

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Analýza laserem kalené oceli 12050

Autor: **Michal NOREK**

Vedoucí práce: **Ing. Šárka HOUDKOVÁ - ŠIMŮNKOVÁ, Ph.D.**

Akademický rok 2014/2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal NOREK**
Osobní číslo: **S14B0360P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**
Název tématu: **Analýza vlastností laserem kalené oceli 12050**
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod - motivace
2. Současný stav poznání - literární rešerše z oblasti metod povrchového kalení a jejich vzájemného porovnání, využití energie laseru pro povrchové zpracování
3. Experimentální zhodnocení vlivu technologie a parametrů laserového kalení na mikrostrukturu a tvrdost oceli 12050 v oblasti ostré hrany
4. Diskuze výsledků - posouzení vlivu použité technologie povrchového laserového kalení na sledované vlastnosti a porovnání dosažených výsledků
5. Závěr

Rozsah grafických prací: fotodokumentace, obrázky

Rozsah pracovní zprávy: 30-40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- Ion, J. C., et all: Laser processing of engineering materiále. Elsevier Butterworth - Heinemann, Oxford, UK, 2005, p. 221-250
- Kennedy, E., Byrne, G., Collins, D. N.: A review of the use of high power diode lasers in surface hardening. Journal of Material Processing Technology, 2004, Vol. 155-156, p. 1855-1860
- Orazi, L., Fortunato, A., Cuccolini, G., Tani, G.: An efficient model for laser surface hardening of hypo-eutectoid steels. Applied Surface Science, 2010, Vol 256, Issue 6, p. 1913-1919
- Martínez, S., Lamikiz, A., TabernerO, I., Ukar, E.: Laser Hardening Process with 2D Scanning Optics. Physics Procedia, 2012, Vol. 39, p. 309-317
- Kim, J. D., Lee, M. H., Lee, S. J., Kang, W. J.: Laser transformation hardening on rod-shaped carbon steel by Gaussian beam. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, Vol. 19, Issue 4, p. 941-945
- Hruška, M., Vostřák, M., Smazalová, E., Švantner, M.: Standard and scanning laser hardening procedure. Proceeding of conference METAL 2013, 15.-17.5. 2013, Brno, Czech Republic, 2013

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Šárka Houdková - Šimůnková, Ph.D.


Nové technologie - výzkumné centrum

Konzultant bakalářské práce: Ing. Matěj Hruška


Nové technologie - výzkumné centrum

Datum zadání bakalářské práce: 22. září 2014

Termín odevzdání bakalářské práce: 26. června 2015


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




Prof. Ing. Václav Mentl, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 22. září 2014

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Norek	Jméno Michal	
STUDIJNÍ OBOR	2301R016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Houdková - Šimůnková, Ph.D.	Jméno Šárka	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Analýza laserem kalené oceli 12050		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2015
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	59	TEXTOVÁ ČÁST	59	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Cílem bakalářské práce je porovnání dvou postupů povrchového kalení laserem. Materiál 12050 byl zakalen pomocí standardního kalení a skenovacího kalení. Vyhodnocení bylo provedeno pomocí určení hloubky prokalení, mikrostruktury, geometrie a údajů z termokamery.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Povrchové kalení laserem, standardní laserové kalení, skenovací laserové kalení, hloubka prokalení, termokamera, měření tvrdosti, hodnocení mikrostruktury.</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Norek	Name Michal	
FIELD OF STUDY	2301R016 „Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Houdková - Šimůnková, Ph.D.	Name Šárka	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Analysis of laser hardened steel C45		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2015
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	59	TEXT PART	59	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The aim of this bachelor thesis is to compare two methods of laser surface hardening. The material C45 was hardened with a standard and scanning method. The evaluation was performed by determining the depth of hardening, the microstructure, the geometry and the data from the thermovision.
KEY WORDS	Laser surface hardening, standart laser hardening method, scanning laser hardening method, depth of hardening, thermovision, measurement of hardness, evaluation of microstructure.

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	10
Poděkování.....	10
1. Úvod – motivace.....	11
2. Kalení.....	12
2.1 Způsoby kalení.....	13
2.2 Povrchové kalení	13
2.2.1 Indukční kalení.....	13
2.2.2 Kalení plamenem.....	14
2.2.3 Obloukové kalení.....	14
2.2.4 Kalení elektronovým paprskem.....	15
2.2.5 Laserové povrchové kalení	15
3. Laserové povrchové kalení	15
4. Lasery používané pro laserové kalení.....	16
4.1 Lasery obecně.....	16
4.1.1 Historie laserů	17
4.1.2 Princip laseru	17
4.2 Používané lasery pro laserové kalení	18
4.2.1 Plynové CO ₂ lasery.....	19
4.2.2 Výkonové polovodičové (diodové) lasery	20
4.2.3 Pevnolátkové Nd:YAG lasery	20
5. Zkoušky tvrdosti	21
5.1.1 Zkouška tvrdosti dle Brinella	22
5.1.2 Zkouška tvrdosti dle Vickerse	23
5.1.3 Zkouška tvrdosti dle Rockwella	23
6. Úvod do experimentální části.....	24
7. Technologická zařízení.....	25
7.1 Použité lasery	25
7.1.1 Výkonný kontinuální laser HighLight ISL4000L.....	25
7.1.2 Trumpf TruDisk 8002 – Blackbird	26
7.2 Laboratorní zařízení.....	27
7.2.1 Kotoučová rozbrušovací pila Struers Labotom-3	27
7.2.2 Zalisovací zařízení Struers Prontopress 20	28

