivní hloubka prokalení

Mezní tvrdost: 500

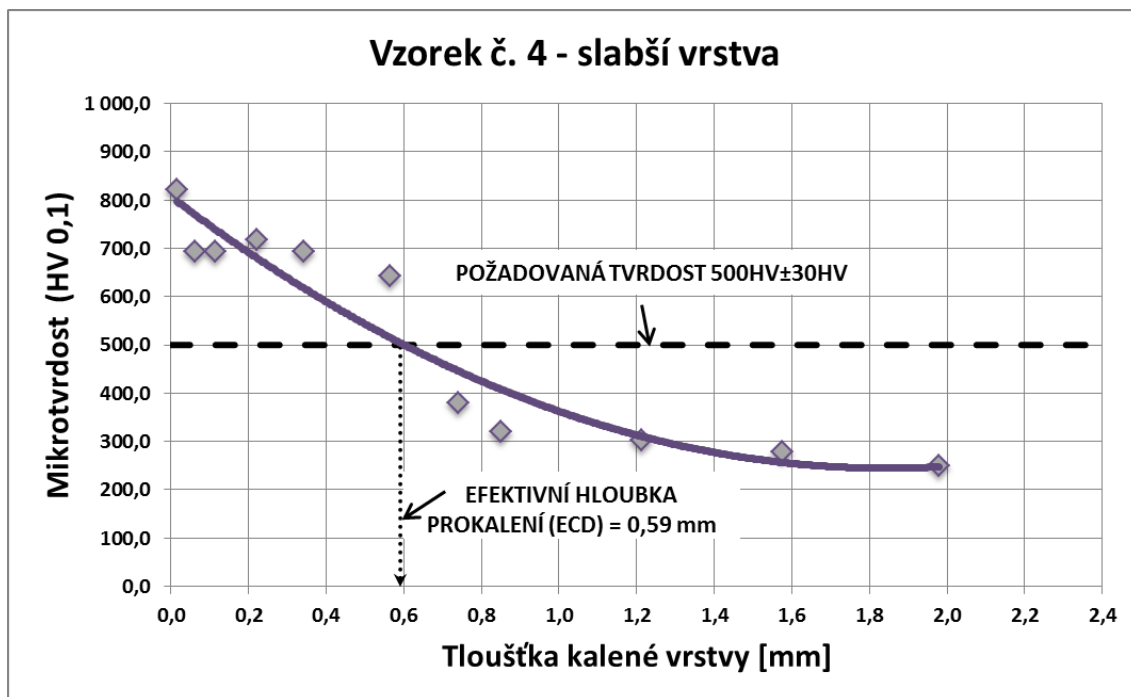
(podle výrobního předpisu)

ECD [mm]: 0,96

Vzorek č. 4 – slabší vrstva

(s překryvem; výkon: 5500 W; rychlost: 12,5 cm/min)

Graf 7: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 4 - slabší vrstva



Minimum: 249,4

Maximum: 821,3

Efektivní hloubka prokalení

Mezní tvrdost: 500

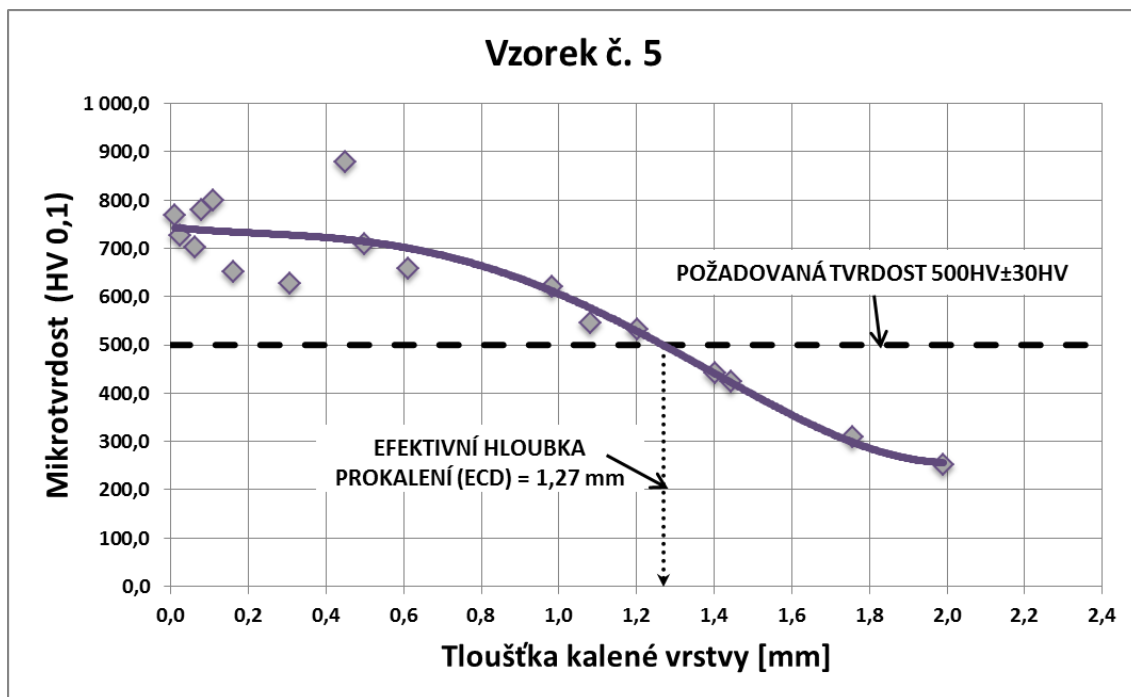
(podle výrobního předpisu)

ECD [mm]: 0,59

Vzorek č. 5

(bez překryvu; výkon: 4660 W; rychlost: 10 cm/min)

Graf 8: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 5



Minimum: 251,3

Maximum: 879,7

Efektivní hloubka prokalení

Mezní tvrdost: 500

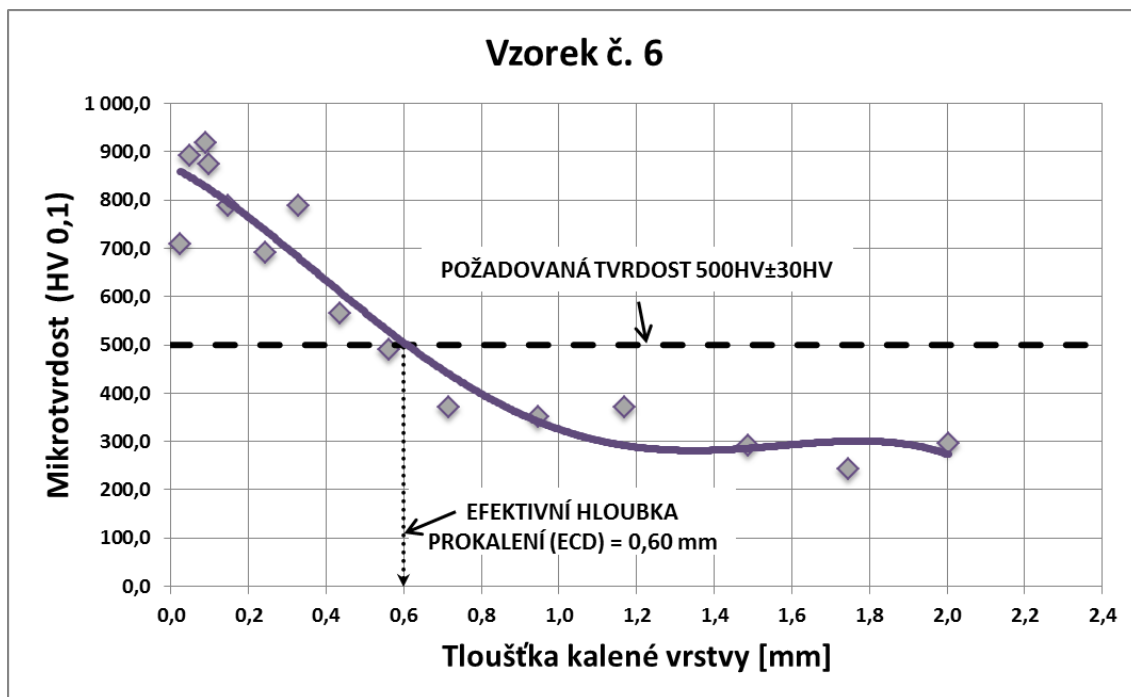
(podle výrobního předpisu)

ECD [mm]: 1,27

Vzorek č. 6

(s překryvem; výkon: 4660 W; rychlost: 10 cm/min)

Graf 9: Průběh mikrotvrdomosti vzorku č. 6



Minimum: 242,3

Maximum: 919,6

Efektivní hloubka prokalení

Mezní tvrdost: 500

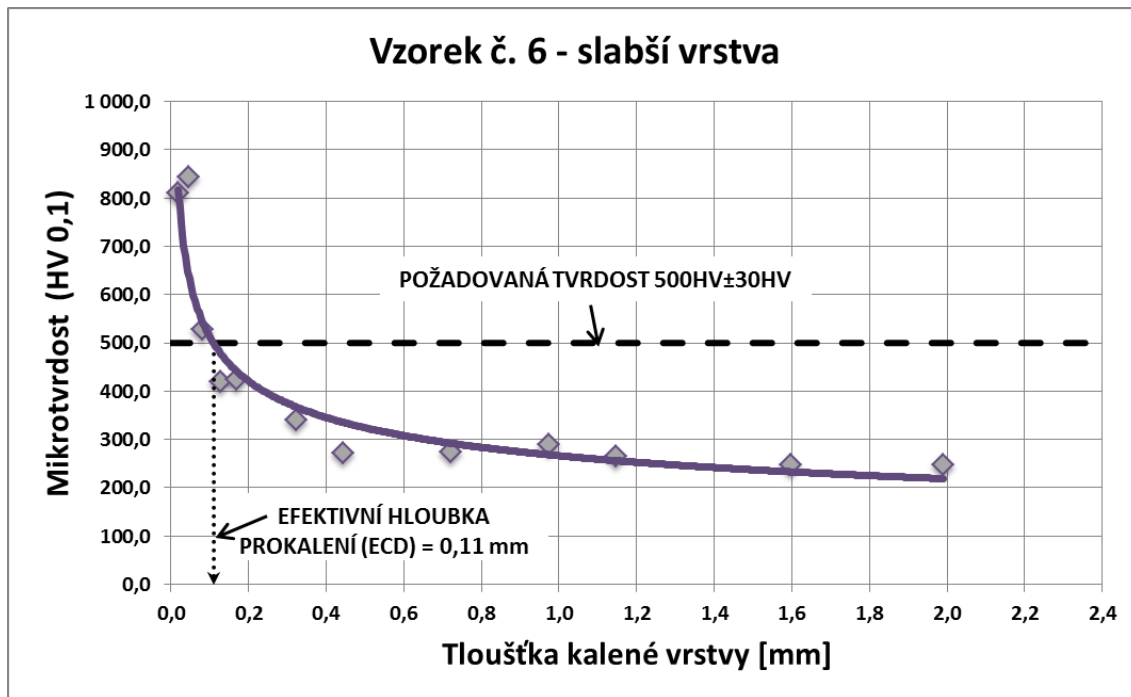
(podle výrobního předpisu)

ECD [mm]: 0,60

Vzorek č. 6 – slabší vrstva

(s překryvem; výkon: 4660 W; rychlost: 10 cm/min)

Graf 10: Průběh mikrotvrdomi vzorku č. 6 – slabší vrstva



Minimum: 246,7

Maximum: 842,9

Efektivní hloubka prokalení

Mezní tvrdost: 500

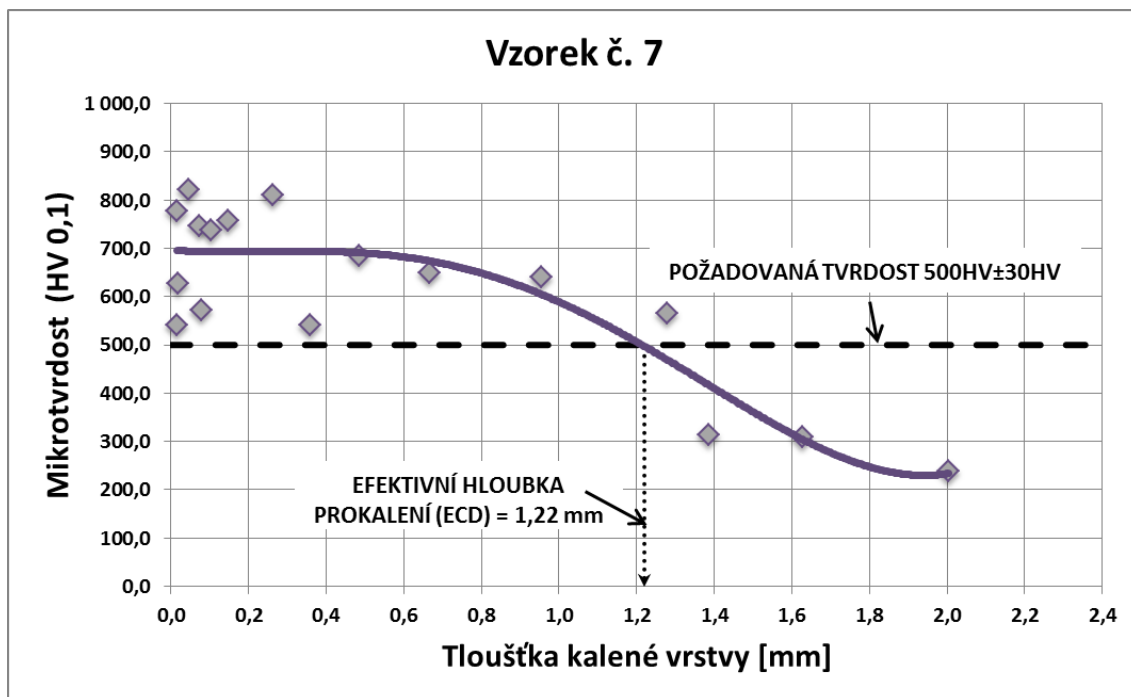
(podle výrobního předpisu)

ECD [mm]: 0,11

Vzorek č. 7

(bez překryvu; výkon: 6000 W; rychlost: 17,5 cm/min)

Graf 11: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 7



Minimum: 237,9

Maximum: 821,5

Efektivní hloubka prokalení

Mezní tvrdost: 500

(podle výrobního předpisu)

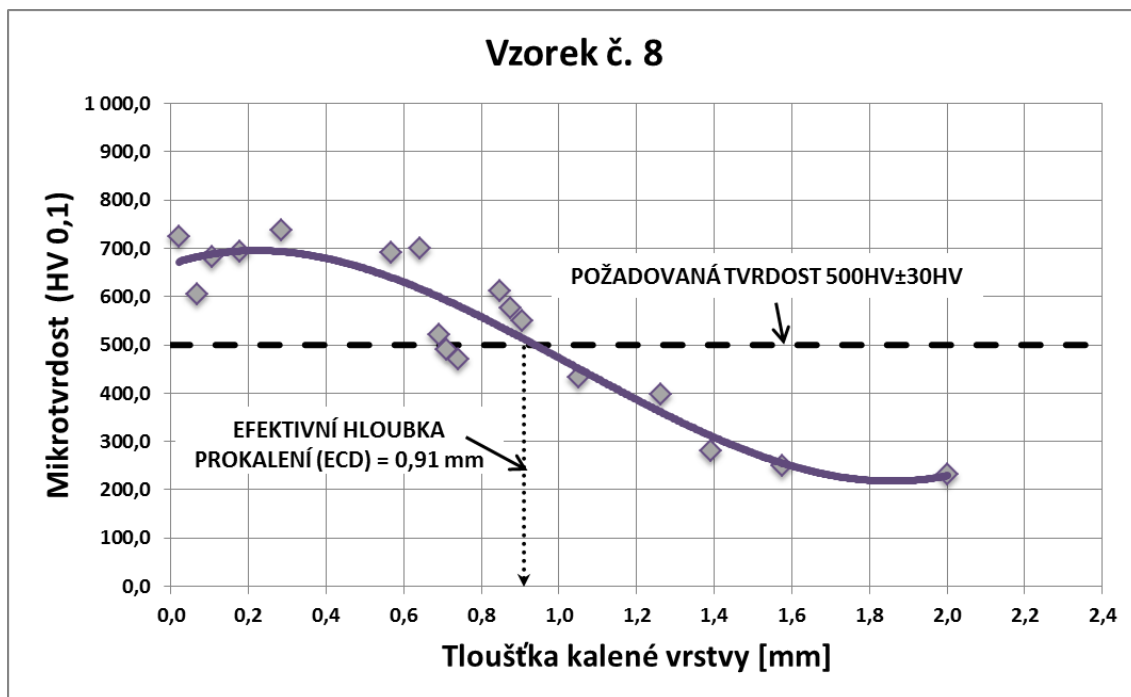
ECD [mm]: 1,22

Vyšší hodnoty tvrdosti v blízkosti povrchu patří ledeburitu a nižší hodnoty tvrdosti náleží martenzitu a zbytkovému austenitu (cca 50 %). Vyšší hodnoty tvrdosti dále od povrchu patří jemnému martenzitu s velmi malým podílem zbytkového austenitu a nižší hodnoty tvrdosti náleží martenzitu s menším podílem zbytkového austenitu.

Vzorek č. 8

(s překryvem; výkon: 6000 W; rychlost: 17,5 cm/min)

Graf 12: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 8



Minimum: 232,5

Maximum: 738,6

Efektivní hloubka prokalení

Mezní tvrdost: 500

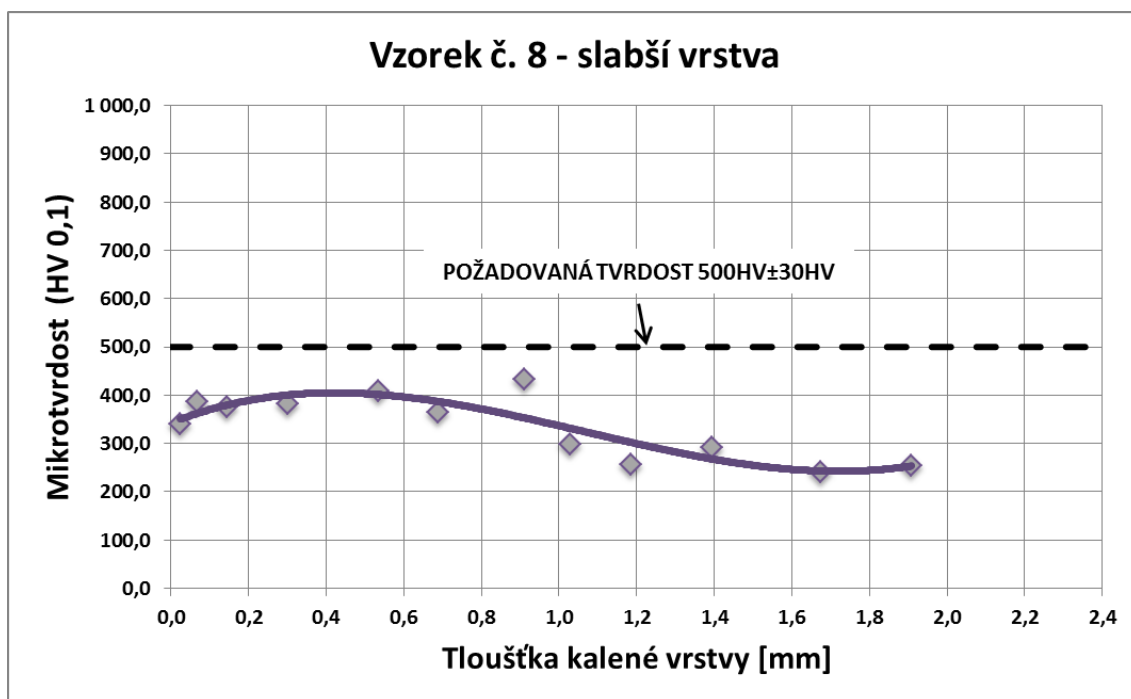
(podle výrobního předpisu)

ECD [mm]: 0,91

Vzorek č. 8 – slabší vrstva

(s překryvem; výkon: 6000 W; rychlost: 17,5 cm/min)

Graf 13: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 8 – slabší vrstva



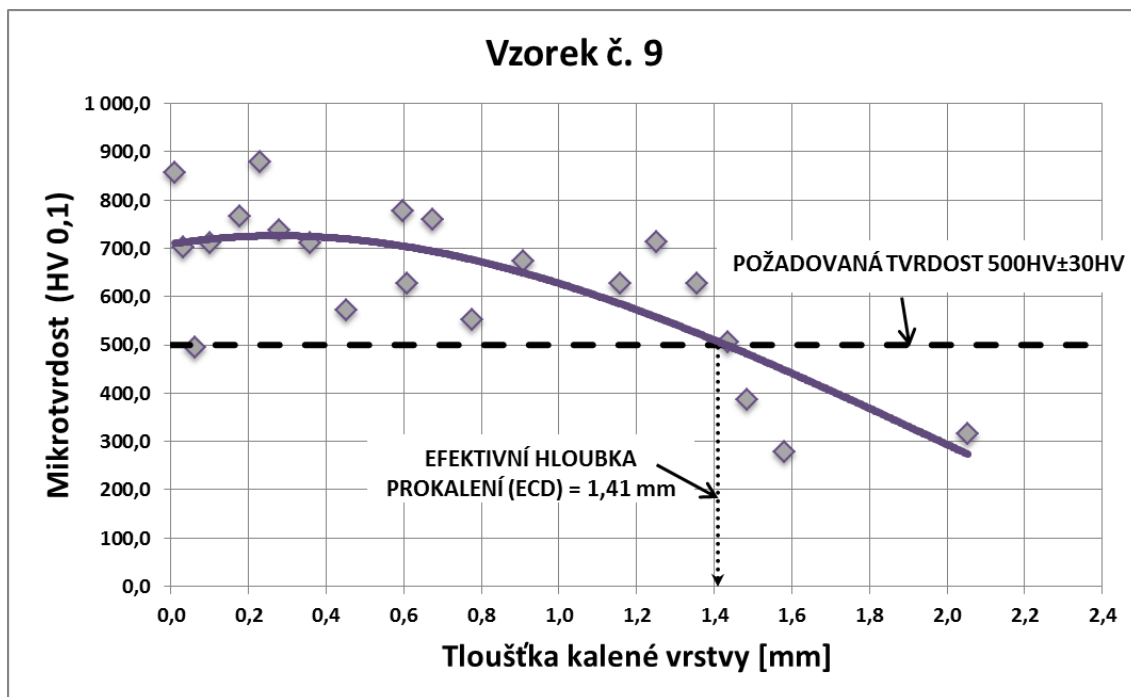
Minimum: 241,6

Maximum: 433,5

Vzorek č. 9

(bez překryvu; výkon: 6000 W; rychlost: 15 cm/min)

Graf 14: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 9



Minimum: 277,6

Maximum: 879,0

Efektivní hloubka prokalení

Mezní tvrdost: 500

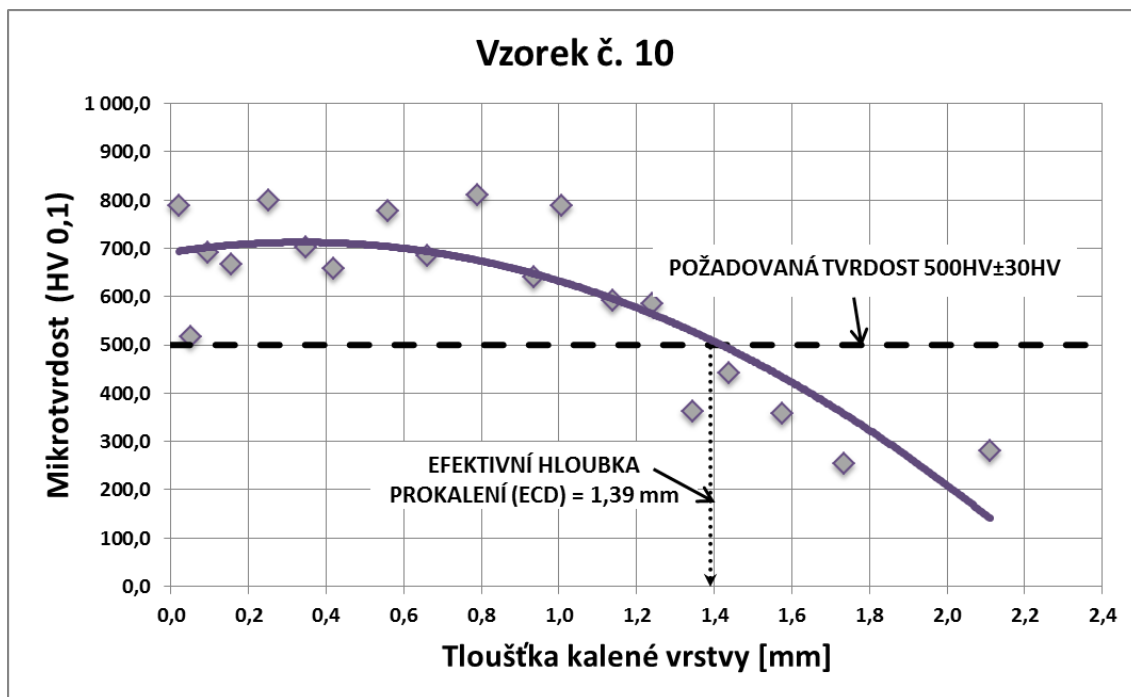
(podle výrobního předpisu)

ECD [mm]: 1,41

Vzorek č. 10

(s překryvem; výkon: 6000 W; rychlost: 15 cm/min)

Graf 15: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 10



Minimum: 255,0

Maximum: 810,2

Efektivní hloubka prokalení

Mezní tvrdost: 500

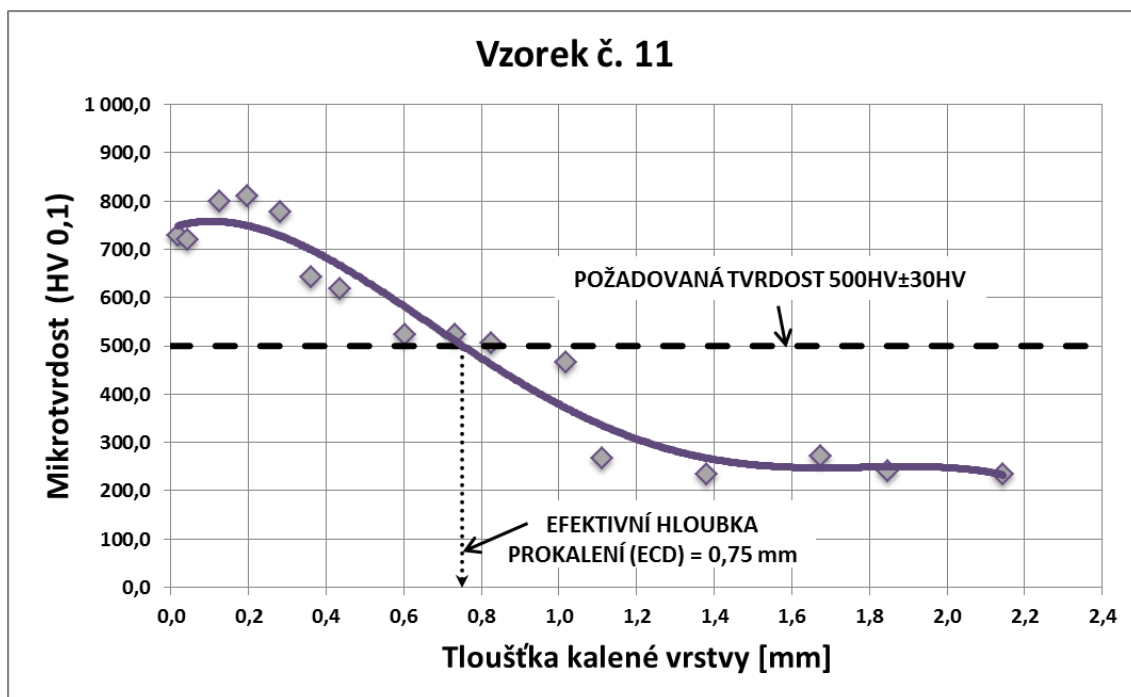
(podle výrobního předpisu)

ECD [mm]: 1,39

Vzorek č. 11

(bez překryvu; teplota: 1190 °C; rychlost: 15,0 cm/min)

Graf 16: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 11



Minimum: 233,3

Maximum: 810,1

Efektivní hloubka prokalení

Mezní tvrdost: 500

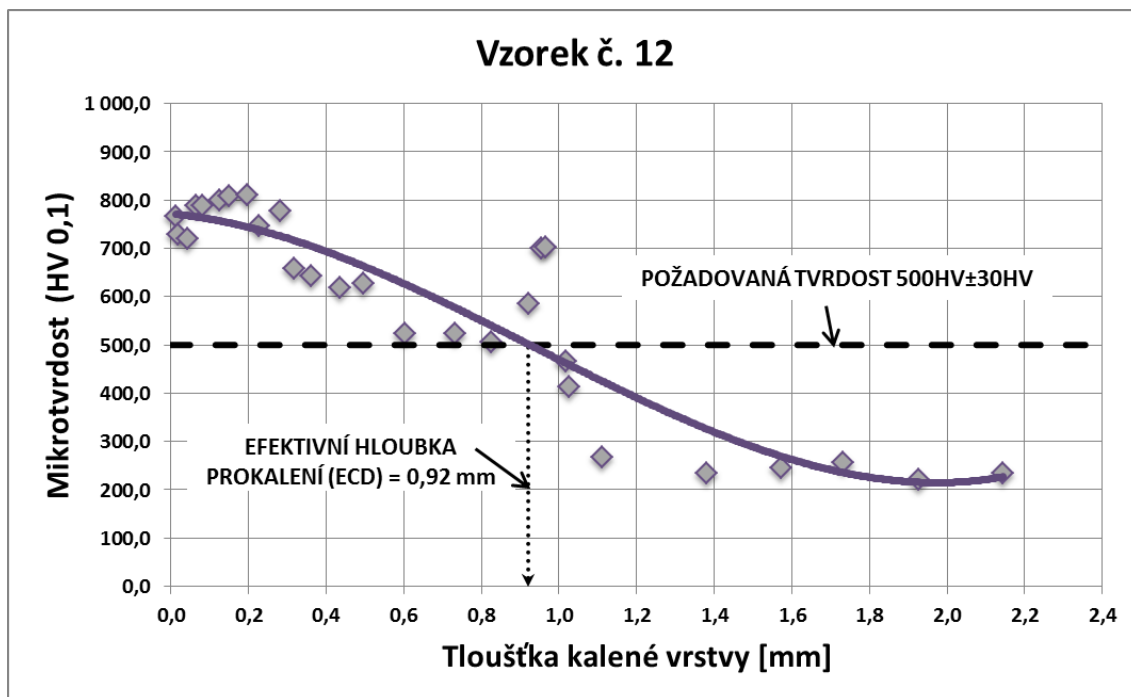
(podle výrobního předpisu)

ECD [mm]: 0,75

Vzorek č. 12

(bez překryvu; teplota: 1150 °C; rychlost: 15,0 cm/min)

Graf 17: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 12



Minimum: 221,9

Maximum: 810,1

Efektivní hloubka prokalení

Mezní tvrdost: 500

(podle výrobního předpisu)

ECD [mm]: 0,92

2.11 Hodnocení výsledků

Shrnutí výsledků (jednotlivých parametrů laserového povrchového kalení) je přehledně zobrazeno v tabulce 5.

Tab. 5: Hodnocení výsledků laserového kalení

| Hodnocení výsledků laserového kalení | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------|-----------|--------------|-------------------|---------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Číslo vzorku | Parametry laserového kalení | | | | | Naměřené hodnoty | | | |
| | Řízeno | Výkon [W] | Teplota [°C] | Rychlost [cm/min] | Použitá technologie | Průměrná povrch. tvrdost [HV] | **ECD [mm] - v místě bez překryvu | **ECD [mm] - v místě překryvu | maximální hloubka ledeburitu [mm] |
| 1 | výkonem | 4660* | - | 12,5* | bez překryvu | 787 | 1,02 | - | není |
| 2 | výkonem | 4660* | - | 12,5* | s překryvem | 799 | 0,39*** | nedosahuje | není |
| 3 | výkonem | 5500 | - | 12,5 | bez překryvu | 770 | 1,09 | - | 0,15 |
| 4 | výkonem | 5500 | - | 12,5 | s překryvem | 751 | 0,96*** | 0,59 | 0,20 |
| 5 | výkonem | 4660 | - | 10,0 | bez překryvu | 806 | 1,27 | - | 0,15 |
| 6 | výkonem | 4660 | - | 10,0 | s překryvem | 765 | 0,6*** | 0,11 | není |
| 7 | výkonem | 6000 | - | 17,5 | bez překryvu | 830 | 1,22 | - | 0,10 |
| 8 | výkonem | 6000 | - | 17,5 | s překryvem | 821 | 0,91*** | nedosahuje | není |
| 9 | výkonem | 6000 | - | 15,0 | bez překryvu | 825 | 1,41 | - | 0,15 |
| 10 | výkonem | 6000 | - | 15,0 | s překryvem | 814 | 1,39*** | 0,61 | 0,15 |
| 11 | teplotou | - | 1190 | 15,0 | bez překryvu | 835 | 0,75 | - | 0,18 |
| 12 | teplotou | - | 1190 | 15,0 | bez překryvu | 831 | 0,92 | - | 0,12 |

* - Při těchto parametrech se běžně kalí ve firmě TOS Varnsdorf, a.s.
 ** - ECD (efektivní hloubka prokalení) při požadované tvrdosti 500HV±30HV dané výrobním předpisem
 *** - Tyto hodnoty v technologii s překryvem byly naměřeny mimo oblast překryvu (nebyly měřeny v popuštěné oblasti)

Cílem této diplomové práce bylo najít co největší rychlost laserového kalení, a to z důvodu úspory času daného procesu a zároveň zachovat co největší efektivní hloubku prokalení, kde ještě zakalená vrstva bude dosahovat tvrdosti 500 HV ± 30 HV.

Z tabulky 5 vyplývá, že vzorek č. 9 (eventuálně č. 10) odpovídá požadavkům, které byly zadány. Rychlost při stávajících parametrech laserového kalení dosahuje hodnoty 12,5 cm/min. U vzorku č. 9 (10) byla zvětšena o 2,5 cm/min. Když uvažíme délku lože, kde je kalená plocha dlouhá 6 m, vychází časová úspora jedné zakalené stopy na 8 min. Např. u stroje WHN 13CNC je nutno kalit 8 vnějších stop lože s překryvem (viz příloha A). **Zde již časová úspora činí 64 min na zakalení všech vnějších kluzných ploch lože** (pokud se nepočítá např. čas na polohování robota pro další kalenou stopu). **Efektivní hloubka prokalení byla také zvětšena.** Jelikož na povrchu vzorku č. 9 (10) je

tvrdá křehká nesouvislá vrstva ledeburitu o maximální tloušťce 0,15 mm, bude nutné tuto vrstvu odbrousit. Avšak při současném stavu laserového kalení se také brousí do srovnání všech kluzných ploch lože, a to minimálně 0,15 mm. Menší komplikace nastává v místě překryvu dvou zakalených stop. Zde je efektivní hloubka prokalení podstatně menší. **Avšak oproti současnému stavu laserového kalení je v místě překryvu daleko tvrdší a hlubší** (viz srovnání níže)

Zde je třeba poznamenat, že zakalené kluzné plochy všech odlitků ve firmě TOS Varnsdorf, a.s. jsou dosti široké, tudíž se musí kalit technologií s překryvem (maximální stopa laseru okolo 50 mm).

Srovnání současného stavu povrchového kalení grafitických litin a doporučeného povrchového kalení grafitických litin v místě překryvu

Vzorek č. 2 (výkon 4660 W, rychlost 12,5 cm/min) – **současný stav**

- Efektivní hloubka prokalení (hranice 500 HV \pm 30 HV): **nedosahuje** (max. tvrdost 371,7 HV, oblast s velmi jemným martenzitem)

Vzorek č. 10 (výkon 6000 W, rychlost 15 cm/min) – **doporučené nastavení laseru**

- Efektivní hloubka prokalení (hranice 500 HV \pm 30 HV) po odbroušení ledeburitu:
0,61 - 0,15 = **0,46 mm**

Srovnání současného stavu povrchového kalení grafitických litin a doporučeného povrchového kalení grafitických litin mimo oblast překryvu (uprostřed stopy)

Vzorek č. 1 (výkon 4660 W, rychlost 12,5 cm/min) – **současný stav**

- Povrchová tvrdost po broušení: **787 HV**
- Efektivní hloubka prokalení (hranice 500 HV \pm 30 HV) po broušení:
1,02 - 0,15 = **0,87 mm**

Vzorek č. 9 (výkon 6000 W, rychlost 15 cm/min) – **doporučené nastavení laseru**

- Povrchová tvrdost po broušení: **814 HV**
- Efektivní hloubka prokalení (hranice 500 HV ± 30 HV) po broušení:

$$1,41 - 0,15 = \mathbf{1,26 \text{ mm}}$$

U ostatních vzorků je více nedostatků, tudíž je nelze doporučit.

ZÁVĚR

Z naměřených hodnot, použitých metod pro měření, a při porovnání zakalených mikrostruktur litiny byly zjištěny následující poznatky.

V případě povrchového kalení diodovým laserem má zásadní vliv na povrchovou tvrdost především **perlitická matrice**. **Tvrdost zde bude maximální** (podstatně větší než u feritické matrice). Litina GJL 250 (litina s lupínkovým grafitem) se pro kluzný pohyb velmi hodí. Je cenově výhodná, má vysokou odolnost vůči tlaku a tlumí rázy či chvění, což je velmi důležité pro těžké obráběcí stroje, které garantují vysokou přesnost obrábění v 0,01 mm. Lze jí zpracovat relativně levným povrchovým kalením.

Bylo prokázáno, že tento nestandardní případ povrchového kalení litiny má smysl a že ultrazvukový tvrdoměr Krautkramer Branson MIC 10 se zatížením 5 kg je vhodný pro měření povrchově kalené vrstvy litiny. Pro daný účel jsou výsledky dostačující. **Průměrná povrchová tvrdost u vzorků dosahovala okolo 800 HV, což odpovídá i při porovnání s mikrotvrdostí - naměřené hodnoty těsně pod povrchem.**

Bylo zjištěno, že **v místě překryvu dochází k popuštění a tím i k nižší tvrdosti**. V případě kluzného pohybu tento překryv nevadí, protože zatížení působí na větší ploše než v případě valivého pohybu. Tím se jednak eliminuje vliv překryvu (pokles tvrdosti z důvodu popuštění), ale i vliv heterogenity litiny s lupínkovým grafitem.

Pro snížení technologického času povrchového kalení litiny diodovým laserem a zároveň získání co největší efektivní hloubky prokalení, kde ještě zakalená vrstva bude dosahovat tvrdosti $500 \text{ HV} \pm 30 \text{ HV}$, byl doporučen vzorek č. 9, eventuálně č. 10. **Došlo zde k výrazné časové úspoře**. Například v případě kalení všech kluzných ploch lože dlouhého 6 m na stroji WHN 13CNC vychází tato časová úspora na 64 min. **Také byla získána větší efektivní hloubka prokalení než při současném nastavení laseru**. Na povrchově kalených těžkých dílcích budou hodnoty tvrdosti lepší, jelikož je zde větší teplotní gradient než na zkoumaných vzorcích.

Při rozboru struktur po kalení bylo zjištěno, že na většině vzorcích vznikla nesouvislá ledeburitická vrstva. Důvodem vzniku této vrstvy je záměrné přehřívání

povrchu litiny při laserovém kalení, a to proto, aby byla dosažena větší hloubka prokalení. Následně se ledeburitická vrstva vždy odbrušuje. Broušená plocha je také podmínkou pro správnou funkci kluzného pohybu mezi těžkými dílci.

Bylo prokázáno, že litina GJL 250 je dostačující materiál pro povrchové kalení diodovým laserem a není nutné tento materiál měnit v případě využití pro kluzný pohyb. Litina s kuličkovým grafitem či ADI litina by byla jistě výhodnější, avšak s vyšší pořizovací cenou. U těžkých obráběcích strojů firmy TOS Varnsdorf, a.s. **nelze doporučit žádnou litinu pro valivý pohyb**, protože vzájemně dotýkající se body jsou vystaveny sérii opakujících se cyklů velkého zatížení. Tlak na jednotlivé body je podstatně větší než v případě kluzného pohybu. Dále zde hraje velkou roli právě heterogenita materiálu a malá tloušťka povrchově zakalené litiny. Tím dochází k vymílání drážky a k jejich zamazání vlivem grafitu.

Pro dosažení větší efektivity optimalizace by bylo vhodné se především zaměřit na zlepšení tvrdosti v oblasti překryvu (optimalizace jeho velikosti) a dále na zkoumání více vzorků s odlišnými parametry, které by přinesly přesnější optimalizaci povrchového kalení diodovým laserem.

Metodu povrchového kalení litin diodovým laserem, která je specifická, lze doporučit pro hlubší výzkum.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BURAKOWSKI, T. a T. WIERZCHOŃ. *Surface engineering of metals: principles, equipment, technologies*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, c1999, 592 p. ISBN 08-493-8225-4.
- [2] DAĐOUREK, K. Povrchové kalení. *KMT* [online]. © 2007 [cit. 2015-04-25].
Dostupné z:
http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/VTM/vtm%20Dad/02povrkal.pdf
- [3] DAĐOUREK, K. *Vybrané technologie povrchových úprav*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 118 s. ISBN 978-80-7372-168-8.
- [4] GIRŠOVIČ, N. G. *Šedá litina: Krystalisace litiny a vznik její struktury, vlastnosti litiny*. Praha: SNTL, 1955, 343 s.
- [5] HLUCHÝ, M., R. PAŇÁK a O. MODRÁČEK. *Strojírenská technologie 1. 3.*, přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002, 173 s. ISBN 80-718-3265-0.
- [6] LUDVÍK, J., K. BÍLEK a Š. LUDVÍK. Zkoušky tvrdosti. *Metrotest* [online]. 2010 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrlosti.pdf
- [7] NĚMEČEK, S. *Kalení litiny výkonovými diodovými lasery*. *TRIBOLÓGIA* [online]. © 2008 - 2015 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-52012/kaleni-litiny-vykonovymi-diodovymi-lasery.html>
- [8] NĚMEČEK, S. Extrémní případy zpracování povrchu laserovým paprskem. *TRIBOLÓGIA* [online]. © 2008 - 2015 [cit. 2015-04-15].
Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62013/extremni-pripady-zpracovani-povrchu-laserovym-paprskem.html>
- [9] NOVÁ, I. *Teorie slévání: Teoretické základy metalurgie slévárenských slitin*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 169 s. ISBN 978-80-7372-185-5.

- [10] ODEHNALOVÁ, D. Litiny. *KMT* [online]. © 2010 [cit. 2015-04-19].
Dostupné z: www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM2/LITINY_podklady.ppt
- [11] OTÁHAL, V. *Jakostní litiny. MetalCasting and Foundry Consult* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://otahalconsult.cz/ukazky-produktu/jakostni-litiny/>
- [12] OTÁHAL, V. Litina s kompaktním grafitem. *MetalCasting and Foundry Consult* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-18].
Dostupné z: <http://otahalconsult.cz/ukazky-produktu/litina-s-kompaktnim-grafitem/>
- [13] OTÁHAL, V. Tvárná litina. *MetalCasting and Foundry Consult* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://otahalconsult.cz/ukazky-produktu/tvarna-litina/>
- [14] POSPÍŠILOVÁ, S. a B. PACAL. Základní druhy litin. *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. © 2013 [cit. 2015-04-18].
Dostupné z: <https://www.fme.vutbr.cz/index.html>
- [15] POUPAL, J. 2015. *Interní materiály společnosti TOS Varnsdorf, a.s.* Varnsdorf.
- [16] ROUČKA, J. *Metalurgie litin*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR, 1998, 166 s.
ISBN 80-214-1263-1.
- [17] SUCHÁNEK, Jan. Otěruvzdorné povrchové úpravy - 1. část. *TRIBOLÓGIA* [online]. © 2008 - 2015 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32011/oteruvzdorne-povrchove-upravy-1-cast-.html>
- [18] ZATLOUKAL, P. Tepelné zpracování laserem. *Welding.cz* [online]. 2007 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.welding.cz/laser/tepelne.htm>
- [19] ZENKER, R. a A. BUCHWALDER. *Elektronenstrahl-Randschichtbehandlung : Inovative Technologien für höchste industrielle Ansprüche*. 2. vyd. Germany: probeam AG&Co. KGaA, 2010.

- [20] Buehler Simplimet 2000. *Spectrographic* [online]. [2015] [cit. 2015-05-09].
Dostupné z: <http://www.spectrographic.co.uk/shop/metallurgical-mounting-refurbished/buehler-simplimet-2000/>
- [21] Laserové kalení. *KULIČKOVÉ ŠROUBY KUŘIM* [online]. © 1996–2015
[cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.ks-kurim.cz/laserove-kaleni/>
- [22] Laserové kalení. *TRUMPF Česká Republika* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-23].
Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/obrabeni-povrchu/laserove-kaleni.html>
- [23] Laserové kalení. *VÚTS, a.s.* [online]. © 2013 [cit. 2015-04-22].
Dostupné z: <http://www.vuts.cz/laserove-kaleni-2.html>
- [24] Měření tvrdosti přenosnými tvrdoměry. *NDT Nedestruktivní kontrola - Testima*
[online]. © 2011 [cit. 2015-05-02].
Dostupné z: <http://www.testima.eu/4-128-soubory-ke-stazeni.html>
- [25] Metallographielabor. *Universität Kassel* [online]. [2015] [cit. 2015-05-09].
Dostupné z: <http://tff-kassel.de/index.php/metallographielabor.html>
- [26] Surface of Cast Iron after Laser Hardening. *Academia.eu* [online]. 2013
[cit. 2015-05-06]. Dostupné z:
http://www.academia.edu/8084326/Surface_of_Cast_Iron_after_Laser_Hardening
- [27] Tvrdost podle Brinella. *Techportal.cz* [online]. © 1997 - 2015 [cit. 2015-05-01].
Dostupné z:
http://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOO6D3ZMeL9jOG6RezEQEmBaY8drX5wl7kQ
- [28] Vector LC 250. *Hanyko Praha: Vše pro zkoušení materiálů* [online]. © 2012.
[cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.hanyko-praha.cz/produkty/metalografie/brusky-a-lesticky/vector-lc-250/>

- [29] ASTM A 1038-05. *Standard Practice for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method*. West Conshohocken: ASTM International, 2013.
- [30] ČSN 42 0006. *Číselné označování a rozdělení slitin železa na odlitky*. Praha: Český normalizační institut, 1970.
- [31] ČSN 42 0461. *Hodnocení metalografické struktury litin*. Praha: Český normalizační institut, 1975.
- [32] ČSN 42 2425. *LITINA 42 2425 s lupínkovým grafitem*. Praha: Český normalizační institut, 1989.
- [33] ČSN EN ISO 4516. *Kovové a jiné anorganické povlaky – Zkoušky mikrotvrlosti podle Vickerse a podle Knoopu*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [34] ČSN EN ISO 6506-1. *Kovové materiály. Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [35] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály. Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [36] ČSN EN ISO 945. *Litina – Určení mikrostruktury grafitu*. Praha: Český normalizační institut, 1996.