7.2.3 Laboratorní automatická leštička Struers Labopol-5	29
7.2.4 Digitální mikroskop Hirox KH-7700	29
7.2.5 Optický mikroskop Nikon Epiphot 200	30
7.2.6 Tvrdoměr Buehler	31
7.2.7 Infrakamera VarioCAM HD InfraTec (Jenoptic)	31
7.3 Volba materiálu	32
8. Návrh experimentu	33
9. Postup provedení experimentu.....	34
10. Výsledky.....	37
10.1. Vyhodnocení z geometrického hlediska.....	37
10.2. Určení hloubky prokalení pomocí měření tvrdosti	40
10.2.1 Metoda HPDD 1.....	40
10.2.2 Metoda HPDD2.....	42
10.2.3 Metoda SCAN 1	44
10.2.4 Metoda SCAN 2	46
10.3. Porovnání mikrostruktur	48
10.3.1 Mikrostruktura základního materiálu	48
10.3.2 Mikrostruktura metody HPDD 1.....	48
10.3.3 Mikrostruktura metody HPDD 2.....	50
10.3.4 Mikrostruktura metody SCAN 1	51
10.3.4 Mikrostruktura metody SCAN 2	53
10.4. Teplotní průběh.....	54
11. Diskuze výsledků.....	54
12. Závěr.....	57
13. Seznam použité literatury	58

Přehled použitých zkratk a symbolů

- LASER - Light Amplication by Stimulated Emision of Radiation - zesilování světla stimulovanou emisí záření
- Nd:YAG - Neodymium-doped: Yttrium Aluminium Garnet (Yttrito-hlinitý granát)
- Ac₁ - Křivka v diagramu Fe₃C kde dochází k překrystalizaci
- Ac₂ - Křivka v diagramu Fe₃C kde dochází k překrystalizaci
- HPDD - High power diode laser - vysoko výkonový diodový laser
- HPDD 1 - Pracovní název standardního laserového kalení (zakalení obou stran břitu)
- HPDD 2 - Pracovní název standardního laserového kalení (zakalení pouze jedné strany břitu)
- SCAN 1 - Pracovní název skenovacího laserového kalení (kalení obou stran najednou břitu)
- SCAN 2 - Pracovní název skenovacího laserového kalení (kalení obou stran postupně)
- 2D - Dvou rozměrné zobrazení
- 3D - Tří rozměrné zobrazení (prostorové)
- HD - High-definition - vysoké rozlišení (720i, 720p, 1080i, 1080p)
- CCD - Charge-Coupled Device - zařízení s vázanými náboji je elektronická součástka používaná ve videokamerách
- HB - Brinell hardness - tvrdost dle Brinella
- HRA - Rockwell hardness - tvrdost dle Rockwella, indentor kužel
- HRC - Rockwell hardness - tvrdost dle Rockwella, indentor kužel
- HRB - Rockwell hardness - tvrdost dle Rockwella, indentor kulička
- HRN - Rockwell hardness - tvrdost dle Rockwella, indentor kužel
- HRT - Rockwell hardness - tvrdost dle Rockwella, indentor kulička
- HV 0,3 - Vickers hardness - tvrdost dle Vickerse, zatěžující síla 3N
- HV 1 - Vickers hardness - tvrdost dle Vickerse, zatěžující síla 10N
- HV 5 - Vickers hardness - tvrdost dle Vickerse, zatěžující síla 50N
- GDOES - Chemická analýza - interakce iontů s povrchem a následná optická analýza
- MD - MagneticDisk - Lešticí plátno uchycené magneticky na leštičku

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kteří se podíleli a byli mi nápomocni při realizaci této bakalářské práce. Především bych chtěl poděkovat Ing. Šárce Houdkové - Šimůnkové Ph.D., vedoucí mé bakalářské práce, která mi byla po celou dobu nápomocna a v případě potřeby mi poskytovala konzultace. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Matějovi Hruškovi za realizaci experimentu a poskytování potřebných rad. Ing. Evě Smazalové a Ing. Jarce Savkové za zaškolení s přístroji a poskytnuté rady potřebné pro realizaci bakalářské práce. Ing. Jiřímu Hájkovi za odborné rady ohledně mikrostruktur a Ing. Milanu Vnoučkovi za poskytnuté GDOES pro přesné určení základního materiálu.

1. Úvod – motivace

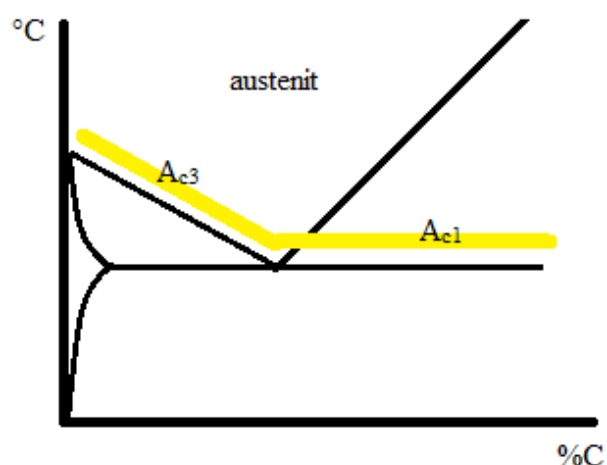
Lasery (LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Ve volném překladu zesilování světla stimulovanou emisí záření.) se v dnešní době dostávají do popředí a to hlavně díky své univerzálnosti a automatizaci. Laser je jedním z nejdůležitějších vynálezů moderní doby. Je součástí ve zdravotnictví, v průmyslu. Lasery se využívají i ve strojírenství například v oblasti tepelného zpracování. V oblasti tepelného zpracování jsou využívány vysokovýkonné lasery například plynové CO₂ lasery, pevnolátkové Nd:YAG lasery a vysokovýkonné diodové lasery. Laserové povrchové kalení, kterým se hlavně zabývá tato bakalářská práce má mnoho výhod oproti jiným metodám povrchového kalení. Hlavními výhodami laserového povrchového kalení jsou možnost kalit geometricky složité součásti a těžko přístupná místa. Součást laserově zakalená má větší životnost a je odolnější vůči opotřebení.