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obr. 1: Příklad rozložení jednotlivých skupin na stroji WHN130 [15]..... | 14 |
| Obr. 2: Diagram eutektoidní transformace litin Fe-C-Si (upraveno) [14]..... | 19 |
| Obr. 3: Rozdělení grafitických litin [14] | 23 |
| Obr. 4: Perlitická litina s lupínkovým grafitem (200x) [11]..... | 25 |
| Obr. 5: Perlitická litina s kuličkovým grafitem (200x) [14]..... | 26 |
| Obr. 6: Izotermicky kalená tvárná litina na bainitickou strukturu (ADI způsob)..... | 27 |
| Obr. 7: Princip povrchového kalení diodovým laserem - upraveno[21] | 31 |
| Obr. 8: Princip povrchového kalení indukci [2]..... | 33 |
| Obr. 9: Princip povrchového kalení elektronovým paprskem [1] | 35 |
| Obr. 10: Princip zkoušky [34] | 37 |
| Obr. 11: Příklad značení tvrdosti podle Brinella (HWB) [34] | 38 |
| Obr. 12: Schématický obrázek UCI sondy – upraveno [24]..... | 41 |
| Obr. 13: UCI princip jako myšlený experiment - upraveno[24] | 41 |
| Obr. 14: Závislost hodnoty tvrdosti na změně frekvence kmitající tyčinky – upraveno[29]42 | |
| Obr. 15: Závislost hloubky vtisku na tvrdost pro různé zatížení – upraveno [24] | 44 |
| Obr. 16: Chronologicky uspořádané dílčí činnosti práce | 47 |
| Obr. 17: Odlitek z litiny GJL 250 (číslo modelu 011514)..... | 48 |
| Obr. 18: Obrobení odlitku dle výkresu | 49 |
| Obr. 19: Specializované pracoviště určené pro kalení diodovým laserem (typ laseru: LDF 6000 -100)..... | 49 |
| Obr. 20: Rovinná bruska BPH – 20 NA | 51 |
| Obr. 21: Ultrazvukový tvrdoměr Krautkramer Branson MIC 10-34100..... | 53 |
| Obr. 22: Pila Jean Wirtz CUTO 20 [25]..... | 55 |
| Obr. 23: Značení a kladení vzorků do lisovací formy | 56 |
| Obr. 24: Elektro-hydraulický lis SIMPLIMET 2000 [20]..... | 56 |
| Obr. 25: Buehler bruska (leštička) MetaServ 250 s hlavou VECTOR LC 250 [28]..... | 58 |
| Obr. 26: Hodnocení grafitu (100x), neleptáno | 60 |
| Obr. 27: Hodnocení obsahu perlitu a velikosti útvarů fosfidového eutektika (100x), leptáno61 | |
| Obr. 28: Hodnocení disperzity perlitu (1000x), leptáno..... | 61 |
| Obr. 29: Hodnocení tvaru perlitu a typu fosfidového eutektika (500x), leptáno..... | 62 |

| | |
|---|----|
| Obr. 30: Oblasti zkoumané pod mikroskopem..... | 62 |
| Obr. 31: Makroskopie vzorku č. 1 – technologie bez překryvu | 63 |
| Obr. 32: Vzorek č. 1 – oblast 1 (200x) | 63 |
| Obr. 33: Vzorek č. 1 – oblast 2 (200x) | 64 |
| Obr. 34: Vzorek č. 1 – oblast 3 (200x) | 64 |
| Obr. 35: Vzorek č. 1 – oblast 4 (200x) | 65 |
| Obr. 36: Makroskopie vzorku č. 2 – technologie s překryvem | 65 |
| Obr. 37: Vzorový příklad při překrytí stop..... | 66 |
| Obr. 38: Vzorek č. 2 – oblast 1 (200x) | 67 |
| Obr. 39: Vzorek č. 2 – oblast 3 (200x) | 68 |
| Obr. 40: Makroskopie vzorku č. 3 – technologie bez překryvu | 68 |
| Obr. 41: Vzorek č. 3 – oblast 1 (200x) | 69 |
| Obr. 42: Vzorek č. 3 – oblast 2 (200x) | 69 |
| Obr. 43: Vzorek č. 3 – oblast 3 (200x) | 70 |
| Obr. 44: Makroskopie vzorku č. 4 – technologie s překryvem | 70 |
| Obr. 45: Vzorek č. 4 – oblast 1 (200x) | 71 |
| Obr. 46: Vzorek č. 4 – oblast 2 (200x) | 71 |
| Obr. 47: Vzorek č. 4 – oblast 3 (200x) | 72 |
| Obr. 48: Makroskopie vzorku č. 5 – technologie bez překryvu | 72 |
| Obr. 49: Vzorek č. 5 – oblast 1 (200x) | 73 |
| Obr. 50: Vzorek č. 5 – oblast 2 (200x) | 73 |
| Obr. 51: Vzorek č. 5 – oblast 3 (200x) | 74 |
| Obr. 52: Makroskopie vzorku č. 6 – technologie s překryvem | 74 |
| Obr. 53: Vzorek č. 6 – oblast 1 (200x) | 75 |
| Obr. 54: Vzorek č. 6 – oblast 2 (200x) | 76 |
| Obr. 55: Vzorek č. 6 – oblast 3 (200x) | 76 |
| Obr. 56: Makroskopie vzorku č. 7 – technologie bez překryvu | 77 |
| Obr. 57: Vzorek č. 7 – oblast 1 (200x) | 77 |
| Obr. 58: Vzorek č. 7 – oblast 2 (200x) | 78 |
| Obr. 59: Vzorek č. 7 – oblast 3 (200x) | 78 |
| Obr. 60: Makroskopie vzorku č. 8 – technologie s překryvem | 79 |
| Obr. 61: Vzorek č. 8 – oblast 1 (200x) | 79 |

| | |
|--|----|
| Obr. 62: Vzorek č. 8 – oblast 2 (200x) | 80 |
| Obr. 63: Vzorek č. 8 – oblast 3 (200x) | 80 |
| Obr. 64: Makroskopie vzorku č. 9 – technologie bez překryvu | 81 |
| Obr. 65: Vzorek č. 9 – oblast 1 (200x) | 81 |
| Obr. 66: Vzorek č. 9 – oblast 2 (200x) | 82 |
| Obr. 67: Vzorek č. 9 – oblast 3 (200x) | 82 |
| Obr. 68: Makroskopie vzorku č. 10 – technologie s překryvem | 83 |
| Obr. 69: Vzorek č. 10 – oblast 1 (200x) | 83 |
| Obr. 70: Vzorek č. 10 – oblast 2 (200x) | 84 |
| Obr. 71: Vzorek č. 10 – oblast 3 (200x) | 84 |
| Obr. 72: Makroskopie vzorku č. 11 – technologie bez překryvu | 85 |
| Obr. 73: Vzorek č. 11 – oblast 1 (200x) | 85 |
| Obr. 74: Vzorek č. 11 – oblast 2 (200x) | 86 |
| Obr. 75: Vzorek č. 11 – oblast 3 (200x) | 86 |
| Obr. 76: Makroskopie vzorku č. 12 – technologie bez překryvu | 87 |
| Obr. 77: Vzorek č. 12 – oblast 1 (200x) | 87 |
| Obr. 78: Vzorek č. 12 – oblast 2 (200x) | 88 |
| Obr. 79: Vzorek č. 12 – oblast 3 (200x) | 88 |
| Obr. 80: Mikrotvrdoměr MICROMET 2100 Series (Buehler)..... | 90 |
| Obr. 81: Vtisky u vzorku č. 3 | 95 |

SEZNAM GRAFŮ

| | |
|---|-----|
| Graf 1: Povrchová tvrdost vzorku č. 1..... | 54 |
| Graf 2: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 1..... | 91 |
| Graf 3: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 2..... | 92 |
| Graf 4: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 2 – oblast bez vrstvy..... | 93 |
| Graf 5: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 3..... | 94 |
| Graf 6: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 4..... | 96 |
| Graf 7: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 4 - slabší vrstva..... | 97 |
| Graf 8: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 5..... | 98 |
| Graf 9: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 6..... | 99 |
| Graf 10: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 6 – slabší vrstva..... | 100 |
| Graf 11: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 7..... | 101 |
| Graf 12: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 8..... | 102 |
| Graf 13: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 8 – slabší vrstva..... | 103 |
| Graf 14: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 9..... | 104 |
| Graf 15: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 10..... | 105 |
| Graf 16: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 11..... | 106 |
| Graf 17: Průběh mikrotvrdosti vzorku č. 12..... | 107 |

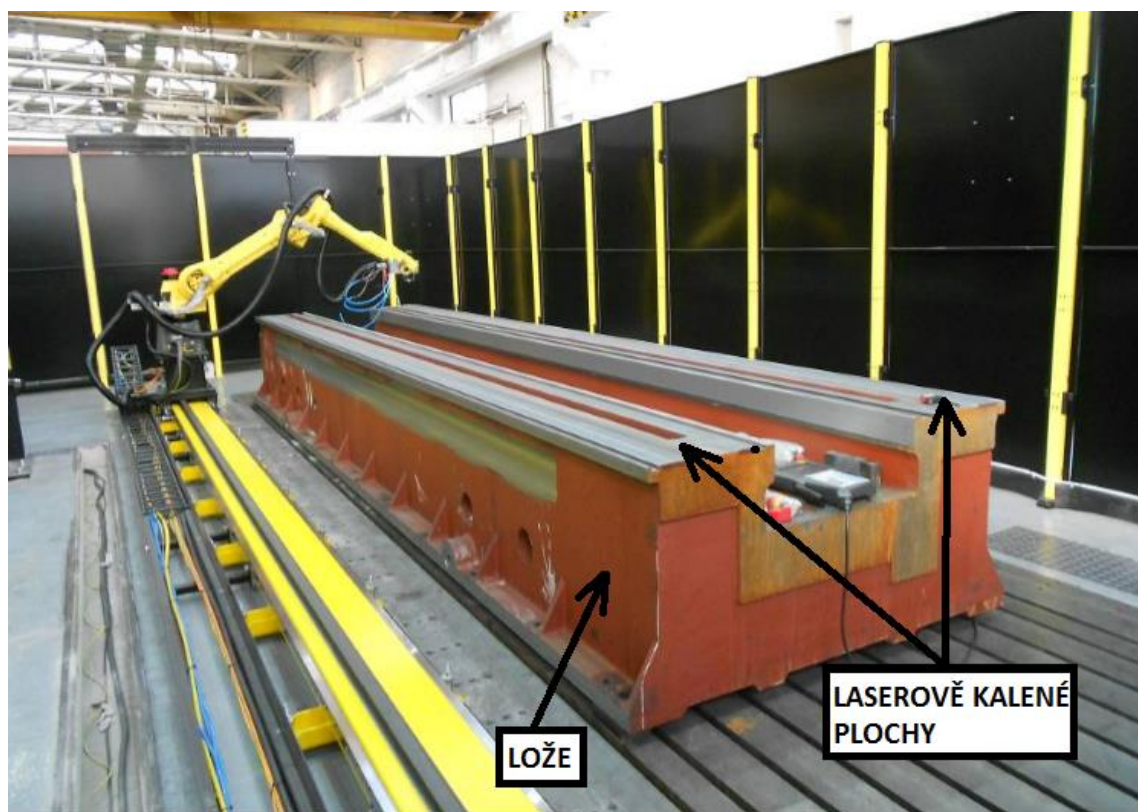
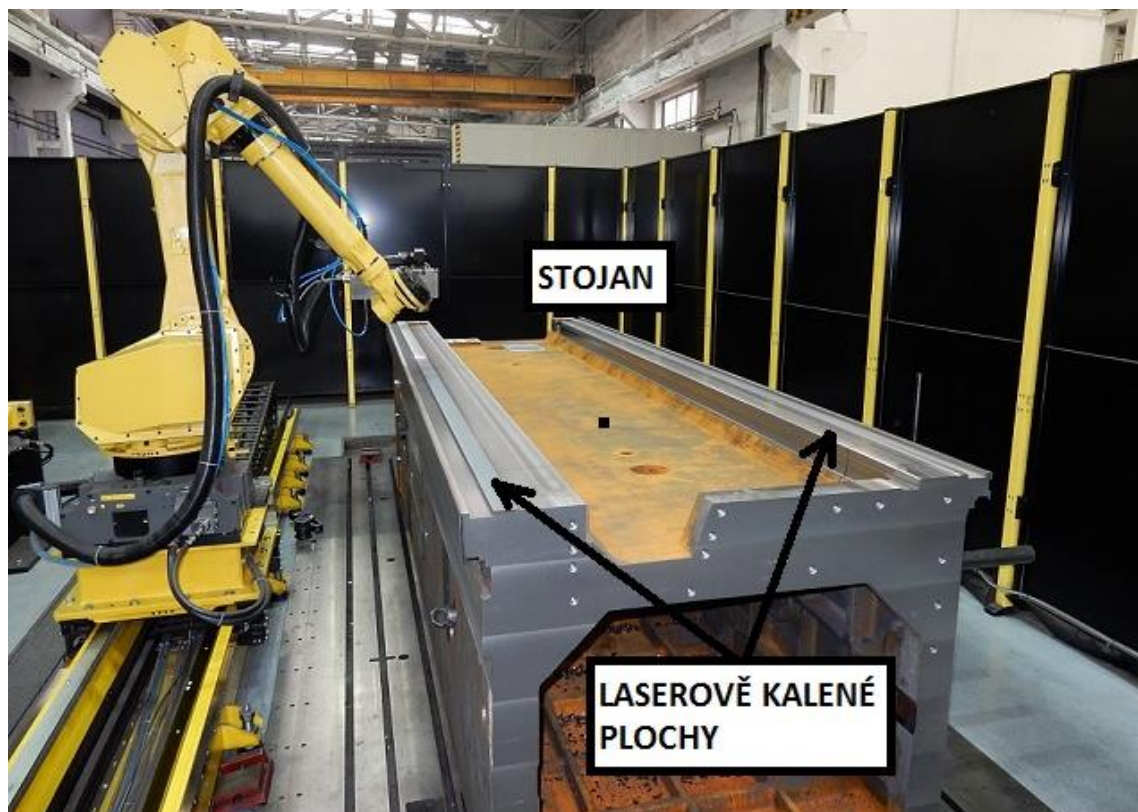
SEZNAM TABULEK

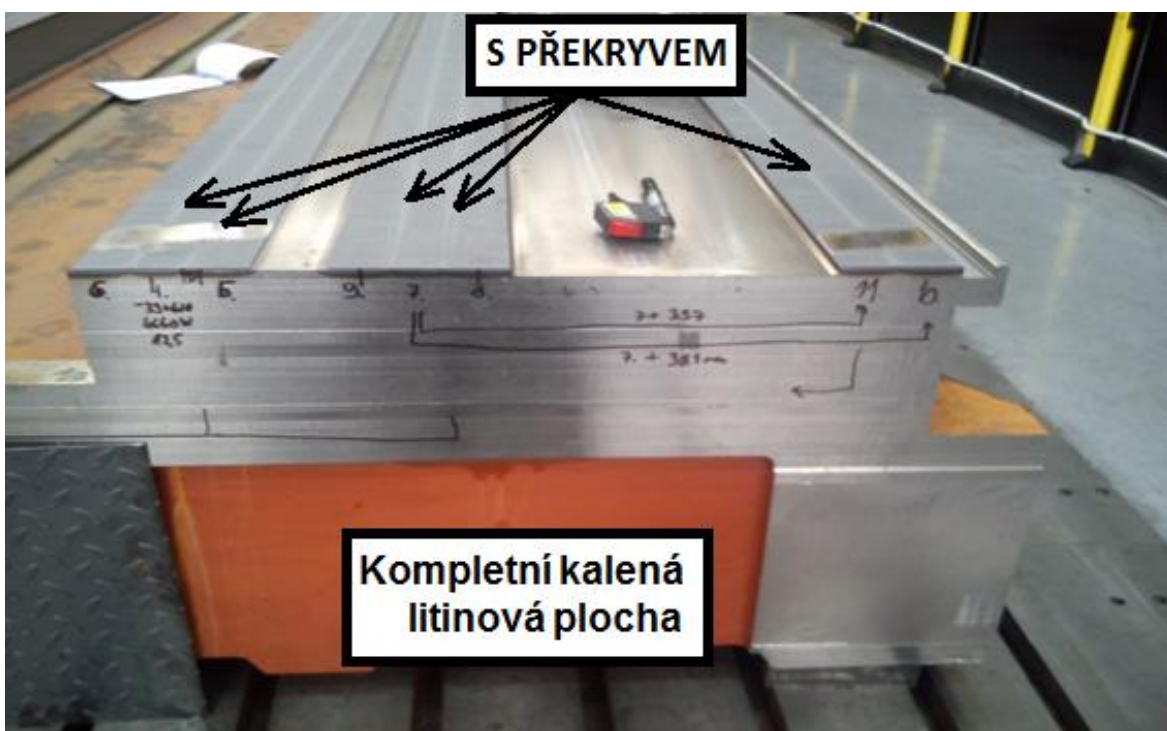
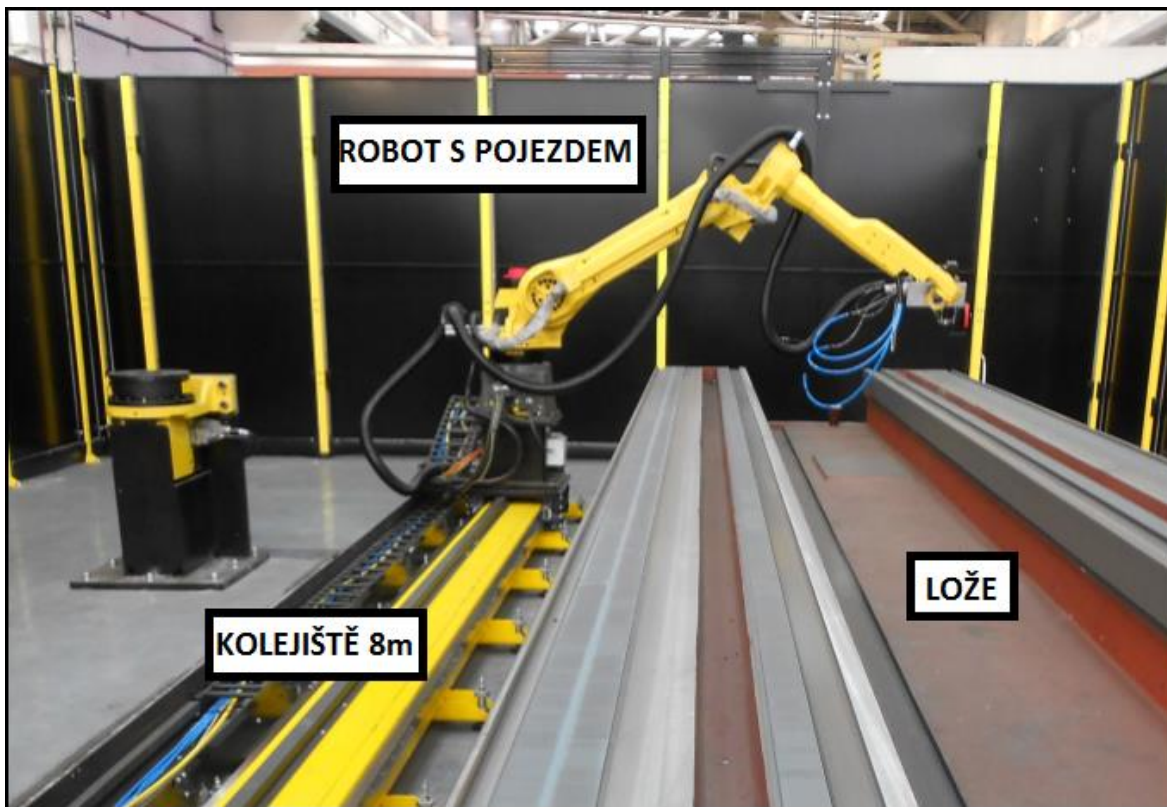
| | |
|--|-----|
| Tab. 1: Značky a zkrácené termíny [34]..... | 37 |
| Tab. 2: Minimální tloušťka zkušebního tělesa ve vztahu k střednímu průměru vtisku - upraveno[34]..... | 39 |
| Tab. 3: Zvolené parametry pro kalení součástí diodovým laserem | 50 |
| Tab. 4: Některé statistické hodnoty z měření povrchové tvrdosti | 52 |
| Tab. 5: Hodnocení výsledků laserového kalení..... | 108 |

SEZNAM PŘÍLOH

| | | |
|------------------|--|------------|
| Příloha A | Laserové kalení kluzných ploch stroje [15] | 123 |
| Příloha B | Sled operací..... | 125 |
| Příloha C | Výkres hranolu, dokumenty a obrázky ze slévárny | 128 |
| Příloha D | Technologie kalení – bez překryvu a s překryvem | 132 |
| Příloha E | Technologický postup broušení | 134 |
| Příloha F | Měření povrchové tvrdosti kalené vrstvy | 136 |
| Příloha G | Grafy povrchové tvrdosti jednotlivých vzorků | 139 |
| Příloha H | Měření mikrotvrdosti kalené vrstvy..... | 150 |

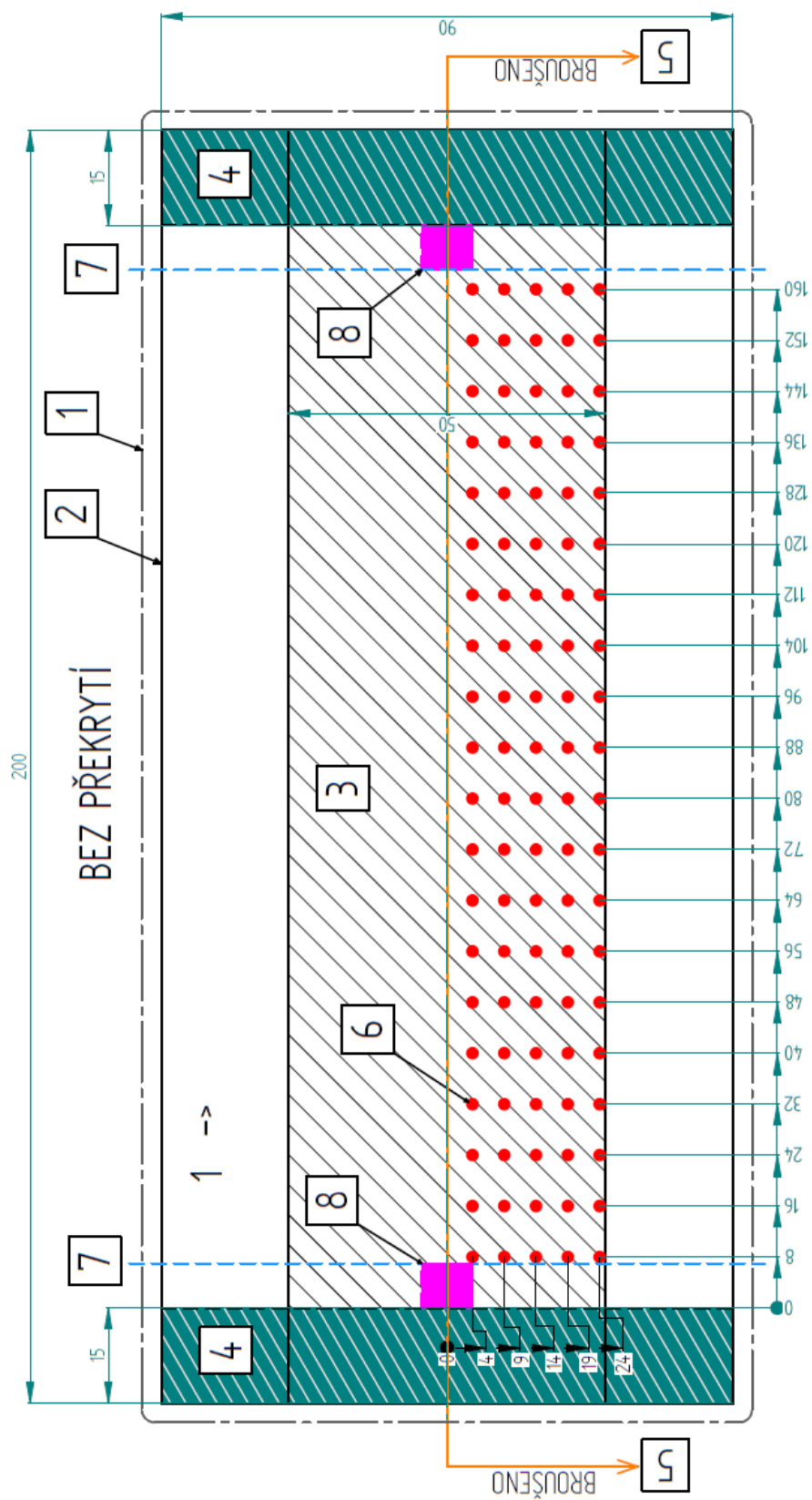
Příloha A Laserové kalení kluzných ploch stroje [15]

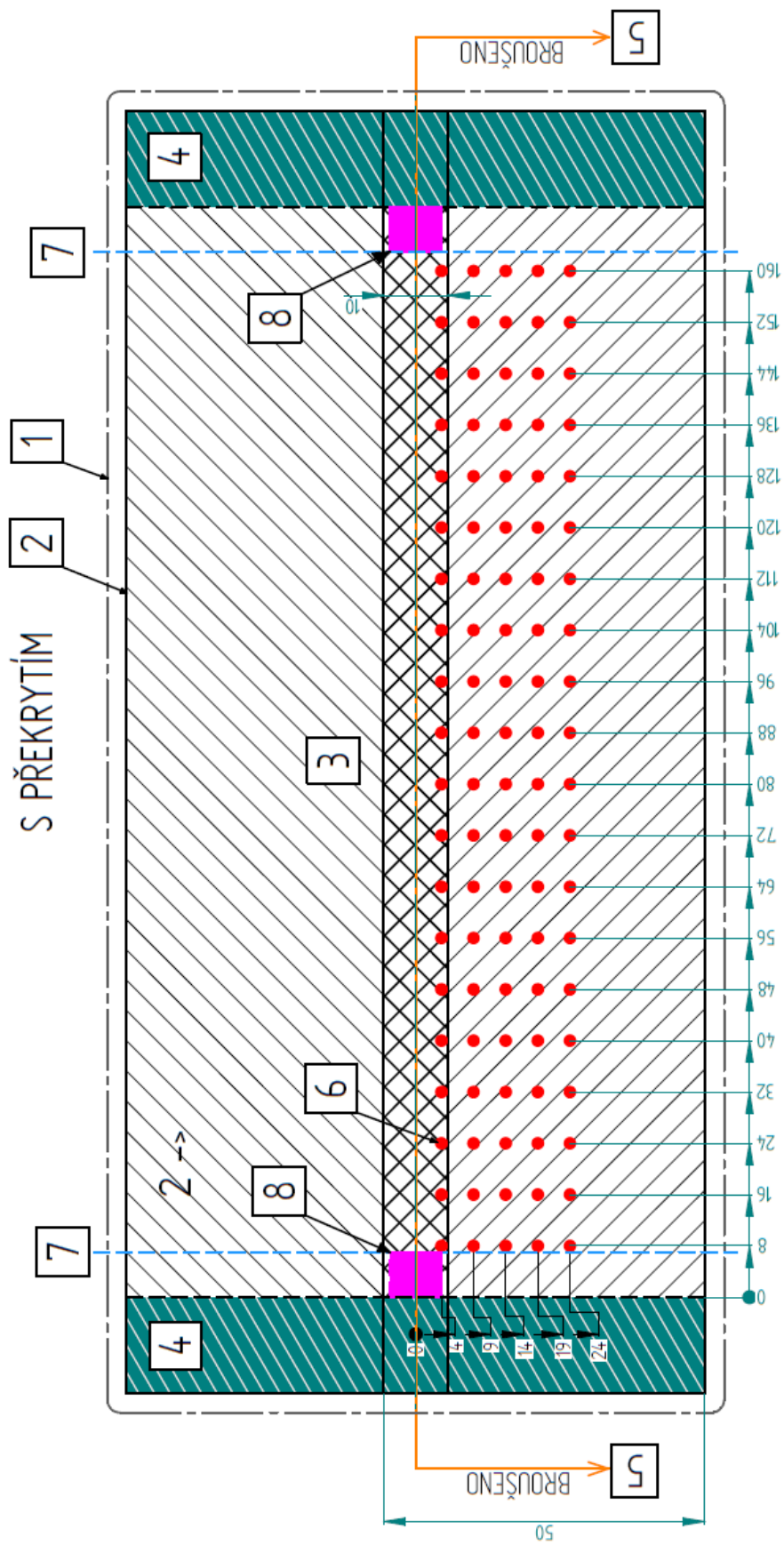




Laserové kalení kluzných ploch lože stroje WHN(Q)13CNC před finálním broušením

Příloha B Sled operací

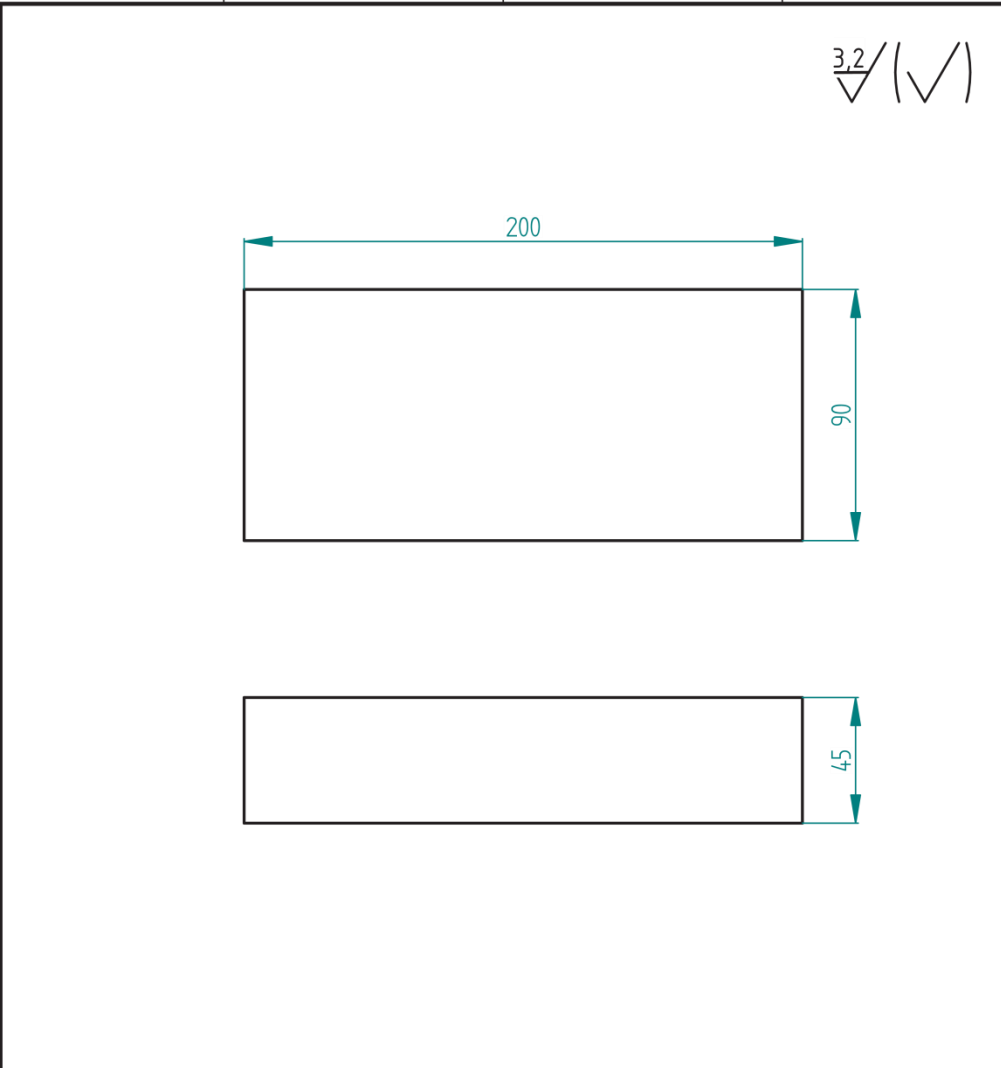









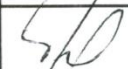


Přehled operací

- 1 – odlitek (se zahrnutým přídatkem na obrábění)
- 2 – obrobení odlitku na rozměr 200x90x45
- 3 – kalení diodovým laserem (s překryvem, bez překryvu)
- 4 – obrobení čel
- 5 – broušení jedné poloviny dílce
- 6 – měření povrchové tvrdosti
- 7 - 8 – řezání kotoučovou pilou (příprava pro metalografii)

Příloha C Výkres hranolu, dokumenty a obrázky ze slévárny


| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|---|--|--|-----------------------|---|--|---------------------------------------|---|---|----------------------------------|---|---------------|--|------------------------------|-------|---------------|--------------------|--|----|--|--|--|----|--|--|--|--|--|----------------------|----------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A |  | | A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B | | | B | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C | | | C | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D | | | D | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| E | <p>PŘESNOST ODLITKU DLE ISO 8062-CT11-RMA6(H)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 5%;">00</td> <td style="width: 65%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 20%;"></td> </tr> <tr> <td>index</td> <td>popis změny</td> <td>datum</td> <td>jméno</td> </tr> <tr> <td>11.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>10.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>9.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>8.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>konstrukční kusovník</td> <td>od do platnost</td> </tr> </table> | | | 00 | | | | index | popis změny | datum | jméno | 11. | | | | 10. | | | | 9. | | | | 8. | | | | | | konstrukční kusovník | od do platnost |
| 00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| index | popis změny | datum | jméno | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | konstrukční kusovník | od do platnost | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| F | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;"> Duševní majetek firmy ©TOS VARNSDORF a.s. Zneužití a rozmnožování bez souhlasu majitele je trestné podle zákona o autorských právech. </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> měřítko 1:2 </td> <td style="width: 30%;"> ODLITEK 422425 rozměr ČSN 42 2425 jakost norma </td> <td style="width: 30%;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> NEPŘEDEPSANÉ TOLERANCE ISO 2768 mK </td> <td style="text-align: center;">  </td> <td> navrhl Bc. Kysel kreslil Bc. Kysel dne 29.08.2014 schválil <i>Bc. Kysel</i> </td> <td style="text-align: center;"> 011514 model - výkovek </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">  </td> <td style="text-align: center;"> HRANOL </td> <td style="text-align: center;"> typ skupina </td> <td style="text-align: center;"> listů 1 list 1 </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> název </td> <td style="text-align: center;"> doplněk názvu </td> <td style="text-align: center;"> 4 formát </td> <td style="text-align: center;"> 010151400 číslo výkresu a revize </td> </tr> </table> | | | Duševní majetek firmy ©TOS VARNSDORF a.s. Zneužití a rozmnožování bez souhlasu majitele je trestné podle zákona o autorských právech. | měřítko 1:2 | ODLITEK 422425 rozměr ČSN 42 2425 jakost norma | | NEPŘEDEPSANÉ TOLERANCE ISO 2768 mK |  | navrhl Bc. Kysel kreslil Bc. Kysel dne 29.08.2014 schválil <i>Bc. Kysel</i> | 011514 model - výkovek |  | HRANOL | typ skupina | listů 1 list 1 | název | doplněk názvu | 4 formát | 010151400 číslo výkresu a revize | | | | | | | | | | | | |
| Duševní majetek firmy ©TOS VARNSDORF a.s. Zneužití a rozmnožování bez souhlasu majitele je trestné podle zákona o autorských právech. | měřítko 1:2 | ODLITEK 422425 rozměr ČSN 42 2425 jakost norma | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| NEPŘEDEPSANÉ TOLERANCE ISO 2768 mK |  | navrhl Bc. Kysel kreslil Bc. Kysel dne 29.08.2014 schválil <i>Bc. Kysel</i> | 011514 model - výkovek | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | HRANOL | typ skupina | listů 1 list 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| název | doplněk názvu | 4 formát | 010151400 číslo výkresu a revize | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

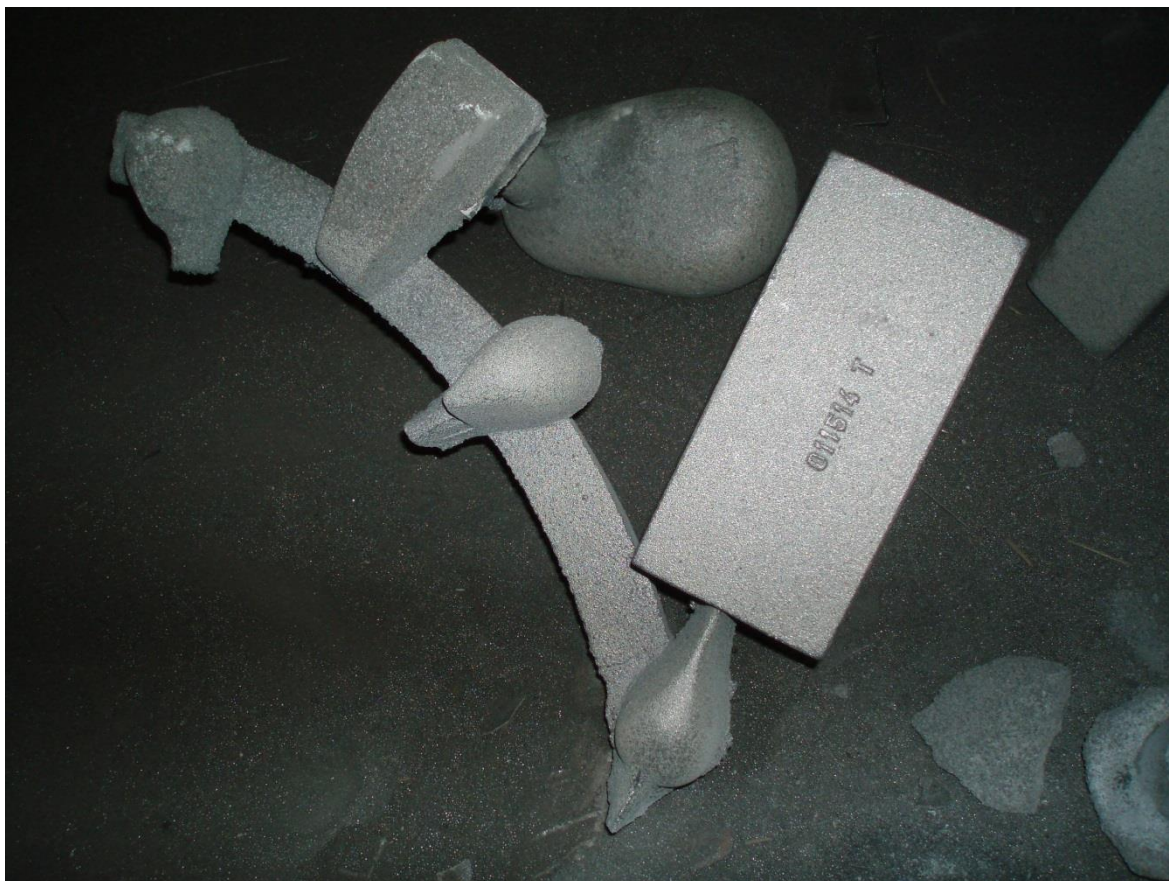
| | | | | | | | | |
|--|--------------------------------------|---|-----------------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Pořad. číslo techn. karty | 173/14 | Průvodka kontrolního odlitku Technologická karta | PKO | 173/14 | | | | |
| Zákazník: | TOS VARNSDORF A.S. | Název: | HRANOL | Číslo výkresu 010151400 | | | | |
| Č. modelu: | 011514 | Číslo tavby: | NE | Zn. slév ANO | | | | |
| Druh modelu: | 1x Volný model nedělený | | Počet podložek: | | | | | |
| Zp. formování: | ruční | Počet kontr.odlitéků | 2 | Uložení ve skladu modelů J14 | | | | |
| Vtoková soustava: | Vtokový kůl: | Struskovák: | | Zářezy: | | | | |
| | Volné části modelu: | Volné části vtokové soustavy | | Index změny | | | | |
| Techn. karta: | | | MZ | Č. technol. přílohy: | | | | |
| Teplota lítí: | 1290-1330 °C | Teplota naměřená: | 1270 °C | Doba chladnutí: | | | | |
| Surová váha odl. (kg) | 12kg | Materiál požadovaný: | GG-25 | Bubnování | | | | |
| Hrubá váha odl. (kg) | 7.5kg | Materiál skutečný: | 20343 | Žihání | | | | |
| Skutečná váha odl. (kg) | 7,75kg | Legování: | | Barvení nezákladovat | | | | |
| Datum: | 15.09.2014 | | Vystavil: | bedan | | | | |
| FR: | 630x630x160/160 | Form. směs | Bentonit ruční | Nátěr formy: | | | | |
| FR: | | Objem FS: | 14 dm³ | | | | | |
| Filtr: | KERAMICKÝ FILTR 0743/13 50/50 | | | 1 | | | | |
| Poznámka: Nové MZ. 1x průtočný nálipek pr.80mm | | | | | | | | |
| Zkoušky předepsané pro vzorek | | | | | | | | |
| X 1. Vizuelní kontrola | | 6. Limitovaná hmotnost | | | | | | |
| X 2. Rozměrová kontrola | | X 7. Chemické složení | | | | | | |
| 3. UZ, RTG | | 8. Mechanické hodnoty | | | | | | |
| X 4. Tvrdost | | 9. Metalografie | | | | | | |
| 5. Penetrační zkouška | | 10. Jiné zkoušky | | | | | | |
| Zhotovení vzorků | Datum: | Provedl-Mistr: | Připomínky, protokoly | | | | | |
| Výroba jader: | | | | | | | | |
| Form., skládání: | 16.9.14 <i>Agostinovič</i> |  | | | | | | |
| Metalurg: | 17.9. |  | | | | | | |
| Chemické složení: | | C | Si | Mn | P | S | Sc | CE |
| Číslo tavby: | 259 | 3,51 | 1,56 | 0,62 | 0,21 | 0,09 | 0,90 | 1,92 |
| OTK, cidřina: | 16.9.2014 <i>Pokorný</i> | | | | | | | |

Připomínky, poznámky:

OTK: dva odlitky ve vřítu mána' složenie jader

KONTROLNÍ PROTOKOL MODELOVÉHO ZAŘÍZENÍ

| Dodavatel: Lieferer TSS, spol. s r.o.  Za Tratí 496 503 46 Třebechovice p.O. CZE | | Datum vystavení: Ausstellungsdatum: <i>12. 9. 2014</i> | | | |
|---|-------------------------------|--|----------|--------------------|----------------|
| Provoz: Betriebsabt. Modelárna OR: KS v Hradci Králové oddíl C, vložka 2452 Dne 27. července 1992 | | Odběratel: Kundschaft: <i>TOS VARNSDORF</i> | | | |
| Číslo modelu: <i>014514</i> | | Smrštění: <i>190</i> | | | |
| Číslo výkresu: | | Materiál: <i>GG 25</i> | | | |
| Třída přesnosti: <i>H1</i> | | | | | |
| Pozice | Výkresová hodnota s přídavkem | Naměřená hodnota | Odchylka | Povolená tolerance | Pozn. |
| 1 | <i>200 + 3 + 3</i> | <i>206</i> | | | <i>207 mm</i> |
| 2 | <i>90 + 3 + 3</i> | <i>96</i> | | | <i>97,2 mm</i> |
| 3 | <i>45 + 3 + 3</i> | <i>51</i> | | | <i>52,3 mm</i> |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |
| OTK modelárny podpis: <i>[Signature]</i> | | | | | |
| Počet stran: 1/1 | | | | | |



MDT 669.131.6

ČESKOSLOVENSKÁ STÁTNÍ NORMA

Schválena: 1. 9. 1989

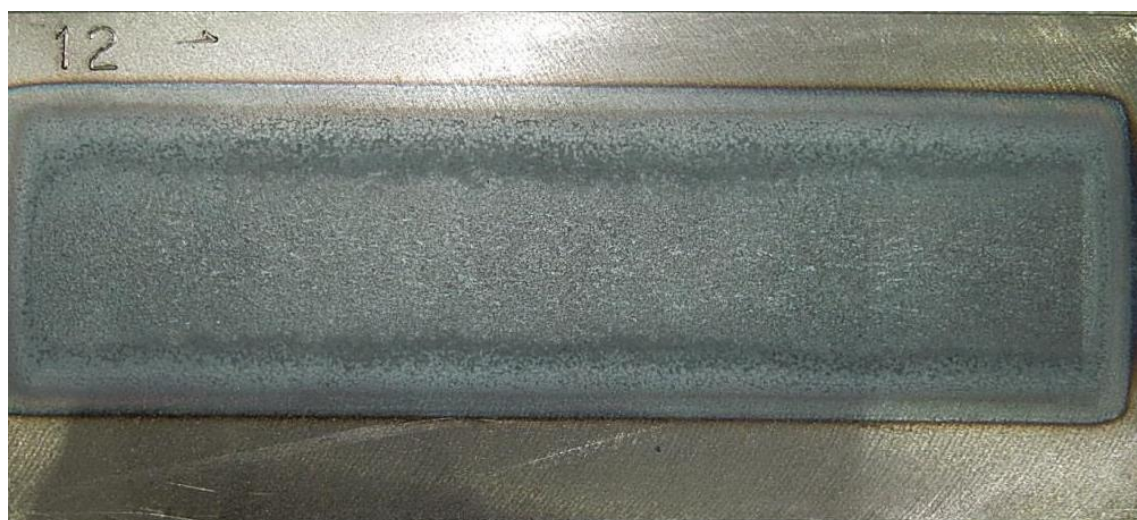
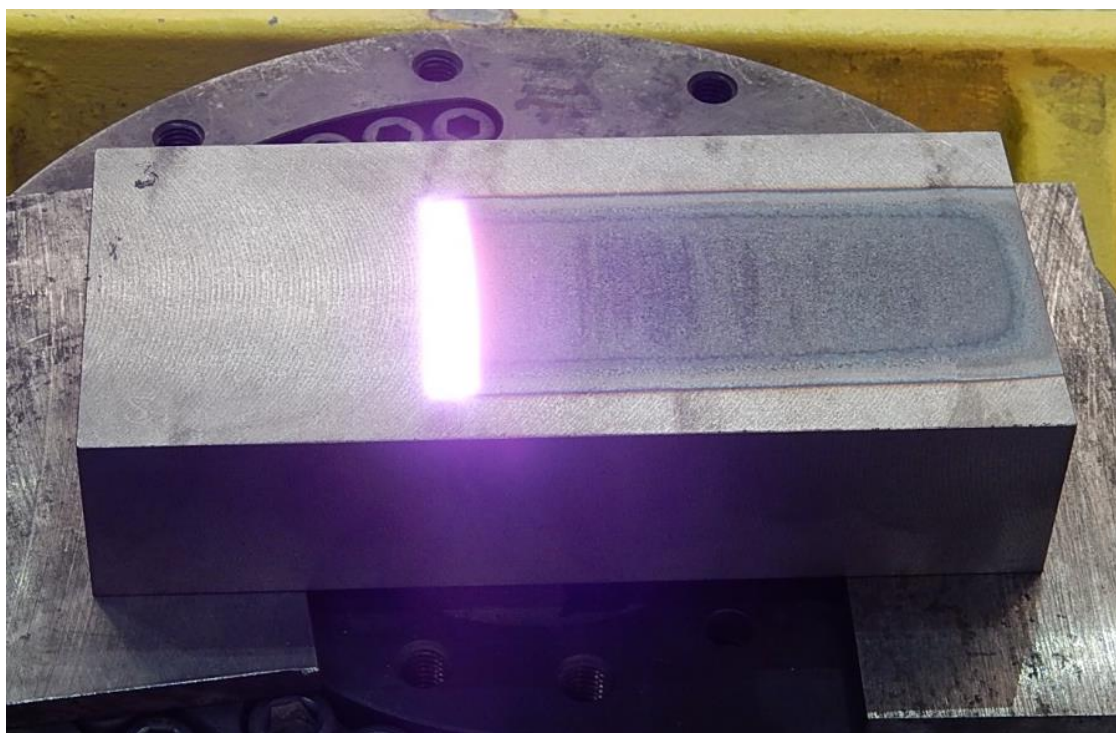
ČSN 42 2425