Tato bakalářská práce se zabývá porovnáním dvou metod kalení. Jsou kaleny vzorky z materiálu 12050 v oblasti ostré hrany. První metoda pro kalení vzorku se použije standardní laserové kalení. První metoda má velikost stopy laseru rozměr 12x6mm. Širšího pokrytí docílíme pomocí defokusační optiky. Pro zakalení širší oblasti je nutné umístit tyto stopy vedle sebe. Výhodou velikosti spotu je rychlost procesu kalení, nevýhodou nutnost překryvu jednotlivých stop, což vede k částečnému popuštění v místě překryvu a tím k nehomogenitě vlastností kaleného povrchu. Druhá metoda je scanovací laserové kalení, kde dochází pomocí optických zrcadel k rychlému vychylování laserového paprsku. Výhodou je zde odstranění překryvů jednotlivých stop. Na druhou stranu však metoda není vhodná pro kalení velkých ploch.

Cílem bakalářské práce je porovnat vhodnost obou výše zmíněných přístupů laserového kalení pro kalení součásti z materiálu 12050 ve tvaru ostré hrany s ohledem na mikrostrukturu, tvrdost a hloubku prokalení. Výsledkem práce bude postup doporučený pro kalení součástí s komplikovanou geometrií, jakými jsou například obráběcí nástroje.

2.Kalení

Kalení je jedním ze způsobů tepelného zpracování, které zvýší tvrdost materiálu. Kalení je proces, při kterém se součást ohřeje na tzv. kalicí teplotu. Kalicí teplota je 30-50 °C nad křivkami A_{c1} a A_{c3} . Tyto kalicí teploty jsou vyznačeny na obrázku 1. Po nějakou dobu se součást na této teplotě nechá ohřátá a poté se součást ochladí. Vlivem kalení docílíme vyšší tvrdosti, avšak nižší houževnatosti, tím se materiál stává křehčí. Vlivem rychlého ochlazení dojde k přeměně austenitu na martenzit nebo bainit. Jako kalicí prostředí se používá například voda, olej, roztavené solné lázně a vzduch. Podle kalitelnosti a prokalitelnosti se volí vhodné kalicí prostředí. [5,6]

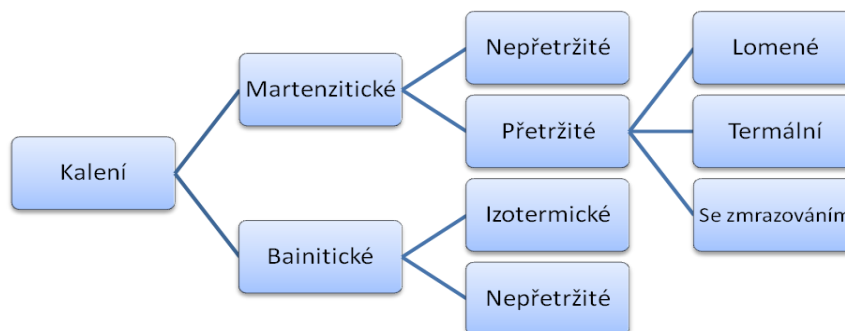


Obrázek 1 - Vyznačení kalicích teplot v Fe3C

Vyšší ochlazovací rychlost se obecně zvolí u oceli s nižším obsahem uhlíku. Oceli pod 0,2% uhlíku se berou jako nekalitelné oceli a oceli s vyšším obsahem uhlíku jak 0,35% se berou jako dobře kalitelné oceli. Voda je nejstarší kalicí prostředek. Ve vodě probíhá ochlazování plynule. Při ponoření součásti, která je ohřátá na kalicí teplotu se kolem ní vytvoří vzduchový polštář a ten nám zpomaluje rychlost ochlazování. Proto je nutné součásti ve vodě pohybovat. Při ochlazení na teplotu 400 °C se vzduchový polštář poruší a nastane intenzivnější ochlazení prudkým varem vody. Z toho důvodu má nejvyšší účinnost vodní sprcha. Olej je mnohem mírnější kalicí prostředí. Ochlazování probíhá podobně jako u vody. Jen s tím rozdílem, že vzduchový polštář se dříve poruší. Rychlost ochlazování je řádově 10krát nižší než je tomu u vody. Ke kalení se používají minerální oleje. Proto jsou kalicí lázně ohřáté na 50 °C. Roztavené solné lázně mají plynulé ochlazování. V prvním stadiu je rychlost ochlazování vyšší a pak bude postupně klesat s klesajícím teplotním rozdílem mezi kalenou součástí a solnou lázní. Na vzduchu se kalí hluboko prokalitelné oceli například rychlořezné oceli.[6]

2.1 Způsoby kalení

Na obrázku 2 jsou zobrazeny jednotlivé způsoby kalení. Do základního rozdělení patří martenzitické a bainitické kalení. U martenzitického kalení se získá struktura martenzit. Materiál je pak křehčí a není houževnatý, proto se materiál musí popouštět. U bainitického kalení se získá struktura bainit. Materiál je houževnatý a není třeba ho popouštět. Popouštění je tepelné zpracování oceli, kde se vhodným ohřevem ovlivní vlastnosti. Zejména slouží ke snížení vnitřního pnutí. Ohřev se volí pod křivkou A_{c1} kde nedochází k žádné fázové přeměně. [7]



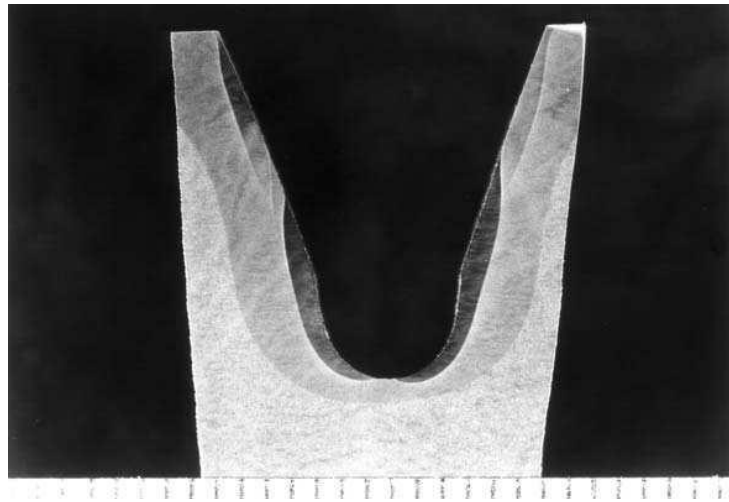
Obrázek 2 - Schéma způsobů kalení [6]

2.2 Povrchové kalení

Při povrchovém kalení dochází k velmi rychlému zahřátí povrchu součásti na kalící teplotu a následnému rychlému ochlazení. Na ochlazení se používá nejčastěji vodní sprcha. Mezi hlavní výhody tohoto způsobu kalení patří, že dochází k zakalení pouze povrchové vrstvy a jádro součásti zůstane houževnaté. Rozdíl struktury mezi povrchem a jádrem způsobuje vnitřní pnutí to lze vyřešit následným popouštěním součásti. Energie potřebná pro ohřátí na kalící teplotu může být získána z mnoha zdrojů. Při srovnání těchto zdrojů je třeba brát v úvahu: náklady na zdroje energie, náklady použitých komponentů, požadované přesnosti, prostor, cena dokončovacích operací po kalení a náklady na životní prostředí. Nové laserové kalící techniky, které mají být použity, poskytují technické i ekonomické výhody.[1,6]

2.2.1 Indukční kalení

Indukční kalení je založeno na generování magnetického pole od střídavého proudu. Kovová součást je umístěna uvnitř cívky. Na povrchu součásti se indukují vířivé proudy, které vytvářejí teplo. Hloubka ohřevu závisí na síle magnetického pole, magnetických vlastnostech materiálu a vzdálenosti součásti od cívky. Chlazení se může provádět na vzduchu nebo v oleji případně ve vodě když je požadované prokalení do větších hloubek. Kalené oblasti větší jak 5mm mohou být vyráběny bez povrchového natavení, s relativně vysokou rychlostí pokrytí. Na obrázku 3 je znázorněno kalení dvěma různými metodami. Tmavší oblasti byly vyrobeny pomocí laserového kalení a světlejší oblasti byly vyrobeny pomocí Indukčního kalení. Indukční kalení lze snadno začlenit do výrobního procesu, má relativně nízké náklady a je obzvláště vhodné pro rotační součásti, jako jsou ozubená kola a hřídele. Zejména je indukční kalení vhodné při vysokém počtu stejných dílů. Požadovanou tvrdost a geometrii kalené oblasti lze automatizovat. [1]



Obrázek 3 - Porovnání laserového a indukčního kalení [1]

Laserové kalení je konkurenceschopné v porovnání s jinými metodami, zejména u součástí, které mají velmi složitou geometrii. Jelikož je možné snadno měnit tvar laserového paprsku a přemísťovat ho. Z toho důvodu jsou snadno kalitelné těžko přístupné oblasti. Při laserovém kalení jsou velmi nízké deformace součásti. Na rozdíl od ostatních metod u laserového kalení tyto deformace můžeme snadněji ovlivnit. Vývoj laserového kalení dnes pokročil tak, že je možno docílit vyšší tvrdosti oproti indukčnímu kalení, což dříve byla jeho velká přednost. Avšak stále indukční kalení má vyšší hloubku prokalení.[1]

2.2.2 Kalení plamenem

Kalení plamenem je velmi rozšířené. A to zejména díky jeho snadné mobilitě a nízkým investičním nákladům. K austenitizaci povrchu součásti je použit plamen ze svařovacího hořáku. Nejčastěji se používá kyslíko-acetylenový plamen. Potom se součást rychle ochladí ve vodě nebo v oleji. Tento postup může být proveden ručně, poloautomaticky nebo plně automatizovaným způsobem. Kromě tříd ocelí kde je doporučeno induktivní kalení může být použito i kalení plamenem pro částečné zpevnění slitinových a nástrojových ocelí. Ozubená kola, vodící části soustruhů, desky, kované nástroje, formy a vačkové hřídele tradičně bývají kaleny pomocí této metody. Vstupní energie je relativně vysoká, což může vést k potřebě externího rychlého ochlazení, což vede často k významným deformacím u velkých ohříváných objemů. Může být také obtížné kontrolovat geometrii kalené oblasti z důvodu nepřesnosti aplikace energie, které může vést k nežádoucímu natavení povrchu. Stejně jako u indukčního kalení, rozsah ocelí, které mohou být kaleny plamenem je omezen. Laserové kalení je významně více energeticky účinnější než kalení plamenem. I z hlediska deformací nemá laserové kalení konkurenta.[1]

2.2.3 Obloukové kalení

Svařovací oblouk nebo plazmový oblouk může být použit jako zdroj energie pro povrchové kalení. Opět platí, že investiční náklady jsou velmi nízké, technologie je velmi jednoduchá a přizpůsobivá. Povrchy mohou být kaleny do hloubky bez povrchového natavení z důvodu relativně nízké hustoty výkonu zdroje energie. S ohledem na říditelnost procesu výběru materiálu a požadavků dokončovacích prací po kalení. Výhody laserového kalení jsou podobné požadavkům na kalení plamenem. Z důvodu řízení oblouku u obloukového kalení jsou vyšší náklady než u kalení plamenem. A podobně vyšší cena laseru je kompenzována nárůstem přesnosti metody a produktivity práce, která může zvítězit jak nad obloukovým tak i nad plamenovým kalením. [1]

2.2.4 Kalení elektronovým paprskem

Pomocí rozostření nebo skenování elektronovým paprskem může být vytvořen ohřívací zdroj s podobnými vlastnostmi jako laserový paprsek. Dosahuje se velmi podobných vlastností jako u laserového kalení. Elektronovým paprskem se jednoduše manipuluje. Protože proces probíhá ve vakuu, oxidace během procesu je eliminována. Kalení elektronovým paprskem opakovaně umožňuje stejnou hloubku prokalení. Nicméně velikost vakuové komory limituje velikost kalené součásti, které mohou být kaleny. Nevýhodou tohoto kalení je produkce škodlivého rentgenového záření. Pro velké součásti je vhodnější volba laserové kalení, protože jak bylo uvedeno u kalení elektronovým paprskem je limitující velikost komory. [1]

2.2.5 Laserové povrchové kalení

Toto téma je obsaženo ve 3. kapitole.