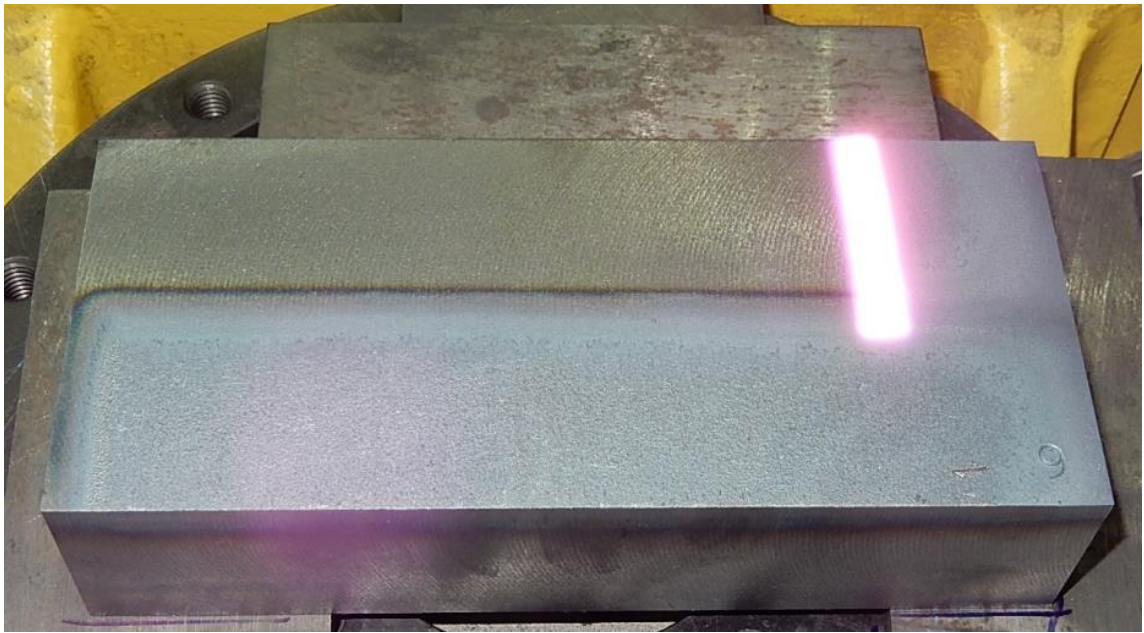
| | | | | | | | |
|--|---|--|----------------------------|---------------|-----|-----|-----|
| | LITINA 42 2425 s lupínkovým grafitem | | ČSN 42 2425 | | | | |
| | | | JK | | | | |
| Чугун 42 2425 с пластинчатым графитом | | Lamellar graphite cast iron 42 2425 | | | | | |
| Skupina materiálu podle ČSN 42 0006 | | 1: Pro všeobecné použití 3: Pro vyšší tlaky a namáhání 6: Pro vyšší teploty | | | | | |
| Třída odpadu podle ČSN 42 0030 | | 212 | | | | | |
| Chemické složení ¹⁾ % | | P – max. 0,50 | | S – max. 0,15 | | | |
| Technické dodací předpisy | | ČSN 42 1241 | | | | | |
| Nejnižší pevnost v tahu R_m MPa | | 250 | | | | | |
| Nejvyšší tvrdost podle Brinella HB | | 240 | | | | | |
| Charakteristika litiny a vhodnost použití | | Struktura je tvořena perlitem (s malým množstvím feritu) s lupínkovým grafitem. Litina je vhodná na odlitky o tloušťce stěn od 15 mm do 70 mm, např. na válce motorů, součásti turbin, ozubená kola, značně namáhané strojní součásti, na stojany středně těžkých obráběcích strojů apod. | | | | | |
| Informativní hodnoty vlastností, které nejsou předmětem zkoušení při kontrole jakosti Mechanické vlastnosti | | | | | | | |
| Nejnižší pevnost v ohybu R_{m0} MPa | | 430 | | | | | |
| Nejmenší průhyb y při vzdálenosti podpor 600 mm mm | | 9 | | | | | |
| Nejnižší mez při namáhání za rotace σ_{0C} MPa | | 116 | | | | | |
| Teplota °C | | -60 | -40 | -20 | 0 | 20 | |
| Nejnižší pevnost v tahu R_m MPa | | 207 | 263 | 258 | 254 | 250 | |
| Rázová houževnatost KG J/cm ² | | 5,9 | 6,2 | 6,7 | 7,2 | 7,5 | |
| Teplota °C | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
| Nejnižší pevnost v tahu R_m MPa | | 242 | 232 | 241 | 246 | 199 | 126 |
| Rázová houževnatost KG J/cm ² | | 7,8 | 8,1 | 8,1 | 7,9 | 7,4 | 7,0 |
| Nahrazuje ČSN 42 2425 z 15. 5. 1974 | | | Účinnost od: 1. 9. 1990 | | | | |

Vydavatelství norem, Praha

27935

Příloha D Technologie kalení – bez překryvu a s překryvem

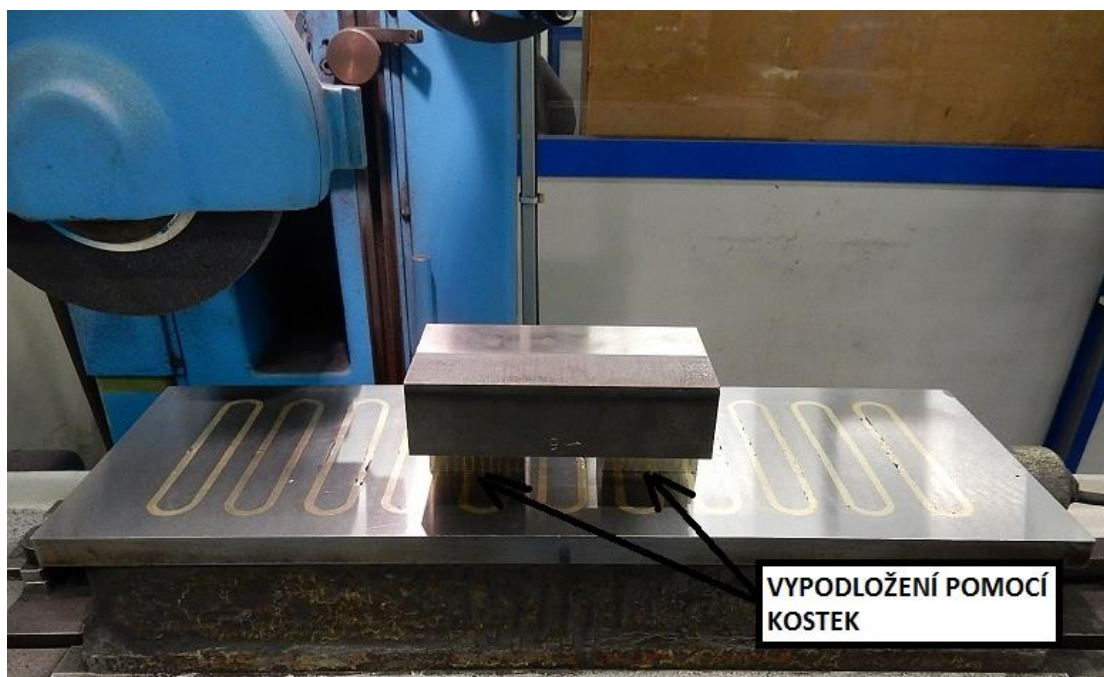




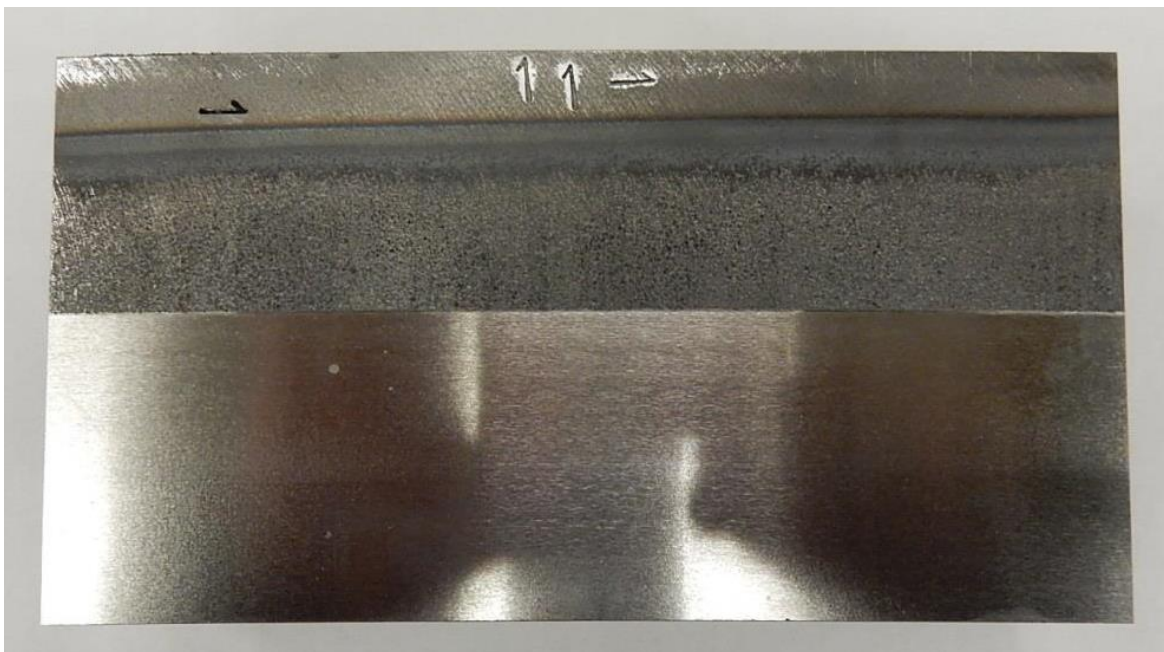
Příloha E Technologický postup broušení



Broušení první strany



Broušení druhé strany



Bez překryvu



S překryvem

Příloha F Měření povrchové tvrdosti kalené vrstvy

| VZOREK č. 1 | | Měření povrchové tvrdosti kalené vrstvy - Vickers (HV5) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|-----|
| | | Směr laserového kalení → | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 mm 19 mm 14 mm 9 mm 4 mm x | Kalené plochy šifry kalení Ke středu | 8 mm | 16 mm | 24 mm | 32 mm | 40 mm | 48 mm | 56 mm | 64 mm | 72 mm | 80 mm | 88 mm | 96 mm | 104 mm | 112 mm | 120 mm | 128 mm | 136 mm | 144 mm | 152 mm | 160 mm | x | |
| | | | | 715 | 704 | 750 | 812 | 815 | 774 | 860 | 798 | 782 | 853 | 733 | 776 | 686 | 747 | 713 | 720 | 720 | 807 | 769 | 803 |
| | | 737 | 737 | 737 | 695 | 800 | 788 | 754 | 789 | 772 | 772 | 761 | 797 | 776 | 742 | 744 | 727 | 740 | 740 | 748 | 835 | 810 | 2 |
| | | 722 | 733 | 706 | 741 | 742 | 797 | 797 | 784 | 756 | 722 | 738 | 820 | 809 | 763 | 824 | 809 | 809 | 755 | 758 | 799 | 3 | |
| | | 784 | 808 | 759 | 787 | 823 | 868 | 803 | 807 | 805 | 801 | 801 | 801 | 816 | 828 | 812 | 848 | 848 | 844 | 809 | 788 | 4 | |
| | | 814 | 766 | 835 | 792 | 869 | 805 | 788 | 868 | 857 | 764 | 860 | 844 | 810 | 763 | 814 | 811 | 811 | 840 | 870 | 848 | 5 | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | x | |

| VZOREK č. 2 | | Měření povrchové tvrdosti kalené vrstvy - Vickers (HV5) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| | | Směr laserového kalení → | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 mm 19 mm 14 mm 9 mm 4 mm x | Kalené plochy šifry kalení Ke středu | 8 mm | 16 mm | 24 mm | 32 mm | 40 mm | 48 mm | 56 mm | 64 mm | 72 mm | 80 mm | 88 mm | 96 mm | 104 mm | 112 mm | 120 mm | 128 mm | 136 mm | 144 mm | 152 mm | 160 mm | x |
| | | | | 822 | 773 | 729 | 804 | 784 | 776 | 827 | 756 | 750 | 747 | 815 | 798 | 790 | 801 | 726 | 822 | 726 | 806 | 749 |
| | | 806 | 817 | 849 | 831 | 811 | 751 | 789 | 819 | 745 | 761 | 784 | 805 | 811 | 775 | 765 | 733 | 811 | 753 | 852 | 814 | 2 |
| | | 779 | 824 | 824 | 779 | 749 | 749 | 846 | 826 | 865 | 868 | 841 | 767 | 790 | 789 | 801 | 869 | 805 | 852 | 872 | 787 | 3 |
| | | 782 | 800 | 776 | 799 | 757 | 777 | 811 | 811 | 848 | 798 | 823 | 796 | 822 | 758 | 814 | 835 | 831 | 801 | 836 | 841 | 4 |
| | | 754 | 835 | 808 | 763 | 776 | 796 | 814 | 785 | 733 | 851 | 880 | 793 | 769 | 805 | 801 | 808 | 829 | 820 | 863 | 777 | 5 |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | x |

| VZOREK č. 3 | | Měření povrchové tvrdosti kalené vrstvy - Vickers (HV5) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| | | Směr laserového kalení → | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 mm 19 mm 14 mm 9 mm 4 mm x | Kalené plochy šifry kalení Ke středu | 8 mm | 16 mm | 24 mm | 32 mm | 40 mm | 48 mm | 56 mm | 64 mm | 72 mm | 80 mm | 88 mm | 96 mm | 104 mm | 112 mm | 120 mm | 128 mm | 136 mm | 144 mm | 152 mm | 160 mm | x |
| | | | | 868 | 815 | 841 | 808 | 767 | 837 | 797 | 848 | 776 | 799 | 843 | 842 | 857 | 810 | 884 | 776 | 856 | 817 | 838 |
| | | 788 | 712 | 788 | 810 | 802 | 746 | 775 | 737 | 809 | 809 | 793 | 819 | 784 | 772 | 734 | 808 | 758 | 797 | 747 | 782 | 2 |
| | | 785 | 818 | 822 | 759 | 726 | 729 | 775 | 779 | 769 | 747 | 806 | 764 | 748 | 780 | 780 | 685 | 753 | 716 | 708 | 813 | 3 |
| | | 763 | 769 | 712 | 768 | 796 | 729 | 721 | 714 | 686 | 726 | 763 | 763 | 686 | 756 | 788 | 802 | 696 | 735 | 767 | 728 | 4 |
| | | 743 | 752 | 748 | 777 | 731 | 689 | 811 | 708 | 803 | 771 | 703 | 709 | 709 | 694 | 801 | 757 | 738 | 764 | 756 | 737 | 5 |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | x |

| VZOREK č. 4 | | Měření povrchové tvrdosti kalené vrstvy - Vickers (HV5) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| | | Směr laserového kalení → | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 mm 19 mm 14 mm 9 mm 4 mm x | Kalené plochy šifry kalení Ke středu | 8 mm | 16 mm | 24 mm | 32 mm | 40 mm | 48 mm | 56 mm | 64 mm | 72 mm | 80 mm | 88 mm | 96 mm | 104 mm | 112 mm | 120 mm | 128 mm | 136 mm | 144 mm | 152 mm | 160 mm | x |
| | | | | 704 | 759 | 712 | 755 | 735 | 686 | 686 | 733 | 788 | 738 | 778 | 750 | 714 | 735 | 708 | 754 | 782 | 763 | 751 |
| | | 806 | 788 | 797 | 759 | 747 | 689 | 759 | 702 | 718 | 734 | 736 | 710 | 737 | 770 | 769 | 761 | 709 | 684 | 738 | 764 | 2 |
| | | 834 | 749 | 682 | 781 | 815 | 773 | 790 | 793 | 801 | 757 | 759 | 798 | 784 | 792 | 717 | 719 | 732 | 725 | 752 | 749 | 3 |
| | | 831 | 724 | 739 | 725 | 793 | 701 | 749 | 728 | 666 | 716 | 742 | 742 | 688 | 650 | 748 | 816 | 744 | 730 | 779 | 779 | 4 |
| | | 742 | 715 | 765 | 759 | 836 | 833 | 849 | 801 | 816 | 769 | 714 | 704 | 704 | 796 | 694 | 758 | 737 | 822 | 701 | 737 | 5 |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | x |

| Měření povrchové tvrdosti | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| Směr laserového kalení → | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| VZOREK č. 5 | | 8 mm | 16 mm | 24 mm | 32 mm | 40 mm | 48 mm | 56 mm | 64 mm | 72 mm | 80 mm | 88 mm | 96 mm | 104 mm | 112 mm | 120 mm | 128 mm | 136 mm | 144 mm | 152 mm | 160 mm | x |
| 24 mm | 754 | 758 | 817 | 802 | 788 | 788 | 741 | 803 | 766 | 769 | 753 | 818 | 843 | 854 | 767 | 784 | 848 | 877 | 757 | 822 | 809 | 1 |
| 19 mm | 733 | 779 | 775 | 839 | 848 | 865 | 865 | 838 | 772 | 888 | 844 | 814 | 836 | 787 | 800 | 801 | 821 | 784 | 858 | 840 | 841 | 2 |
| 14 mm | 800 | 844 | 823 | 762 | 739 | 808 | 788 | 810 | 777 | 768 | 827 | 742 | 742 | 816 | 863 | 818 | 793 | 827 | 794 | 742 | 776 | 3 |
| 9 mm | 797 | 788 | 804 | 811 | 796 | 771 | 831 | 829 | 829 | 821 | 756 | 785 | 799 | 832 | 864 | 753 | 752 | 767 | 797 | 858 | 794 | 4 |
| 4 mm | 793 | 833 | 842 | 778 | 865 | 816 | 860 | 806 | 806 | 862 | 848 | 816 | 810 | 818 | 846 | 798 | 811 | 768 | 801 | 819 | 829 | 5 |
| x | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | x |

| Měření povrchové tvrdosti | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| Směr laserového kalení → | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| VZOREK č. 6 | | 8 mm | 16 mm | 24 mm | 32 mm | 40 mm | 48 mm | 56 mm | 64 mm | 72 mm | 80 mm | 88 mm | 96 mm | 104 mm | 112 mm | 120 mm | 128 mm | 136 mm | 144 mm | 152 mm | 160 mm | x |
| 24 mm | 729 | 786 | 805 | 759 | 758 | 734 | 734 | 715 | 767 | 758 | 788 | 826 | 834 | 809 | 794 | 730 | 755 | 763 | 755 | 742 | 746 | 1 |
| 19 mm | 763 | 734 | 818 | 784 | 726 | 766 | 766 | 763 | 831 | 842 | 737 | 788 | 723 | 690 | 815 | 829 | 782 | 767 | 824 | 788 | 782 | 2 |
| 14 mm | 804 | 800 | 857 | 835 | 845 | 818 | 850 | 850 | 794 | 791 | 814 | 733 | 805 | 839 | 735 | 793 | 842 | 743 | 795 | 756 | 824 | 3 |
| 9 mm | 766 | 759 | 810 | 727 | 784 | 802 | 772 | 772 | 824 | 722 | 769 | 737 | 762 | 788 | 826 | 817 | 816 | 801 | 831 | 823 | 818 | 4 |
| 4 mm | 799 | 724 | 770 | 664 | 619 | 737 | 690 | 690 | 657 | 680 | 588 | 720 | 716 | 640 | 629 | 682 | 674 | 649 | 618 | 732 | 756 | 5 |
| x | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | x |

| Měření povrchové tvrdosti | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| Směr laserového kalení → | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| VZOREK č. 7 | | 8 mm | 16 mm | 24 mm | 32 mm | 40 mm | 48 mm | 56 mm | 64 mm | 72 mm | 80 mm | 88 mm | 96 mm | 104 mm | 112 mm | 120 mm | 128 mm | 136 mm | 144 mm | 152 mm | 160 mm | x |
| 24 mm | 872 | 835 | 820 | 797 | 837 | 827 | 882 | 877 | 882 | 827 | 789 | 745 | 842 | 817 | 777 | 882 | 892 | 811 | 834 | 922 | 860 | 1 |
| 19 mm | 857 | 819 | 842 | 831 | 824 | 808 | 837 | 865 | 810 | 808 | 820 | 789 | 856 | 883 | 865 | 894 | 818 | 775 | 795 | 797 | 820 | 2 |
| 14 mm | 843 | 793 | 811 | 860 | 864 | 764 | 856 | 836 | 836 | 848 | 794 | 811 | 825 | 817 | 840 | 841 | 850 | 862 | 859 | 828 | 754 | 3 |
| 9 mm | 819 | 834 | 820 | 829 | 805 | 826 | 792 | 826 | 862 | 776 | 846 | 811 | 826 | 813 | 873 | 789 | 810 | 812 | 832 | 878 | 832 | 4 |
| 4 mm | 818 | 868 | 834 | 829 | 829 | 914 | 828 | 843 | 843 | 873 | 856 | 842 | 799 | 848 | 793 | 776 | 829 | 782 | 767 | 841 | 807 | 5 |
| x | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | x |

| Měření povrchové tvrdosti | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| Směr laserového kalení → | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| VZOREK č. 8 | | 8 mm | 16 mm | 24 mm | 32 mm | 40 mm | 48 mm | 56 mm | 64 mm | 72 mm | 80 mm | 88 mm | 96 mm | 104 mm | 112 mm | 120 mm | 128 mm | 136 mm | 144 mm | 152 mm | 160 mm | x |
| 24 mm | 828 | 813 | 777 | 793 | 795 | 842 | 775 | 770 | 860 | 842 | 877 | 790 | 737 | 818 | 803 | 849 | 852 | 813 | 886 | 855 | 881 | 1 |
| 19 mm | 818 | 831 | 848 | 823 | 849 | 831 | 831 | 828 | 826 | 873 | 848 | 800 | 811 | 795 | 840 | 855 | 875 | 821 | 798 | 856 | 810 | 2 |
| 14 mm | 850 | 819 | 784 | 825 | 797 | 818 | 763 | 763 | 835 | 817 | 851 | 826 | 861 | 834 | 810 | 824 | 845 | 831 | 839 | 858 | 796 | 3 |
| 9 mm | 800 | 811 | 780 | 845 | 859 | 812 | 806 | 814 | 837 | 837 | 835 | 816 | 816 | 776 | 784 | 843 | 835 | 835 | 835 | 843 | 826 | 4 |
| 4 mm | 816 | 793 | 809 | 837 | 814 | 756 | 805 | 805 | 777 | 805 | 788 | 745 | 787 | 880 | 754 | 809 | 788 | 834 | 848 | 856 | 831 | 5 |
| x | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | x |

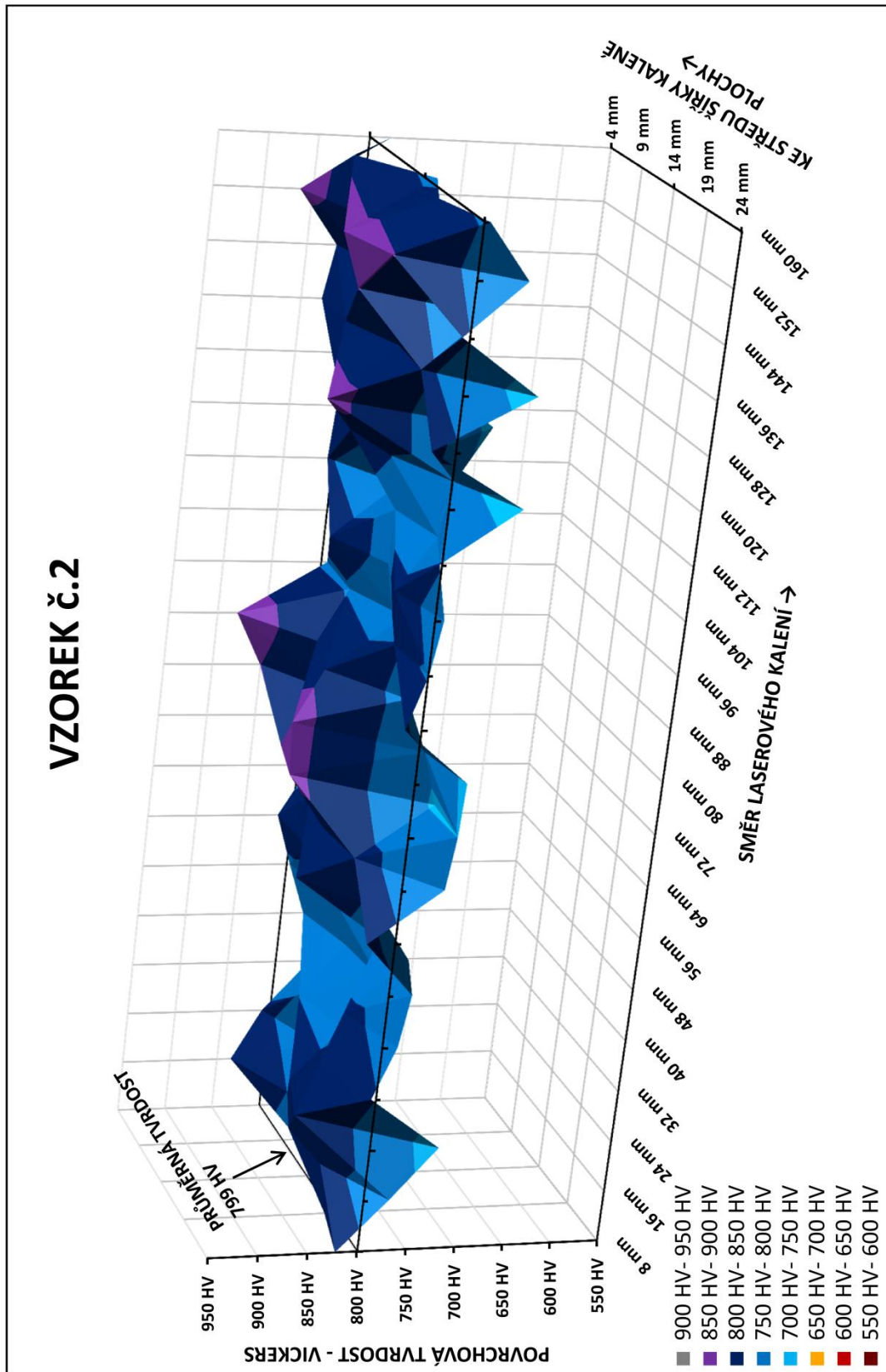
| VZOREK č. 9 | | Měření povrchové tvrdosti | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|---------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| | | Směr laserového kalení → | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ← Ke střed šifky kalené plochy | 24 mm | 16 mm | 8 mm | 8 mm | 16 mm | 24 mm | 32 mm | 40 mm | 48 mm | 56 mm | 64 mm | 72 mm | 80 mm | 88 mm | 96 mm | 104 mm | 112 mm | 120 mm | 128 mm | 136 mm | 144 mm | 152 mm | 160 mm | x |
| | | 871 | 908 | 826 | 826 | 779 | 806 | 782 | 876 | 898 | 861 | 827 | 805 | 818 | 850 | 820 | 850 | 801 | 886 | 850 | 801 | 863 | 908 | 763 |
| | 797 | 826 | 837 | 835 | 859 | 835 | 814 | 829 | 801 | 798 | 816 | 798 | 836 | 796 | 842 | 821 | 886 | 776 | 807 | 865 | 807 | 865 | 767 | 2 |
| | 847 | 844 | 810 | 788 | 857 | 808 | 829 | 886 | 859 | 845 | 798 | 818 | 831 | 820 | 858 | 820 | 797 | 843 | 844 | 844 | 844 | 829 | 3 | |
| | 798 | 779 | 816 | 781 | 789 | 771 | 789 | 798 | 784 | 770 | 816 | 833 | 801 | 777 | 780 | 842 | 846 | 880 | 848 | 848 | 848 | 810 | 4 | |
| | 797 | 806 | 842 | 818 | 773 | 869 | 842 | 833 | 833 | 869 | 828 | 786 | 845 | 800 | 848 | 837 | 798 | 829 | 873 | 831 | 829 | 873 | 881 | 5 |
| x | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 19 | 20 | x | |

| VZOREK č. 10 | | Měření povrchové tvrdosti | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|---------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| | | Směr laserového kalení → | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ← Ke střed šifky kalené plochy | 24 mm | 16 mm | 8 mm | 8 mm | 16 mm | 24 mm | 32 mm | 40 mm | 48 mm | 56 mm | 64 mm | 72 mm | 80 mm | 88 mm | 96 mm | 104 mm | 112 mm | 120 mm | 128 mm | 136 mm | 144 mm | 152 mm | 160 mm | x |
| | | 729 | 785 | 830 | 773 | 729 | 798 | 822 | 729 | 822 | 853 | 771 | 803 | 758 | 797 | 835 | 761 | 846 | 846 | 846 | 775 | 854 | 771 | 1 |
| | 759 | 805 | 801 | 837 | 829 | 876 | 758 | 758 | 862 | 813 | 806 | 872 | 858 | 804 | 846 | 852 | 779 | 793 | 818 | 856 | 856 | 781 | 2 | |
| | 793 | 763 | 810 | 779 | 797 | 771 | 769 | 855 | 777 | 817 | 847 | 831 | 813 | 814 | 823 | 847 | 860 | 888 | 824 | 888 | 824 | 785 | 3 | |
| | 765 | 790 | 754 | 827 | 818 | 780 | 860 | 813 | 861 | 877 | 888 | 790 | 803 | 886 | 813 | 777 | 851 | 826 | 873 | 843 | 843 | 843 | 4 | |
| | 808 | 753 | 752 | 822 | 847 | 835 | 803 | 876 | 827 | 874 | 869 | 878 | 839 | 821 | 776 | 834 | 800 | 789 | 742 | 834 | 742 | 834 | 5 | |
| x | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 19 | 20 | x | |

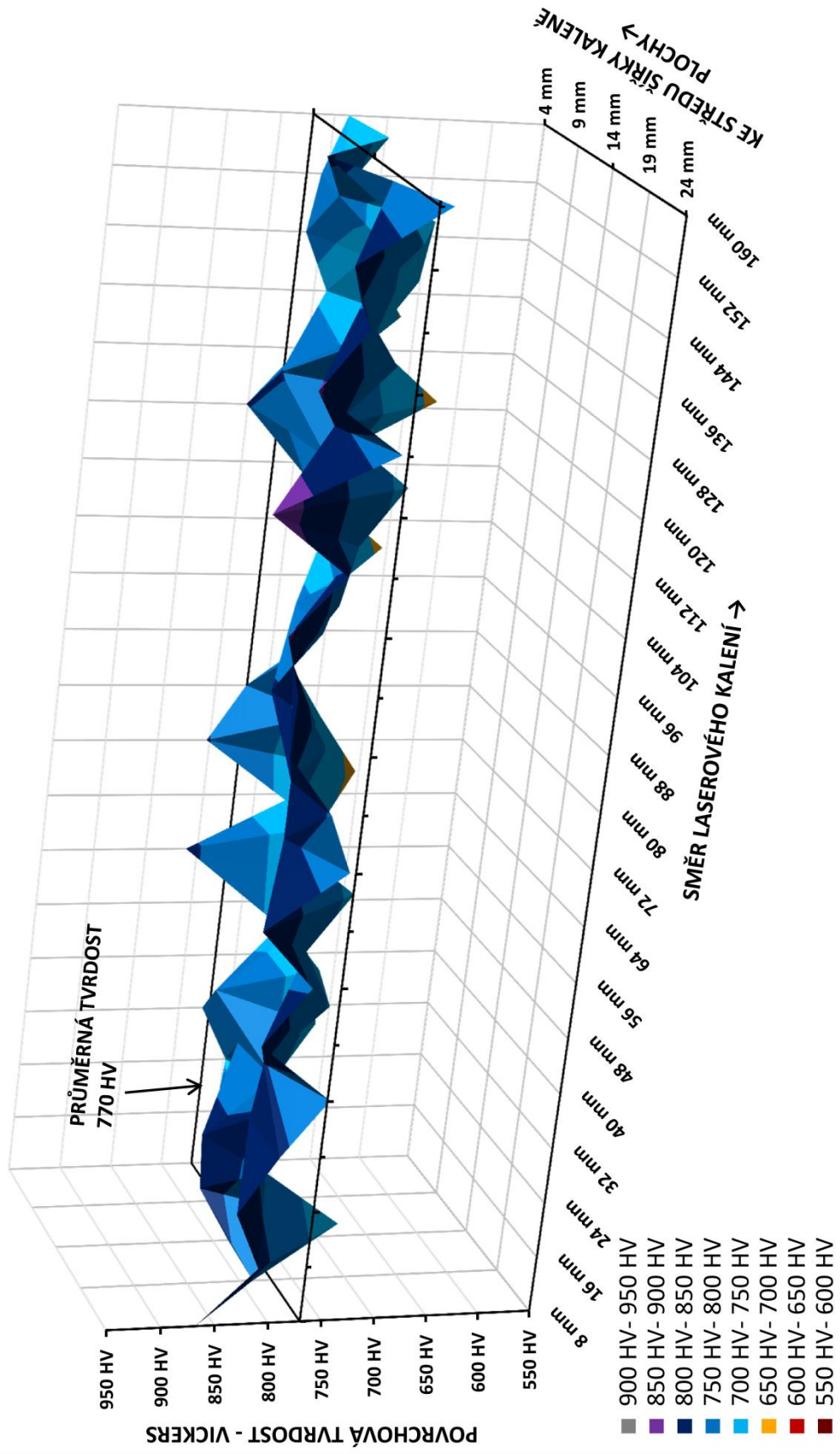
| VZOREK č. 11 | | Měření povrchové tvrdosti | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|---------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| | | Směr laserového kalení → | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ← Ke střed šifky kalené plochy | 24 mm | 16 mm | 8 mm | 8 mm | 16 mm | 24 mm | 32 mm | 40 mm | 48 mm | 56 mm | 64 mm | 72 mm | 80 mm | 88 mm | 96 mm | 104 mm | 112 mm | 120 mm | 128 mm | 136 mm | 144 mm | 152 mm | 160 mm | x |
| | | 841 | 860 | 880 | 785 | 829 | 872 | 860 | 834 | 834 | 852 | 824 | 857 | 840 | 832 | 818 | 811 | 782 | 766 | 801 | 776 | 776 | 759 | 1 |
| | 882 | 817 | 837 | 785 | 811 | 813 | 901 | 835 | 833 | 833 | 860 | 835 | 844 | 832 | 887 | 841 | 822 | 886 | 840 | 854 | 854 | 826 | 2 | |
| | 837 | 843 | 835 | 790 | 801 | 860 | 811 | 889 | 811 | 835 | 829 | 826 | 826 | 864 | 886 | 869 | 818 | 820 | 851 | 880 | 837 | 837 | 3 | |
| | 810 | 864 | 813 | 785 | 843 | 793 | 868 | 866 | 869 | 808 | 831 | 860 | 852 | 857 | 821 | 822 | 843 | 825 | 823 | 823 | 823 | 829 | 4 | |
| | 844 | 830 | 833 | 826 | 865 | 844 | 826 | 839 | 840 | 848 | 807 | 832 | 826 | 754 | 766 | 837 | 829 | 877 | 882 | 882 | 863 | 863 | 5 | |
| x | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 19 | 20 | x | |

| VZOREK č. 12 | | Měření povrchové tvrdosti | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|---------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| | | Směr laserového kalení → | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ← Ke střed šifky kalené plochy | 24 mm | 16 mm | 8 mm | 8 mm | 16 mm | 24 mm | 32 mm | 40 mm | 48 mm | 56 mm | 64 mm | 72 mm | 80 mm | 88 mm | 96 mm | 104 mm | 112 mm | 120 mm | 128 mm | 136 mm | 144 mm | 152 mm | 160 mm | x |
| | | 848 | 777 | 800 | 811 | 786 | 805 | 787 | 738 | 738 | 759 | 832 | 738 | 767 | 830 | 781 | 838 | 810 | 799 | 831 | 835 | 835 | 815 | 1 |
| | 894 | 822 | 832 | 765 | 894 | 787 | 790 | 831 | 942 | 818 | 860 | 787 | 830 | 911 | 843 | 772 | 843 | 862 | 844 | 860 | 860 | 876 | 2 | |
| | 878 | 823 | 766 | 763 | 833 | 785 | 892 | 836 | 836 | 856 | 890 | 832 | 843 | 853 | 860 | 858 | 879 | 873 | 831 | 844 | 837 | 837 | 3 | |
| | 867 | 806 | 855 | 845 | 828 | 824 | 877 | 875 | 839 | 839 | 816 | 854 | 839 | 860 | 875 | 839 | 763 | 874 | 837 | 843 | 843 | 835 | 4 | |
| | 902 | 865 | 792 | 794 | 762 | 841 | 830 | 808 | 803 | 873 | 813 | 861 | 810 | 830 | 877 | 804 | 881 | 837 | 809 | 801 | 837 | 801 | 5 | |
| x | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 19 | 20 | x | |

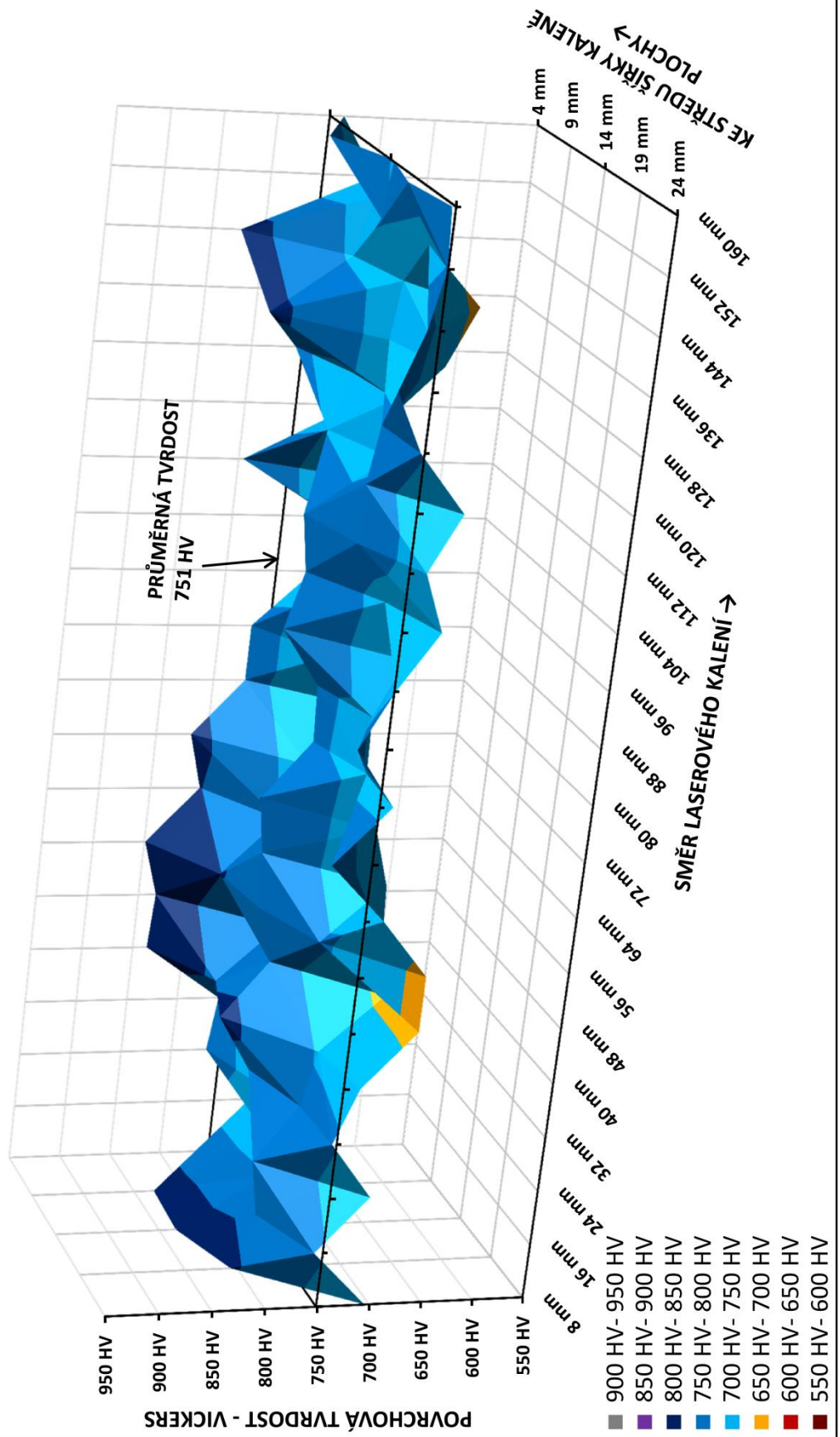
Příloha G Grafy povrchové tvrdosti jednotlivých vzorků