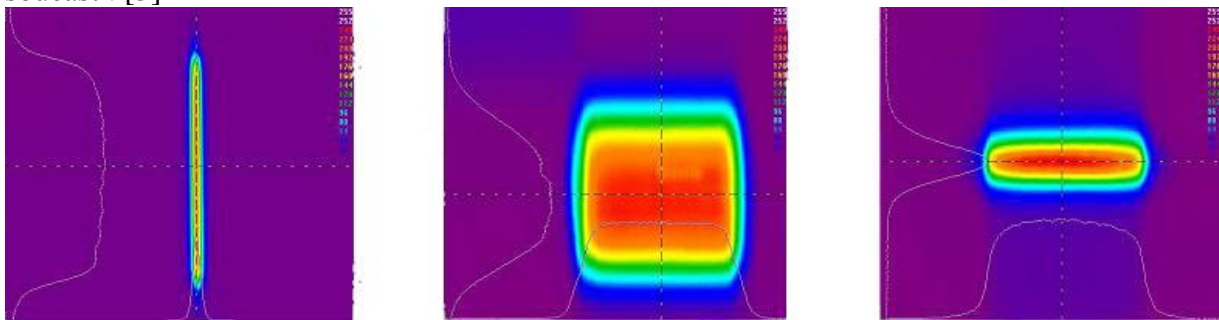
3. Laserové povrchové kalení

Povrchové kalení laserem dnes patří mezi moderní způsoby tepelného zpracování, jehož výsledkem je zvýšení tvrdosti povrchu a tím i zvýšení životnosti kalené součásti. Princip spočívá v rychlém ohřátí povrchové vrstvy kaleného materiálu laserovým paprskem. Materiál se ohřeje na teplotu, která se přibližuje bodu tání 900 - 1400°C. Při takové teplotě dochází k austenitizaci. Po ohřívání kaleného místa se materiál velmi rychle ochladí, protože se teplo odvede do okolního materiálu, jedná se o tzv. samokalení. U samokalení není potřeba ochlazovat povrch ochlazovací látkou jako je například voda, olej. Z důvodu vysoké rychlosti ohřevu a následné rychlosti ochlazení vzniknou v materiálu velmi jemné struktury. Výhodou povrchového kalení je, že se zakalí pouze vrchní vrstva a jádro zůstane houževnaté. Nedochází k tvorbě trhlin a je velice málo ovlivněné okolí kaleného místa teplem, tudíž deformace součásti jsou velice malé. U běžného kalení vlivem prudkého ochlazení kapalinou například vodou vznikne vysoký teplotní gradient, který způsobuje vysoké pnutí. V důsledku tohoto pnutí dochází k tvorbě trhlin. [3]

Uhlík hraje vysokou roli u kalení obecně. Mezi uhlíkem a tvrdostí platí lineární závislost, tudíž lze říci, že čím je v oceli více uhlíku, tím bude vyšší výsledná tvrdost. Toto tvrzení platí ovšem jen do 0,4% uhlíku, pak nárůst tvrdosti již není tak intenzivní. Vhodné materiály pro laserové kalení jsou podobně jako je tomu u klasických metod oceli s obsahem uhlíku vyšším než 0,2%. Nejčastěji jsou použity pro kalení oceli s obsahem uhlíku 0,4 - 0,5%. Dalšími prvky, které mohou podpořit vliv uhlíku, jsou například Mangan, Chrom a Molybden.[3]

Rychlý ohřev může mít však příznivé i nepříznivé důsledky. Vlivem rychlého ohřevu u laserového kalení dochází k posunu transformačních teplot k vyšším hodnotám, a proto neplatí pro laserové kalení běžné diagramy tepelného zpracování oceli. Proto jsou vhodné kalicí teploty pro různé oceli veřejnosti neznámé a každý výrobce si tyto údaje střeží. Při rychlém ohřevu se struktura nedostatečně homogenizuje, což má za důsledek rozkolísané hodnoty tvrdosti. U masivních odlitků, forem či nějakých strojních součástí toto může způsobit problém. Vysoká rychlost ochlazování je dobrá u vysokouhlíkových a vysoce legovaných ocelí hlavně pro dosažení jemnozrné struktury. Jemnozrný martenzit vznikne z jemných austenitických zrn. Jemnozrný martenzit zapříčiňuje nižší náchylnost k šíření trhlin na součásti. Vliv na prokalitelnost má také výchozí struktura. Pokud je struktura hrubozrná, tak větší karbidy, které se nacházejí v této struktuře, budou potřebovat delší dobu pro rozpustění. Pokud se tyto karbidy nerozpustí tak matrice nebude mít dostatek uhlíku. Potom budeme vlastně kalit nízkouhlíkové matrice. To se děje například u nástrojových ocelí kde je

potřeba volit jiné kalící parametry, než je tomu u konstrukčních ocelí s jemně precipitujícími karbidy. Při kalení by se měl rozlišovat materiál litý, který má hrubozrnnou strukturu a materiál tvářený, který má jemnozrnnou strukturu. Dále se také zohledňuje tepelné zpracování součástí. [3]