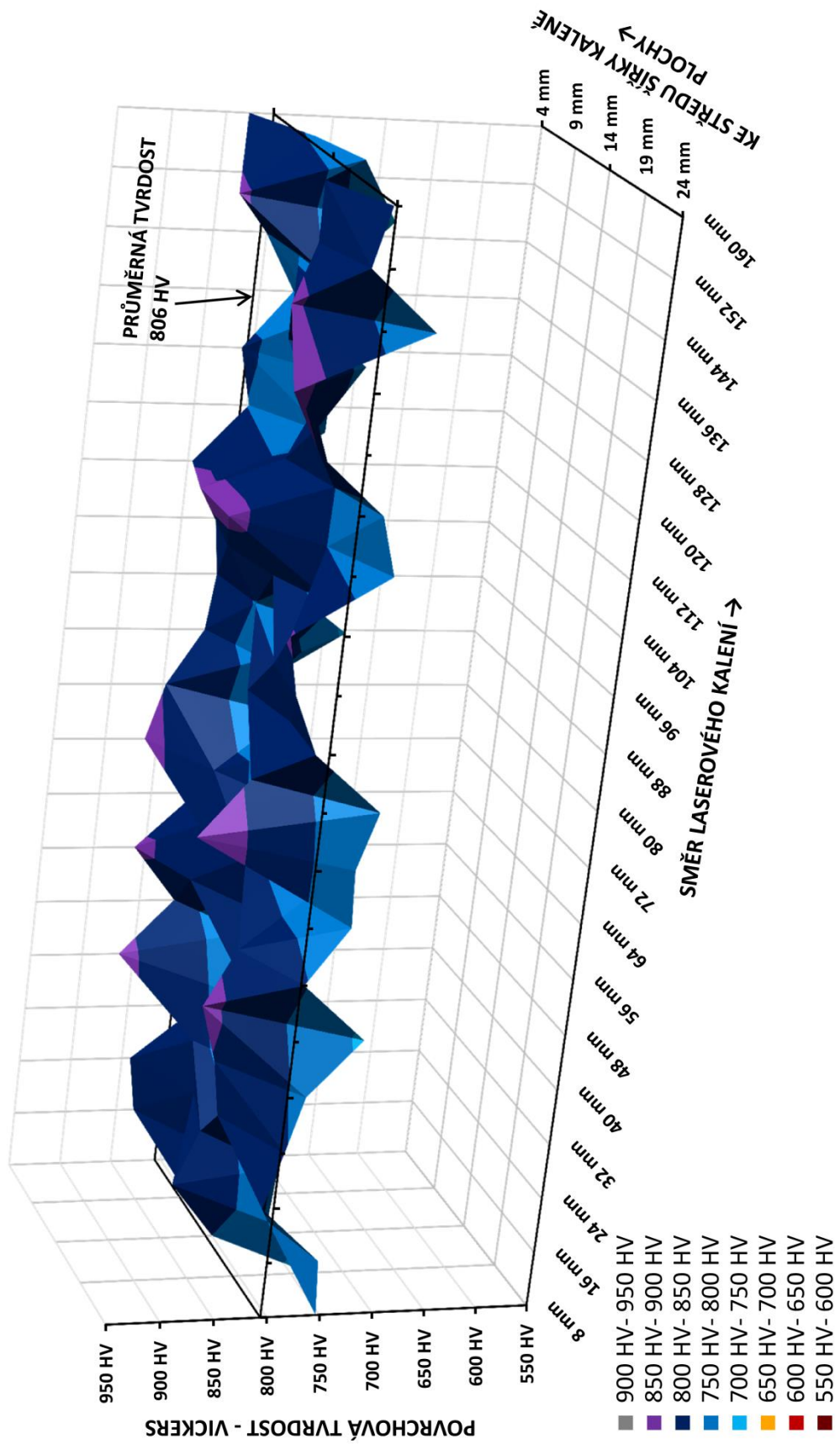
VZOREK Č.3



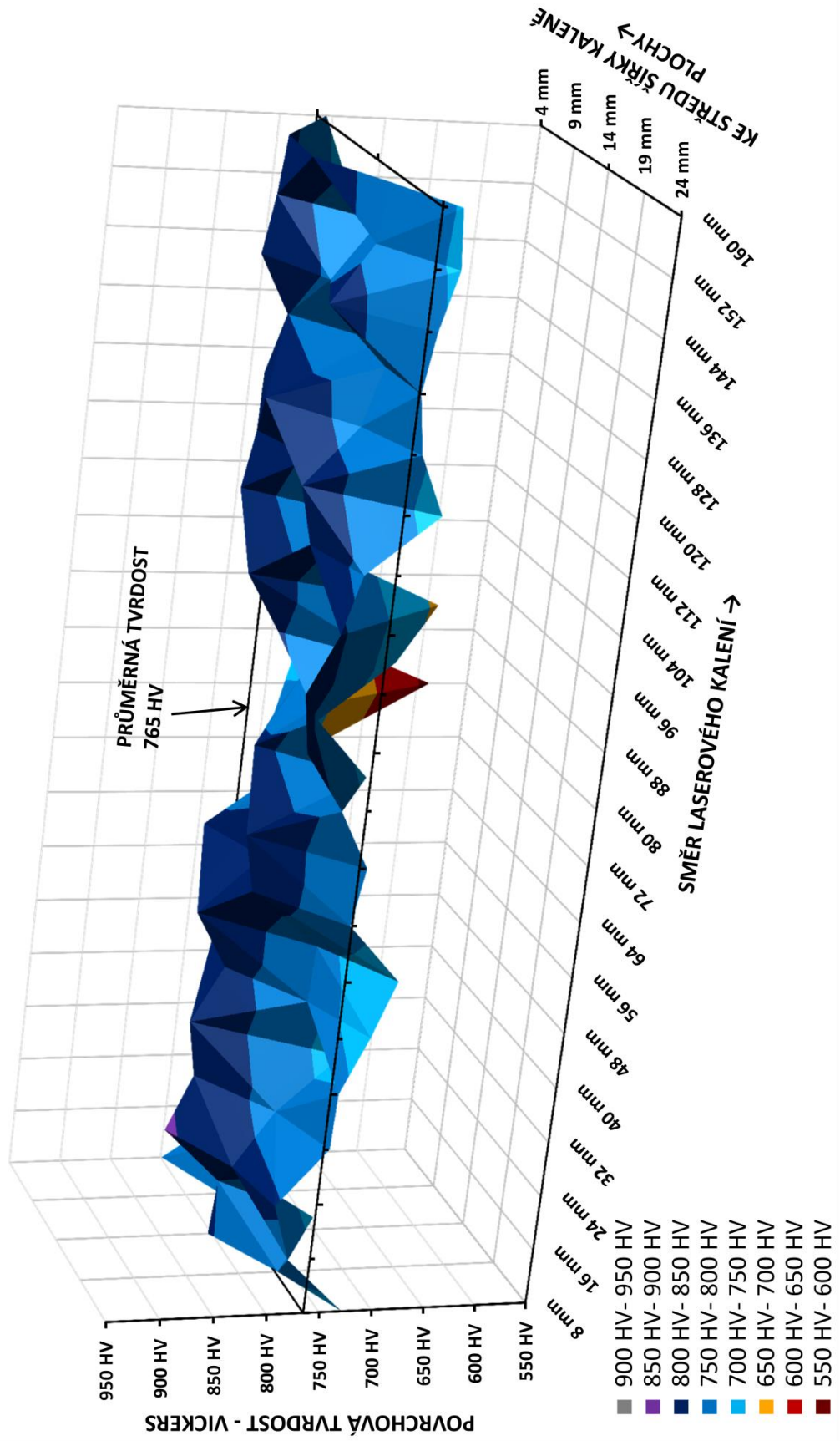
VZOREK Č.4



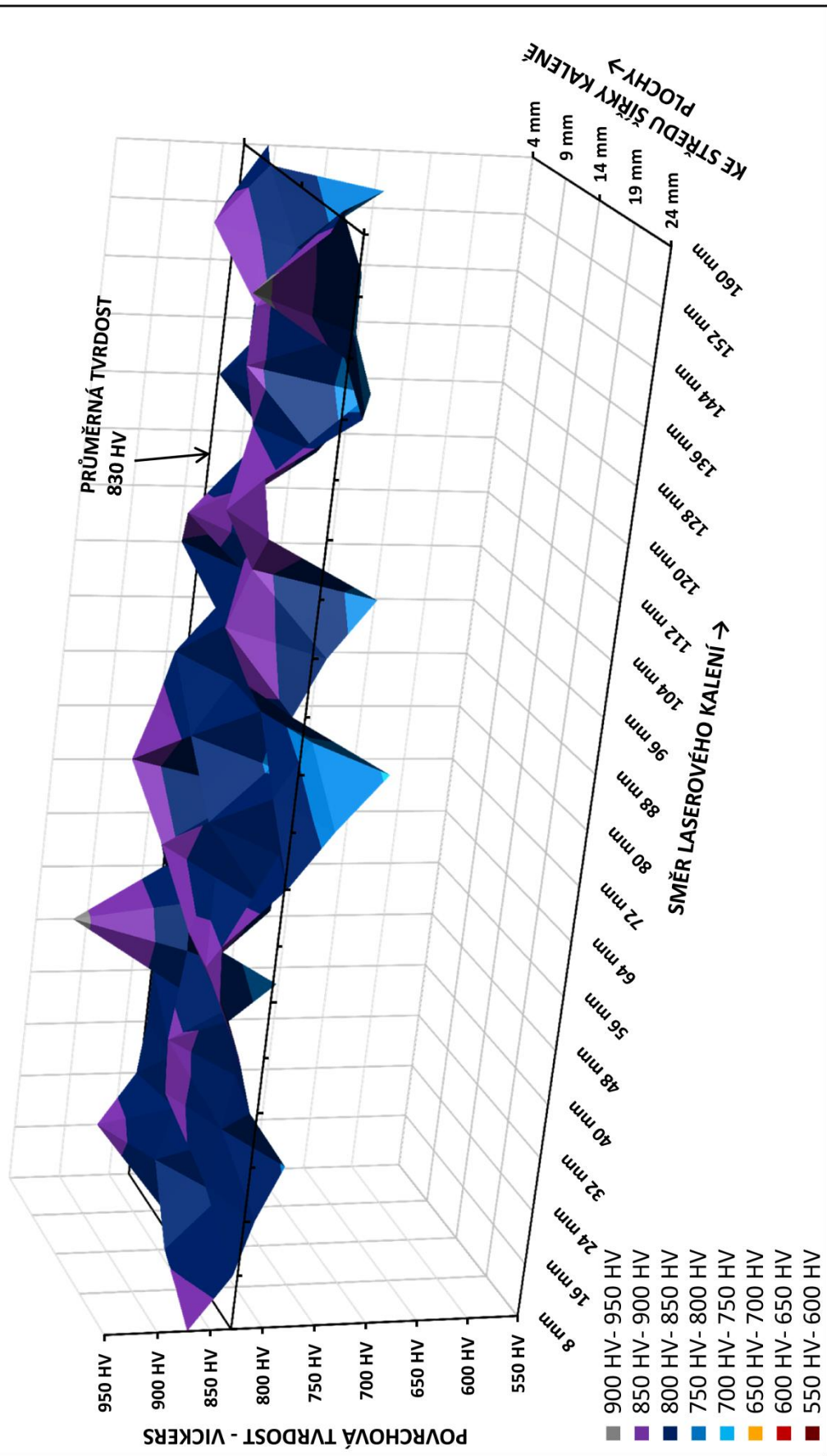
VZOREK Č.5



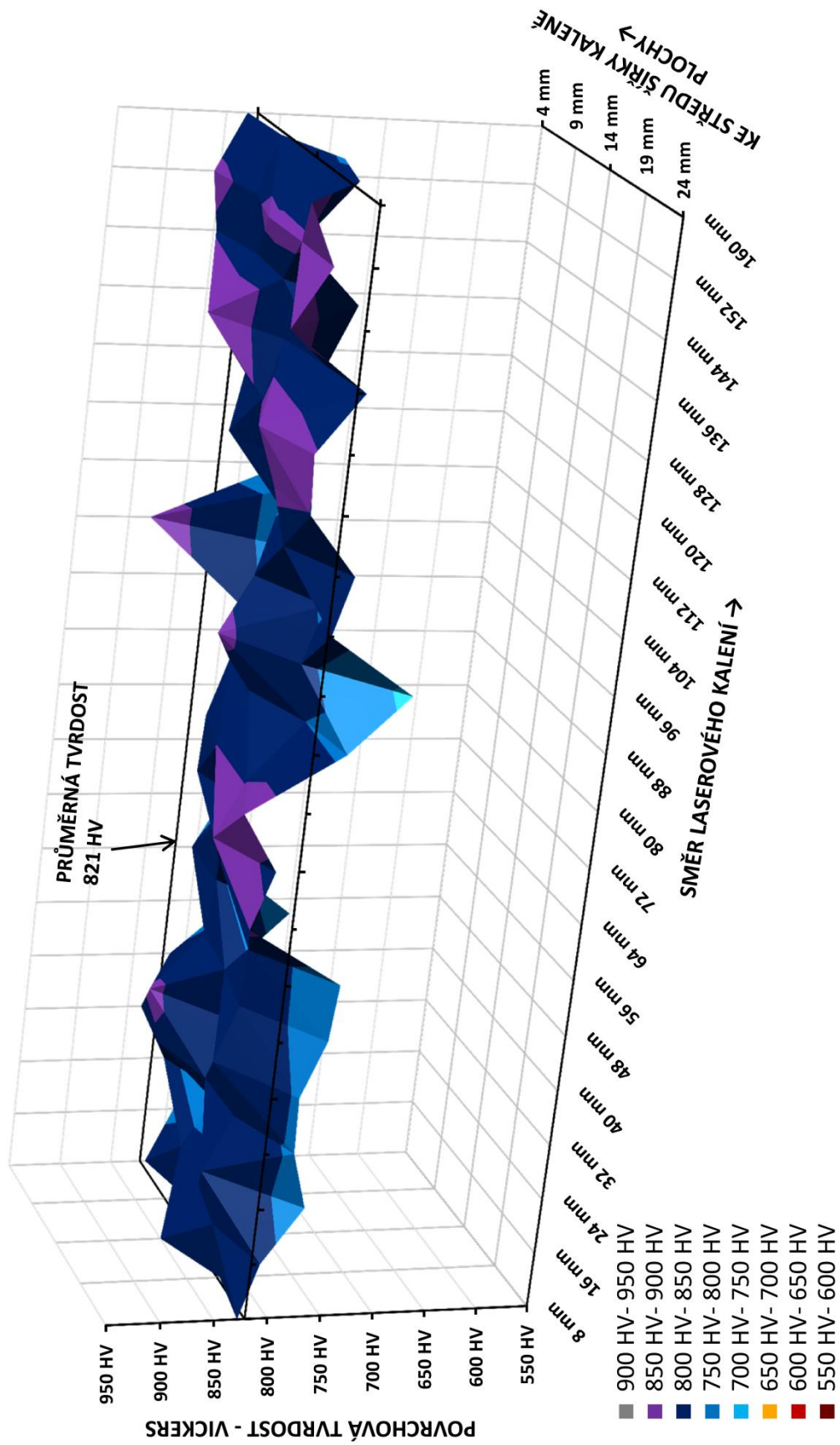
VZOREK Č.6



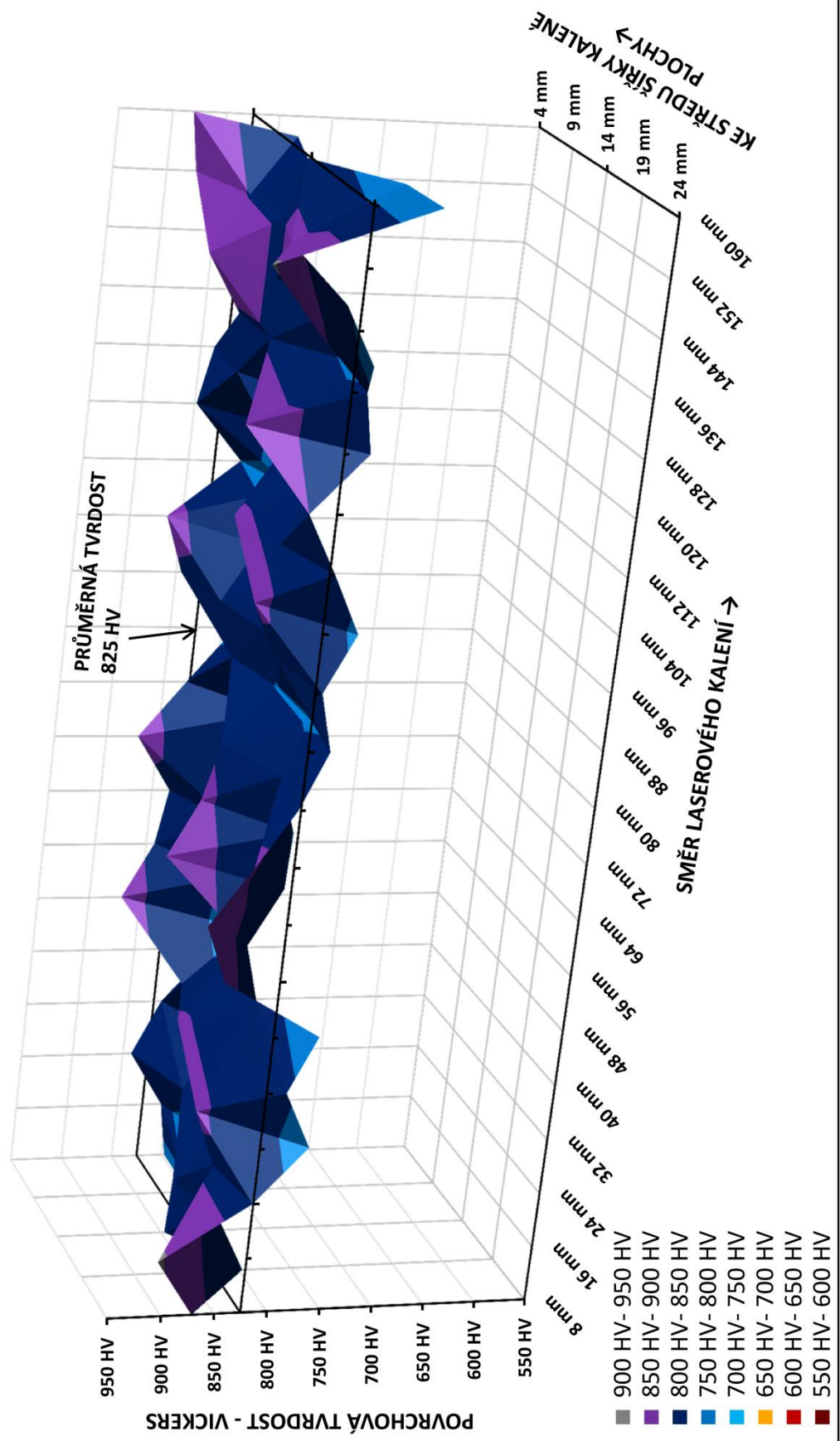
VZOREK Č.7



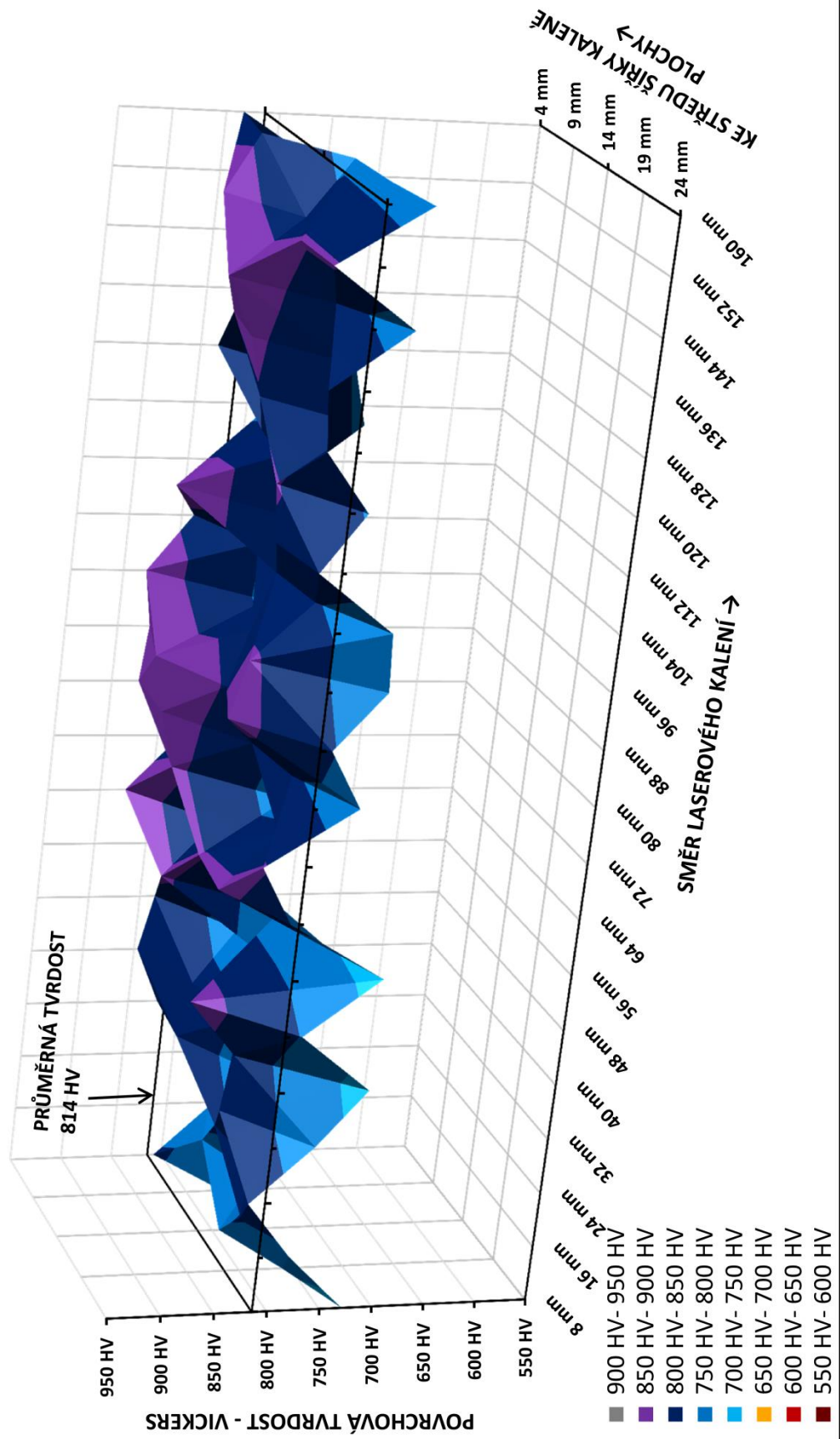
VZOREK Č.8



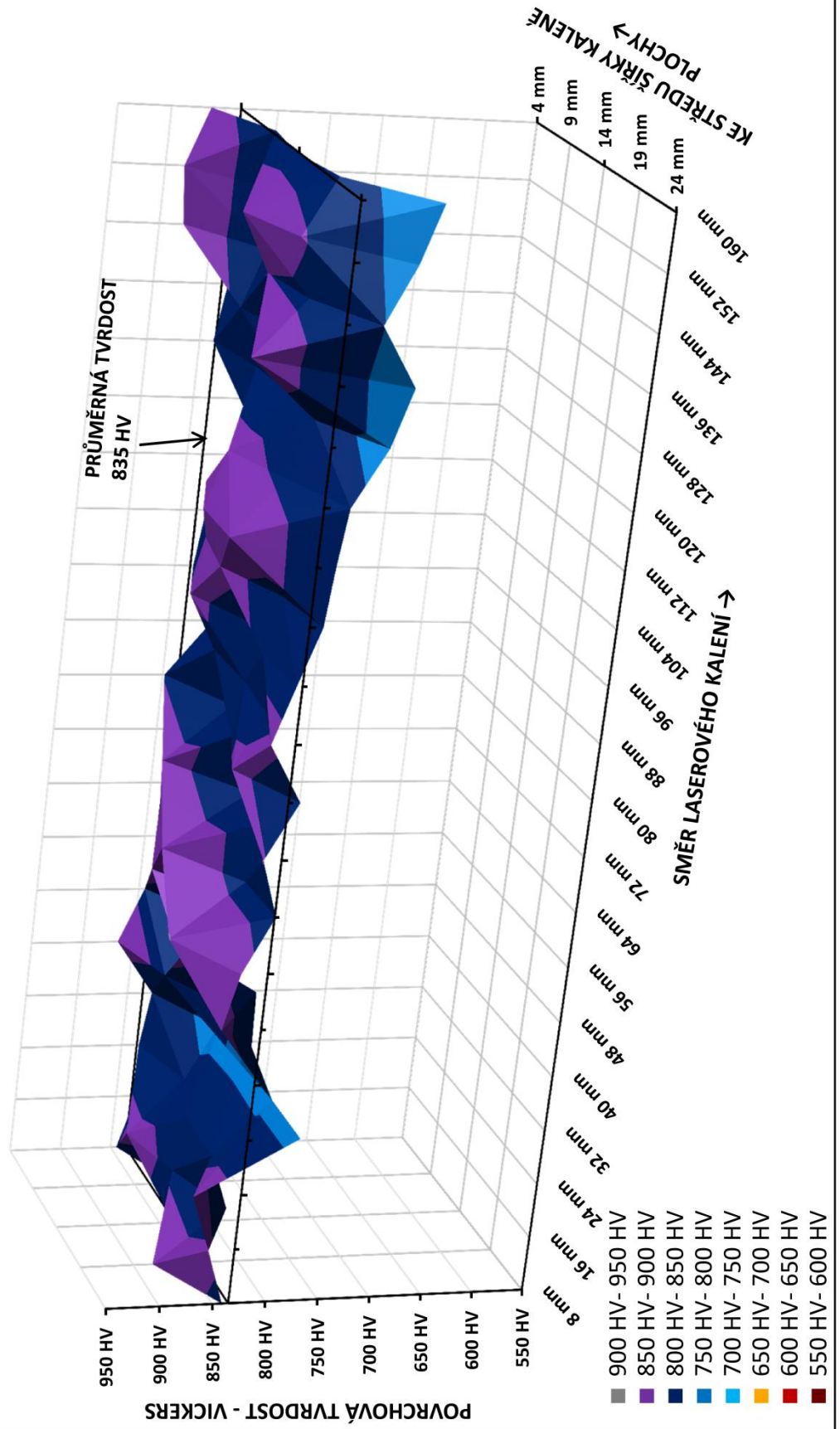
VZOREK Č.9



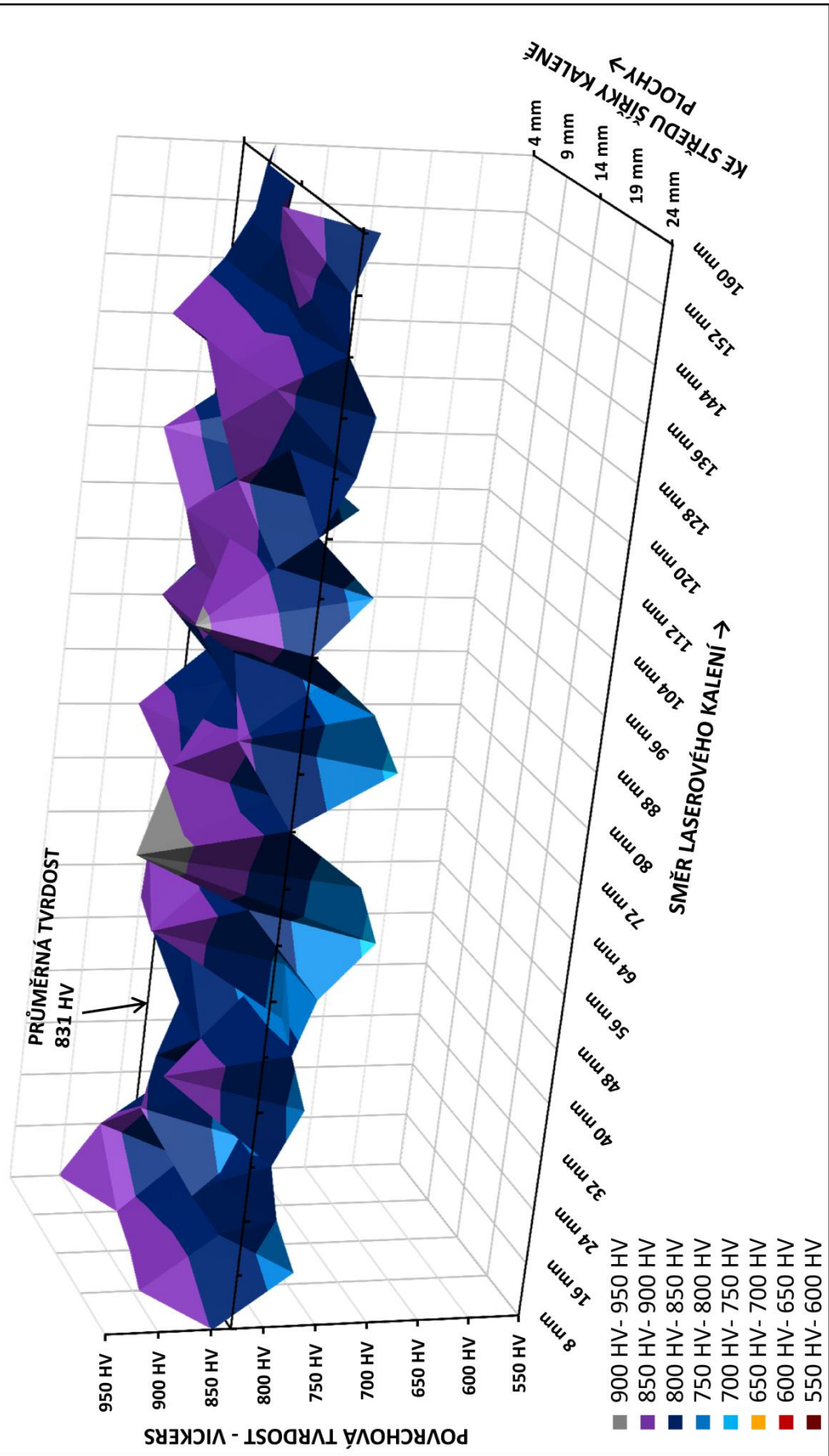
VZOREK Č.10



VZOREK Č.11



VZOREK Č.12



Příloha H Měření mikrotvrdomosti kalené vrstvy

| Vzorek č. 1 | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|----------------------|----------------------|---------------------|
| číslo měření | Dist[μm] | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
| 1 | 20,0 | 876,3 | 14,6 | 14,5 | 14,5 |
| 2 | 103,0 | 767,0 | 15,5 | 15,6 | 15,6 |
| 3 | 204,4 | 746,8 | 16,1 | 15,4 | 15,8 |
| 4 | 266,4 | 736,8 | 15,7 | 16,1 | 15,9 |
| 5 | 326,6 tvrdost ledeburitu | 892,3 | 14,0 | 14,8 | 14,4 |
| 6 | 371,0 | 820,5 | 15,0 | 15,0 | 15,0 |
| 7 | 521,2 | 675,0 | 16,3 | 16,9 | 16,6 |
| 8 | 649,4 | 738,2 | 15,8 | 15,8 | 15,9 |
| 9 | 734,5 | 606,1 | 17,3 | 17,7 | 17,5 |
| 10 | 865,2 | 578,0 | 17,7 | 18,1 | 17,9 |
| 11 | 945,4 | 558,8 | 18,1 | 18,3 | 18,2 |
| 12 | 1080,6 | 425,0 | 21,0 | 20,8 | 20,9 |
| 13 | 1372,3 | 390,5 | 21,9 | 21,7 | 21,8 |
| 14 | 1576,3 | 320,2 | 24,1 | 24,0 | 24,1 |
| 15 | 1776,0 | 225,6 | 28,5 | 28,8 | 28,7 |
| 16 | 1954,8 | 285,3 | 25,6 | 25,4 | 25,5 |
| 17 | 2274,2 | 241,8 | 27,4 | 28,0 | 27,7 |

| Vzorek č. 2 | | | | | |
|--------------|-----------------------|--------|----------------------|----------------------|---------------------|
| číslo měření | Dist[μm] | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
| 1 | 12,8 | 657,2 | 16,5 | 17,1 | 16,8 |
| 2 | 31,0 | 591,9 | 17,7 | 17,7 | 17,7 |
| 3 | 57,0 | 657,5 | 17,1 | 16,5 | 16,8 |
| 4 | 81,8 | 701,4 | 15,6 | 16,9 | 16,3 |
| 5 | 141,0 | 819,8 | 15,8 | 14,2 | 15,0 |
| 6 | 169,2 | 841,6 | 15,2 | 14,4 | 14,8 |
| 7 | 189,6 | 797,3 | 15,0 | 15,5 | 15,3 |
| 8 | 226,8 | 727,6 | 16,3 | 15,7 | 16,0 |
| 9 | 249,7 | 596,2 | 17,3 | 17,9 | 17,6 |
| 10 | 350,9 | 469,6 | 19,5 | 20,3 | 19,9 |
| 11 | 378,9 | 396,7 | 21,0 | 22,2 | 21,6 |
| 12 | 428,6 | 301,4 | 23,9 | 25,7 | 24,8 |
| 13 | 576,2 | 382,3 | 21,9 | 22,1 | 22,0 |
| 14 | 726,8 | 348,5 | 22,8 | 23,4 | 23,1 |
| 15 | 1052,8 | 397,5 | 21,4 | 21,8 | 21,6 |
| 16 | 1272,5 | 287,6 | 25,7 | 25,1 | 25,4 |
| 17 | 1398,6 | 242,8 | 27,4 | 27,8 | 27,6 |
| 18 | 1534,5 | 249,0 | 27,0 | 27,6 | 27,3 |
| 19 | 1999,8 | 226,7 | 30,0 | 27,2 | 28,6 |

| Vzorek č. 2 - oblast bez vrstvy | | | | | |
|---------------------------------|-----------------------|--------|----------------------|----------------------|---------------------|
| číslo měření | Dist[μm] | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
| 1 | 36,4 | 319,5 | 24,3 | 23,9 | 24,1 |
| 2 | 66,3 | 357,8 | 23,7 | 21,9 | 22,8 |
| 3 | 95,1 | 371,7 | 22,5 | 22,2 | 22,3 |
| 4 | 185,2 | 339,6 | 23,7 | 23,1 | 23,4 |
| 5 | 272,1 | 259,1 | 28,0 | 25,5 | 26,8 |
| 6 | 388,3 | 265,0 | 25,7 | 27,2 | 26,5 |
| 7 | 783,6 | 238,5 | 28,2 | 27,6 | 27,9 |
| 8 | 1328,6 | 252,3 | 26,8 | 27,4 | 27,1 |
| 9 | 1765,4 | 235,2 | 28,3 | 27,9 | 28,1 |
| 10 | 2026,9 | 240,2 | 30,3 | 25,3 | 27,8 |

| Vzorek č. 3 | | | | | |
|--------------|---------------------------------------|--------|----------------------|----------------------|---------------------|
| číslo měření | Dist[μm] | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
| 1 | 12,4 - ledeburit | 728,7 | 16,7 | 15,2 | 16,0 |
| 2 | 16,6 - ledeburit | 767,3 | 15,2 | 15,9 | 15,5 |
| 3 | 35,2 - martenzit a zbytkový austenit | 511,0 | 19,2 | 18,9 | 19,0 |
| 4 | 59,6 - ledeburit | 650,8 | 17,1 | 16,7 | 16,9 |
| 5 | 68,6 - zbytkový austenit | 348,2 | 23,1 | 23,1 | 23,1 |
| 6 | 127 - zbytkový austenit | 339,5 | 22,2 | 24,5 | 23,4 |
| 7 | 186,8 - zbytkový austenit a martenzit | 372,0 | 21,8 | 22,8 | 22,3 |
| 8 | 243,6 | 487,8 | 19,4 | 19,6 | 19,5 |
| 9 | 372,8 | 385,7 | 21,4 | 22,4 | 21,9 |
| 10 | 473,8 | 552,8 | 18,3 | 18,3 | 18,3 |
| 11 | 605,4 | 692,5 | 16,3 | 16,5 | 16,4 |
| 12 | 647,0 | 699,7 | 15,3 | 17,3 | 16,3 |
| 13 | 795,6 | 489,7 | 20,2 | 18,7 | 19,5 |
| 14 | 1036,1 | 506,4 | 19,8 | 18,5 | 19,1 |
| 15 | 1345,6 | 568,4 | 18,2 | 18,0 | 18,1 |
| 16 | 1517,4 | 395,4 | 21,3 | 22,1 | 21,7 |
| 17 | 1646,8 | 401,6 | 21,7 | 21,3 | 21,5 |
| 18 | 1865,7 | 234,6 | 27,8 | 28,4 | 28,1 |
| 19 | 2134,2 | 242,8 | 27,9 | 27,3 | 27,6 |
| 20 | 2296,2 | 251,2 | 27,0 | 27,4 | 27,2 |

| Vzorek č. 4 | | | | | |
|--------------|-----------------------|--------|----------------------|----------------------|---------------------|
| číslo měření | Dist[μm] | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
| 1 | 23,6 | 700,9 | 16,5 | 16,1 | 16,3 |
| 2 | 55,0 | 756,7 | 15,9 | 15,5 | 15,7 |
| 3 | 89,2 | 605,5 | 17,5 | 17,5 | 17,5 |
| 4 | 127,6 | 565,1 | 17,9 | 18,3 | 18,1 |
| 5 | 170,2 | 578,6 | 18,3 | 17,5 | 17,9 |
| 6 | 281,4 | 455,3 | 19,8 | 20,6 | 20,2 |
| 7 | 358,4 | 524,1 | 19,0 | 18,6 | 18,8 |
| 8 | 456,4 | 514,4 | 19,2 | 18,8 | 19,0 |
| 9 | 649,8 | 528,1 | 18,5 | 19,0 | 18,7 |
| 10 | 746,4 | 494,7 | 19,3 | 19,4 | 19,4 |
| 11 | 910,2 | 504,3 | 19,2 | 19,2 | 19,2 |
| 12 | 1065,8 | 450,5 | 20,5 | 20,1 | 20,3 |
| 13 | 1285,8 | 408,4 | 22,0 | 20,6 | 21,3 |
| 14 | 1431,4 | 411,6 | 21,7 | 20,8 | 21,2 |
| 15 | 1572,2 | 287,5 | 25,8 | 25,0 | 25,4 |
| 16 | 1826,8 | 245,8 | 27,1 | 27,9 | 27,5 |
| 17 | 2145,3 | 241,5 | 27,2 | 28,2 | 27,7 |

| Vzorek č. 4 - slabší vrstva | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|--------|----------------------|----------------------|---------------------|
| číslo měření | Dist[μm] | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
| 1 | 15,1 | 821,3 | 14,4 | 15,6 | 15,0 |
| 2 | 62,4 | 692,4 | 15,9 | 16,9 | 16,4 |
| 3 | 114,9 | 692,7 | 16,7 | 16,1 | 16,4 |
| 4 | 221,1 | 718,4 | 15,7 | 16,5 | 16,1 |
| 5 | 344,1 | 693,0 | 16,3 | 16,5 | 16,4 |
| 6 | 565,5 | 642,1 | 17,3 | 16,7 | 17,0 |
| 7 | 740,3 | 380,0 | 22,6 | 21,5 | 22,1 |
| 8 | 849,3 | 319,7 | 24,9 | 23,3 | 24,1 |
| 9 | 1211,8 | 301,5 | 24,7 | 24,9 | 24,8 |
| 10 | 1574,3 | 279,1 | 25,5 | 26,1 | 25,8 |
| 11 | 1979,0 | 249,4 | 28,6 | 25,9 | 27,3 |

| Vzorek č. 5 | | | | | |
|--------------|----------|--------|---------|---------|--------|
| číslo měření | Dist[μm] | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
| 1 | 11,8 | 768,1 | 15,4 | 15,6 | 15,5 |
| 2 | 23,6 | 727,0 | 16,3 | 15,7 | 16,0 |
| 3 | 63,8 | 703,2 | 16,0 | 16,4 | 16,2 |
| 4 | 80,2 | 780,2 | 15,3 | 15,5 | 15,4 |
| 5 | 109,2 | 799,3 | 15,6 | 14,8 | 15,2 |
| 6 | 162,2 | 650,9 | 16,9 | 16,9 | 16,9 |
| 7 | 306,8 | 627,8 | 17,1 | 17,3 | 17,2 |
| 8 | 448,8 | 879,7 | 14,4 | 14,6 | 14,5 |
| 9 | 500,6 | 709,1 | 15,8 | 16,5 | 16,2 |
| 10 | 610,6 | 658,6 | 16,9 | 16,7 | 16,8 |
| 11 | 983,2 | 620,1 | 17,0 | 17,6 | 17,3 |
| 12 | 1081,8 | 545,7 | 18,7 | 18,1 | 18,4 |
| 13 | 1202,0 | 531,2 | 18,8 | 18,6 | 18,7 |
| 14 | 1401,6 | 442,0 | 19,1 | 21,8 | 20,5 |
| 15 | 1444,4 | 425,0 | 21,2 | 20,6 | 20,9 |
| 16 | 1756,3 | 308,2 | 25,3 | 23,7 | 24,5 |
| 17 | 1990,0 | 251,3 | 27,2 | 27,2 | 27,2 |

| Vzorek č. 6 | | | | | |
|--------------|----------|--------|---------|---------|--------|
| číslo měření | Dist[μm] | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
| 1 | 24,1 | 708,1 | 17,1 | 15,2 | 16,2 |
| 2 | 49,3 | 893,1 | 14,0 | 14,8 | 14,4 |
| 3 | 90,5 | 919,6 | 15,2 | 13,2 | 14,2 |
| 4 | 99,6 | 874,9 | 13,0 | 16,1 | 14,6 |
| 5 | 149,1 | 788,8 | 15,0 | 15,6 | 15,3 |
| 6 | 243,1 | 691,6 | 16,5 | 16,3 | 16,4 |
| 7 | 328,1 | 789,0 | 15,0 | 15,6 | 15,3 |
| 8 | 435,0 | 565,0 | 17,7 | 18,5 | 18,1 |
| 9 | 562,9 | 489,5 | 19,8 | 19,1 | 19,5 |
| 10 | 715,9 | 371,7 | 22,2 | 22,5 | 22,3 |
| 11 | 945,7 | 351,9 | 22,8 | 23,2 | 23,0 |
| 12 | 1167,8 | 370,2 | 22,0 | 22,8 | 22,4 |
| 13 | 1487,7 | 291,1 | 25,7 | 24,7 | 25,2 |
| 14 | 1745,8 | 242,3 | 27,4 | 28,0 | 27,7 |
| 15 | 2003,9 | 296,7 | 25,9 | 24,1 | 25,0 |

| Vzorek č. 6 – slabší vrstva | | | | | |
|-----------------------------|----------|--------|---------|---------|--------|
| číslo měření | Dist[μm] | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
| 1 | 19,7 | 810,2 | 15,2 | 15,0 | 15,1 |
| 2 | 44,9 | 842,9 | 15,0 | 14,6 | 14,8 |
| 3 | 82,4 | 528,6 | 18,7 | 18,7 | 18,7 |
| 4 | 127,4 | 420,1 | 21,0 | 21,0 | 21,0 |
| 5 | 170,6 | 424,7 | 21,4 | 20,4 | 20,9 |
| 6 | 323,9 | 339,4 | 23,9 | 22,8 | 23,4 |
| 7 | 443,4 | 271,2 | 26,2 | 26,1 | 26,1 |
| 8 | 721,7 | 274,6 | 25,7 | 26,3 | 26,0 |
| 9 | 974,3 | 289,5 | 25,0 | 25,6 | 25,3 |
| 10 | 1146,3 | 264,2 | 26,2 | 26,8 | 26,5 |
| 11 | 1597,4 | 246,7 | 27,8 | 27,0 | 27,4 |
| 12 | 1990,8 | 247,4 | 26,5 | 28,2 | 27,4 |

| Vzorek č. 7 | | | | | |
|--------------|----------|--------|---------|---------|--------|
| číslo měření | Dist[μm] | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
| 1 | 16,0 | 777,0 | 14,8 | 16,1 | 15,4 |
| 2 | 17,4 | 540,6 | 18,1 | 18,9 | 18,5 |
| 3 | 18,4 | 627,1 | 16,5 | 17,9 | 17,2 |
| 4 | 46,8 | 821,5 | 15,2 | 14,8 | 15,0 |
| 5 | 74,3 | 746,4 | 15,2 | 16,3 | 15,8 |
| 6 | 78,8 | 572,0 | 19,1 | 16,9 | 18,0 |
| 7 | 105,0 | 738,2 | 15,9 | 15,8 | 15,8 |
| 8 | 146,8 | 757,8 | 15,8 | 15,4 | 15,6 |
| 9 | 262,1 | 810,5 | 15,4 | 14,8 | 15,1 |
| 10 | 358,0 | 540,4 | 18,7 | 18,3 | 18,5 |
| 11 | 486,2 | 684,5 | 15,9 | 17,1 | 16,5 |
| 12 | 665,6 | 649,4 | 16,5 | 17,3 | 16,9 |
| 13 | 955,6 | 641,2 | 16,6 | 17,4 | 17,0 |
| 14 | 1278,4 | 565,4 | 17,7 | 18,5 | 18,1 |
| 15 | 1386,8 | 314,3 | 24,5 | 24,1 | 24,3 |
| 16 | 1628,6 | 309,0 | 24,5 | 24,5 | 24,5 |
| 17 | 2005,0 | 237,9 | 28,2 | 27,6 | 27,9 |

| Vzorek č. 8 | | | | | |
|--------------|-----------------------|--------|----------------------|----------------------|---------------------|
| číslo měření | Dist[μm] | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
| 1 | 20,2 | 725,4 | 16,7 | 15,2 | 16,0 |
| 2 | 68,8 | 605,5 | 17,9 | 17,1 | 17,5 |
| 3 | 108,0 | 682,5 | 16,0 | 16,9 | 16,5 |
| 4 | 178,6 | 692,6 | 16,7 | 16,1 | 16,4 |
| 5 | 285,8 | 738,6 | 15,6 | 16,1 | 15,8 |
| 6 | 568,8 | 692,0 | 17,7 | 15,0 | 16,4 |
| 7 | 641,1 | 700,4 | 16,3 | 16,3 | 16,3 |
| 8 | 691,2 | 522,2 | 17,7 | 18,9 | 19,9 |
| 9 | 711,8 | 489,4 | 19,3 | 19,6 | 19,5 |
| 10 | 740,3 | 469,7 | 20,8 | 18,9 | 19,9 |
| 11 | 847,6 | 610,8 | 17,7 | 17,1 | 17,4 |
| 12 | 874,4 | 576,8 | 18,3 | 17,5 | 17,9 |
| 13 | 905,5 | 549,5 | 18,6 | 18,1 | 18,4 |
| 14 | 1051,3 | 432,4 | 20,2 | 21,2 | 20,7 |
| 15 | 1263,1 | 397,3 | 21,2 | 22,0 | 21,6 |
| 16 | 1392,7 | 281,20 | 25,6 | 25,8 | 25,7 |
| 17 | 1575,2 | 249,40 | 28,0 | 26,6 | 27,3 |
| 18 | 2002,3 | 232,5 | 27,9 | 28,5 | 28,2 |

| Vzorek č. 8 - slabší vrstva | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|--------|----------------------|----------------------|---------------------|
| číslo měření | Dist[μm] | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
| 1 | 25,4 | 339,9 | 23,0 | 23,7 | 23,4 |
| 2 | 67,1 | 385,7 | 21,6 | 22,2 | 21,9 |
| 3 | 145,9 | 375,2 | 22,6 | 21,8 | 22,2 |
| 4 | 300,9 | 382,5 | 21,6 | 22,4 | 22,0 |
| 5 | 535,9 | 408,2 | 20,8 | 21,8 | 21,3 |
| 6 | 690,0 | 364,4 | 23,1 | 22,1 | 22,6 |
| 7 | 911,3 | 433,5 | 20,6 | 20,8 | 20,7 |
| 8 | 1028,4 | 298,8 | 24,3 | 25,5 | 24,9 |
| 9 | 1185,5 | 257,0 | 29,0 | 24,7 | 26,9 |
| 10 | 1394,2 | 291,2 | 25,7 | 24,7 | 25,2 |
| 11 | 1675,1 | 241,6 | 27,3 | 28,1 | 27,7 |
| 12 | 1906,4 | 253,2 | 28,6 | 25,5 | 27,1 |

| Vzorek č. 9 | | | | | |
|--------------|-----------------------|--------|----------------------|----------------------|---------------------|
| číslo měření | Dist[μm] | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
| 1 | 11,4 | 856,0 | 15,2 | 14,2 | 14,7 |
| 2 | 33,4 | 701,5 | 16,3 | 16,3 | 16,3 |
| 3 | 61,4 | 495,0 | 19,6 | 19,1 | 19,4 |
| 4 | 101,0 | 710,0 | 16,7 | 15,6 | 16,2 |
| 5 | 177,4 | 766,6 | 15,8 | 15,3 | 15,6 |
| 6 | 230,4 | 879,0 | 14,6 | 14,4 | 14,5 |
| 7 | 279,6 | 738,1 | 15,6 | 16,1 | 15,9 |
| 8 | 358,6 | 710,5 | 15,8 | 16,5 | 16,2 |
| 9 | 453,6 | 571,9 | 17,3 | 18,7 | 18,0 |
| 10 | 598,8 | 777,8 | 15,4 | 15,4 | 15,4 |
| 11 | 610,2 | 626,7 | 18,1 | 16,3 | 17,2 |
| 12 | 674,0 | 759,1 | 14,8 | 16,5 | 15,6 |
| 13 | 775,4 | 552,9 | 19,1 | 17,5 | 18,3 |
| 14 | 907,5 | 673,9 | 15,5 | 17,7 | 16,6 |
| 15 | 1158,6 | 628,1 | 17,3 | 17,1 | 17,2 |
| 16 | 1251,6 | 714,1 | 15,7 | 16,5 | 16,1 |
| 17 | 1355,4 | 628,0 | 17,1 | 17,3 | 17,2 |
| 18 | 1435,6 | 506,1 | 18,3 | 20,0 | 19,1 |
| 19 | 1484,8 | 385,7 | 21,6 | 22,2 | 21,9 |
| 20 | 1579,8 | 277,6 | 26,7 | 24,9 | 25,8 |
| 21 | 2052,2 | 316,6 | 24,1 | 24,3 | 24,2 |

| Vzorek č. 10 | | | | | |
|--------------|-----------------------|--------|----------------------|----------------------|---------------------|
| číslo měření | Dist[μm] | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
| 1 | 21,0 | 788,2 | 15,2 | 15,4 | 15,3 |
| 2 | 50,8 | 517,0 | 19,6 | 18,3 | 18,9 |
| 3 | 95,8 | 691,7 | 17,1 | 15,6 | 16,4 |
| 4 | 156,6 | 666,7 | 17,5 | 15,9 | 16,7 |
| 5 | 251,6 | 799,7 | 15,2 | 15,2 | 15,2 |
| 6 | 348,6 | 701,8 | 16,9 | 15,6 | 16,3 |
| 7 | 418,4 | 658,9 | 17,3 | 16,3 | 16,8 |
| 8 | 558,9 | 777,6 | 15,4 | 15,5 | 15,4 |
| 9 | 659,9 | 683,7 | 15,4 | 17,5 | 16,5 |
| 10 | 790,6 | 810,2 | 15,0 | 15,2 | 15,1 |
| 11 | 935,4 | 640,1 | 16,7 | 17,3 | 17,0 |
| 12 | 1007,2 | 788,9 | 15,8 | 14,8 | 15,3 |
| 13 | 1140,2 | 591,9 | 17,5 | 17,9 | 17,7 |
| 14 | 1241,0 | 585,2 | 17,1 | 18,5 | 17,8 |
| 15 | 1344,4 | 361,5 | 22,4 | 22,9 | 22,6 |
| 16 | 1437,7 | 441,4 | 20,0 | 21,0 | 20,5 |
| 17 | 1575,8 | 358,6 | 21,0 | 24,5 | 22,7 |
| 18 | 1734,8 | 255,0 | 27,6 | 26,4 | 27,0 |
| 19 | 2110,4 | 279,8 | 25,6 | 25,9 | 25,7 |

| Vzorek č. 11 | | | | | |
|--------------|-----------------------|--------|----------------------|----------------------|---------------------|
| číslo měření | Dist[μm] | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
| 1 | 19,4 | 728,6 | 16,1 | 15,8 | 16,0 |
| 2 | 44,7 | 719,4 | 15,6 | 16,5 | 16,1 |
| 3 | 125,2 | 798,6 | 15,2 | 15,2 | 15,2 |
| 4 | 196,4 | 810,1 | 15,2 | 15,0 | 15,1 |
| 5 | 282,9 | 777,3 | 15,6 | 15,2 | 15,4 |
| 6 | 362,6 | 642,7 | 16,9 | 17,1 | 17,0 |
| 7 | 435,1 | 619,3 | 17,5 | 17,1 | 17,3 |
| 8 | 603,8 | 523,0 | 18,5 | 19,1 | 18,8 |
| 9 | 731,9 | 522,9 | 19,1 | 18,5 | 18,8 |
| 10 | 825,8 | 505,4 | 18,7 | 19,6 | 19,2 |
| 11 | 1019,5 | 465,1 | 19,8 | 20,2 | 20,0 |
| 12 | 1110,4 | 267,3 | 26,7 | 25,9 | 26,3 |
| 13 | 1381,8 | 235,0 | 28,4 | 27,8 | 28,1 |
| 14 | 1674,3 | 272,6 | 26,4 | 25,8 | 26,1 |
| 15 | 1845,9 | 240,7 | 27,6 | 28,0 | 27,8 |
| 16 | 2144,7 | 233,3 | 28,0 | 28,4 | 28,2 |

| Vzorek č. 12 | | | | | |
|--------------|----------|--------|---------|---------|--------|
| číslo měření | Dist[μm] | HV 0,1 | d1 [μm] | d2 [μm] | d [μm] |
| 1 | 14,5 | 765,7 | 16,3 | 14,8 | 15,6 |
| 2 | 19,4 | 728,6 | 16,1 | 15,8 | 16,0 |
| 3 | 44,7 | 719,4 | 15,6 | 16,5 | 16,1 |
| 4 | 64,3 | 788,0 | 15,0 | 15,7 | 15,3 |
| 5 | 83,1 | 788,6 | 15,2 | 15,4 | 15,3 |
| 6 | 125,2 | 798,6 | 15,2 | 15,2 | 15,2 |
| 7 | 151,6 | 808,2 | 15,0 | 15,3 | 15,1 |
| 8 | 196,4 | 810,1 | 15,2 | 15,0 | 15,1 |
| 9 | 226,9 | 746,6 | 15,7 | 15,8 | 15,8 |
| 10 | 282,9 | 777,3 | 15,6 | 15,2 | 15,4 |
| 11 | 318,7 | 658,2 | 16,9 | 16,7 | 16,8 |
| 12 | 362,6 | 642,7 | 16,9 | 17,1 | 17,0 |
| 13 | 435,1 | 619,3 | 17,5 | 17,1 | 17,3 |
| 14 | 497,4 | 628,0 | 17,3 | 17,1 | 17,2 |
| 15 | 603,8 | 523,0 | 18,5 | 19,1 | 18,8 |
| 16 | 731,9 | 522,9 | 19,1 | 18,5 | 18,8 |
| 17 | 825,8 | 505,4 | 18,7 | 19,6 | 19,2 |
| 18 | 923,4 | 584,7 | 17,3 | 18,3 | 17,8 |
| 19 | 955,0 | 700,4 | 16,5 | 16,1 | 16,3 |
| 20 | 967,2 | 701,3 | 16,7 | 15,9 | 16,3 |
| 21 | 1019,5 | 465,1 | 19,8 | 20,2 | 20,0 |
| 22 | 1026,1 | 412,8 | 22,2 | 20,2 | 21,2 |
| 23 | 1110,4 | 267,3 | 26,7 | 25,9 | 26,3 |
| 24 | 1381,8 | 235,0 | 28,4 | 27,8 | 28,1 |
| 25 | 1573,4 | 245,6 | 27,8 | 27,2 | 27,5 |
| 26 | 1731,1 | 257,2 | 27,4 | 26,4 | 26,9 |
| 27 | 1926,4 | 221,9 | 28,3 | 29,5 | 28,9 |
| 28 | 2144,7 | 233,3 | 28,0 | 28,4 | 28,2 |