Obrázek 4 - Profil laserového paprsku pro kalení [3]

Pomocí pyrometru je průběžně monitorován a řízen proces kalení. Pyrometr dokáže měnit výkon paprsku tak, že je zachována u kaleného materiálu konstantní teplota. Pohyb paprsku je zajištěn automaticky pomocí robotické ruky. To nám umožňuje kalit i geometricky náročné součásti jako jsou například formy. S laserovým kalením se lze nejčastěji setkat v různých nástrojárnách, v automobilovém průmyslu a celkově ve strojním průmyslu. Je vhodný ho použít jak pro malosériovou (kusovou) výrobu tak i pro velkosériovou výrobu. Laserové kalení se hojně také využívá u součástí, které jsou značně namáhané. Mezi ně patří například: ozubená kola, náběžné hrany turbinových lopatek, hřídele, vodící lišty, formy a mnoho dalších strojních součástí. Laserem kalené součásti mají delší životnost a delší výdrž vůči opotřebení oproti klasicky kaleným součástem. [3]

Laserové kalení má výhodu, že lze zakalit pouze ta místa, kde se potřebuje vyšší odolnost. Protože je kalení povrchové a kalená oblast velmi málo ovlivňuje okolí tak ve zbylé části výrobku jsou zachovány původní vlastnosti materiálu. Jelikož není nutné u laserového kalení používat kalící lázně a jiná kalící media při kalení v peci tak je kalení laserem velice čisté a ekologické. Protože je málo tepelně ovlivněné okolí kalené oblasti, nedochází k tak výrazným deformacím kalené součásti, proto náklady spojené s obráběním po kalení jsou minimalizovány nebo součást není třeba nijak obrábět. U laserového kalení vzniká na povrchu nepatrná oxidační vrstva. Tato vrstva lze velmi snadno odstranit nebo ji zcela předejít použitím ochranné atmosféry při kalení. Pro kalení se používají pevnolátkové, CO₂ lasery a dnes se vyplácí používat diodové lasery. Pro vytvoření hranatého profilu paprsku u CO₂ a pevnolátkových laserů lze využít speciální optiku. Optika určená pro hranatý profil laserového paprsku je velmi nákladná. U polovodičových (diodových) laserů odpadá problém s volbou optiky, proto se často využívají pro laserové povrchové kalení. [3]

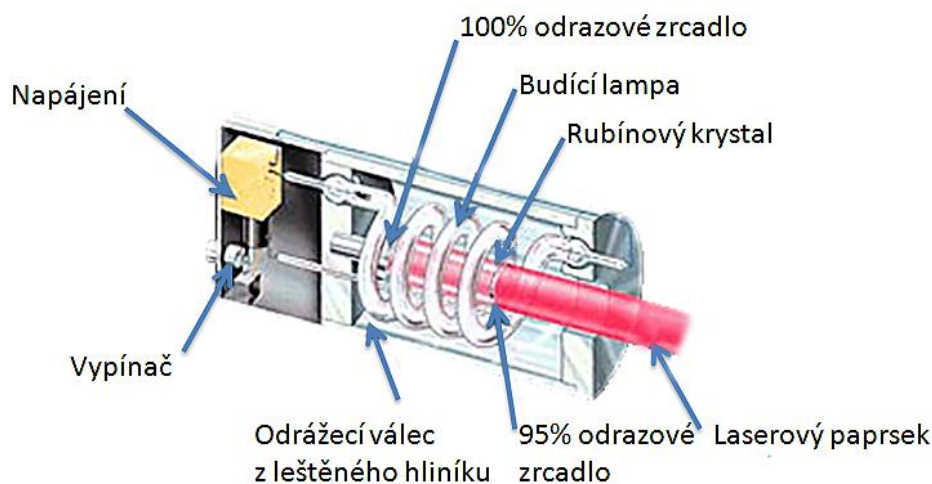
4. Lasery používané pro laserové kalení

4.1 Lasery obecně

LASER není slovo, ale anglická zkratka Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Což lze v překladu vyjádřit jako zesilování světla stimulovanou emisí záření. Laser můžeme chápat jako optický zesilovač, který generuje záření za pomoci procesu stimulované emise fotonů. Laserové záření je monochromatické což znamená, že má jednu barvu o jedné vlnové délce. Je také koherentní to znamená, že laserové záření má stejnou frekvenci vlnění, stejný směr kmitání a fázi. Laserové záření z laseru vystupuje v úzkém paprsku o malém průměru. [3]

4.1.1 Historie laserů

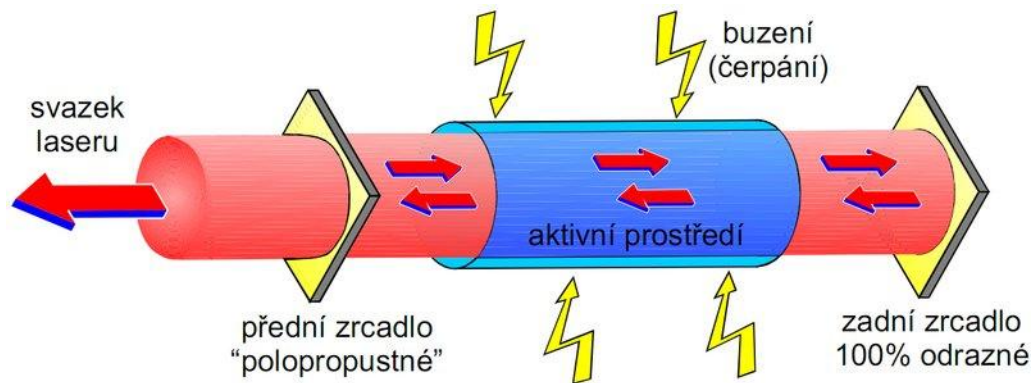
V roce 1917 padla první zmínka o laseru. Kdy Albert Einstein kromě jevu absorpce a spontánní emise také dokázal jev stimulované emise. Další kdo se podílel na vynalezení laseru je ruský fyzik V. A. Fabrikant. V roce 1939 poukázal na možnost, že lze použít stimulovanou emisi k zesílení elektromagnetického záření, které prochází prostředím. V roce 1951 V. A. Fabrikant spolu s M. M. Vudynským a F. A. Butajevovou nechali patentovat metodu zesilování elektromagnetického záření. V roce 1952 přednášeli na konferenci o radiospektroskopii ruští fyzikové A. M. Prochorov a N. G. Basov o molekulárním svazkovém generátoru, který měl název MASER. Tento molekulární svazkový generátor pracoval se svazkem molekulárního čpavku. Zanedlouho v roce 1954 sestrojili první molekulární generátor. Prochov, Schawlow a Townes v roce 1958 na sobě nezávisle vyslovili myšlenku, že v maseru použitý jev stimulované emise se může využít i v infračervené a optické oblasti spektra. Theodore Maiman v roce 1960 vynalezl vůbec první laser, tento laser byl rubínový. Schéma rubínového laseru je zobrazeno na obrázku 5. Od této doby byl velký rozmach ve vývoji různých typů laserů. V roce 1962 to je o dva roky později po vývoji rubínového laseru byly vyrobeny první CO₂ a polovodičové (diodové) lasery. V České republice se v roce 1963 objevil první laser. Když byl vynalezen laser, tak nebylo jasné, kde všude laser získá uplatnění. Avšak postupem času a postupnou inovací našel laser široké uplatnění. Laser svým způsobem ovlivnil jak techniku, tak i různé vědní obory. [3]



Obrázek 5 - Schéma prvního rubínového laseru [10]

4.1.2 Princip laseru

První důležitou částí laseru je aktivní prostředí. Aktivní prostředí tvoří atomy, ionty a molekuly plynů, polovodiče, kapaliny a pevné látky. Aby laser fungoval je nutné toto aktivní prostředí něčím budít tudíž další nedílnou součástí laseru je buzení. Možnost buzení je závislá na konkrétním aktivním prostředí. Mezi možnostmi jak může být buzení zajištěno je například optickým zářením z výbojky nebo laserové diody, také může být zajištěno například elektrickým výbojem nebo chemickou reakcí. Budící zdroje pracují v kontinuálním nebo v pulzním režimu. Buzením dodáváme energii laseru, která se následně přeměňuje pomocí stimulované emise v optickém rezonátoru na laserový paprsek. Optický rezonátor se skládá ze dvou zrcadel. Jedno zrcadlo je nepropustné a druhé zrcadlo je polopropustné. Schéma laseru je zobrazeno na obrázku 6.[3]



Obrázek 6 - Princip laseru [11]

Aktivní prostředí vždy obsahuje element, tento element se může nacházet v základním stavu s nižší energií nebo v excitovaném (vybuzeném) stavu s vyšší energií. Elementem může být nejčastěji atom, také jim může být vibrační stav molekuly, chemická vazba apod. Při přechodu z vyššího energetického stavu do nižšího energetického stavu tento atom vyzáří foton. Přechod z vyššího energetického stavu do nižšího se děje sám od sebe. Vlivem buzení dochází k převodu aktivního prostředí do excitovaného (vybuzeného) stavu. V excitovaném stavu většina atomů má vyšší energii. Tato energie se za pomoci stimulované emise vyzáří ve formě laserového paprsku. V podstatě se jedná o lavinový efekt, protože foton, který dopadá na excitovaný atom a způsobí přechod z horní na dolní energetickou hladinu. Při tomto jevu dojde k emisi dalšího fotonu. Fotony se odráží mezi zrcadly a jejich počet narůstá. Energie tohoto proudu fotonů neustále roste, až dosáhne určité hodnoty. Když dosáhne této určité hodnoty, projde polopropustným zrcadlem jako laserový paprsek.[3,12]

4.2 Používané lasery pro laserové kalení

U povrchového kalení laserem se využívají plynové CO₂ lasery, pevnolátkové Nd:YAG lasery a dnes jsou velmi rozšířené polovodičové diodové lasery. Při výběru laseru například pro povrchové kalení laserem se musí dbát několika požadavků. Teprve po splnění těchto požadavků je možno laser nasadit do provozu. Kritéria pro výběr laseru jsou například: výkon laserového paprsku, vlnová délka, divergence laserového paprsku, možnost přenosu záření optickým vláknem, mobilita, náklady, spolehlivost a bezpečnost. [4]

Rozhodujícím kritériem je výkon laseru nebo optický výkon laseru. Optický výkon se pohybuje v rozmezí mezi 1 až 30 kW středního výkonu v kontinuálním režimu.

Další rozhodující je vlnová délka. Na vlnové délce závisí velikost stopy laserového paprsku. [4]

Dalším výhodným kritériem je přenos laserového záření pomocí optického vlákna. Pomocí optického vlákna můžeme dopravit laserové záření na příslušné místo. Tímto se zvýší flexibilita a zvýší se i možnosti uplatnění. [4]

Mobilita to jsou rozměry, hmotnost a energetická náročnost. Tyto kritéria by se měli nacházet v mezích, aby laser byl mobilní snadno přenosný a snadno použitelný. [4]

Provozní náklady, čímž se rozumí nákup stroje, spotřeba energie, spotřeba chladicí kapaliny a jiných náplní, údržba a servis, se snažíme samozřejmě minimalizovat. [4]

Z hlediska ekonomie je dalším klíčovým kritériem účinnost laseru. Pro napájení laseru se využívá elektrický proud, proto je z hlediska účinnosti důležitý poměr výkon přivedeného k výkonu užitečného.[4]

V praxi je důležitá spolehlivost laserů. Při nasazení laseru do pracovního procesu musí být spolehlivost laseru co nejvyšší. Laser musí odolávat nepříznivým vlivům například prašnému prostředí, které nesmí zmenšovat jeho výkon a účinnost. [4]

Bezpečnost práce s laserem patří také mezi důležité faktory a je velice důležité, aby při práci s laserem, nedošlo například k poškození zraku. Proto je nutné obsluhu řádně proškolit a na pracovišti se musí dodržovat předpisy při práci s laserem. [4]

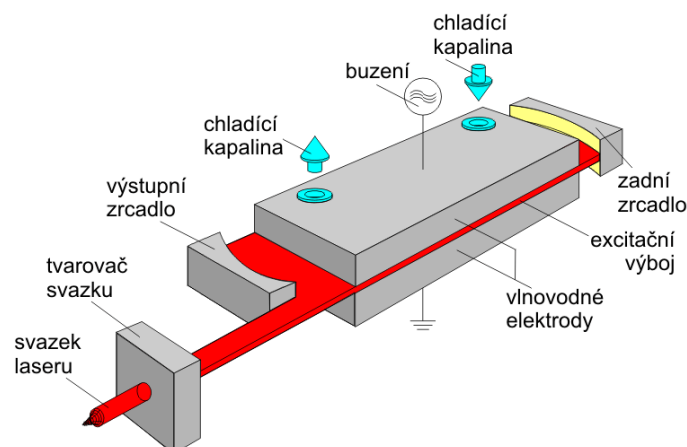
Nyní si uvedeme tyto základní typy laserů, které se využívají zejména u povrchového kalení laserem. Mezi hlavním kritériem dělení patří druh aktivního prostředí. [4]

4.2.1 Plynové CO₂ lasery

Aktivní prostředí u plynových CO₂ laserů tvoří trubice s aktivním plynem. Toto aktivní prostředí je v plynné fázi a je tvořeno z molekul oxidu uhličitého (CO₂). Tyto molekuly se budí pomocí doutnavého elektrického výboje. Když přivedeme do aktivního prostředí elektrickou energii, dochází ke konvertování této energie na laserové záření. Na jednom konci této trubice je umístěno 100% odrazové zrcadlo na druhém konci trubice je umístěno polopropustné zrcadlo. Mezi těmito zrcadly se nachází rezonátor. Mezi rezonátorem se nachází aktivní prostředí[4]

CO₂ lasery pracují buď v pulsním nebo kontinuálním režimu. „ Záření generované tímto typem laseru spadá do vzdálené infračervené oblasti - nejčastěji je generovaná vlnová délka 10600 nm[13]“. Obrovskou výhodou CO₂ laserů je nepochybně jejich výstupní výkon, který se pohybuje mezi 1 – 30 kW. Vysoké výkony v řádech několik desítek a stovek wattů se musí generovat velmi dlouhými vodou chlazenými trubicemi. V těchto trubicích proudí aktivní plyn. Vysoké výkony se mohou pak získávat ve velkoobjemových systémech. Pokud přidáme k těmto výkonovým laserům dobrou kvalitu laserového paprsku s relativně vysokou účinností 8-10% tak si i plynové lasery najdou dobré zastoupení v průmyslu. [4]

Plynové lasery mají však i své nevýhody, například vlnová délka, která má hodnotu 10600 nm neprochází optickými vlákny proto je nutné laserový paprsek dopravit na určené místo pomocí složitějšího systému zrcadel. Pro docílení vysokého výkonu laseru je nutné zvolit dlouhou trubicu, která má vysoký objem. Proto zařízení dosahuje vyšších rozměrů a není nijak mobilní ani snadno přenosné. Nevýhodou je nutnost použití chladicího media jako jsou například oxid uhličitý, dusík a helium. Zvláště použití hélia je velmi nákladné což vede ke zvýšení celkových nákladů za provoz CO₂ laseru. Ani servis tohoto laseru nepatří mezi nejlevnější. Složitější laserové zařízení musí být neustále kontrolováno a revidováno což znatelně zvyšuje také provozní náklady. I přes tyto negativa si CO₂ lasery udržují dobrou pozici v průmyslu. Schéma, které detailně znázorňuje plynový laser je na obrázku 7. [4]



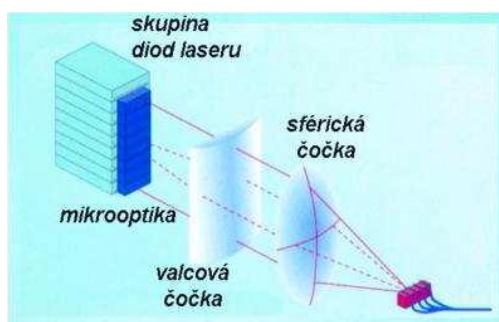
Obrázek 7 - Schéma plynového laseru [14]

4.2.2 Výkonové polovodičové (diodové) lasery

U vysoko výkonových diodových laserů je aktivní prostředí tvořeno pomocí polovodičového materiálu. Vytvořené aktivní částice elektronů tvoří funkci volného nosiče náboje a mohou být injektovány. U polovodičových laserů se výstupní výkon pohybuje v rozmezí velmi malých výkonů až po velmi vysoké výkony. Největší výhodou polovodičových laserů je především jejich vysoká účinnost. Polovodičové lasery mají takto vysokou účinnost, neboť přeměňují elektrický proud přímo na světelné záření. Polovodičové lasery mají také příznivou vlnovou délku, proto není problém toto záření přenášet v optických vláknech. [4]

Mezi hlavní přednost polovodičových laserů patří jejich nenáročnost na údržbu, malý rozměr jejich mobilita a nízká hmotnost. „možnost spektrálního přeladění v širokém spektrálním pásmu a pomocí výběru aktivního prostředí generace záření různých vlnových délek. Prvním druhem, který se velmi často využívá je polovodičový laser buzený svazkem elektronů. Druhým druhem je injekční polovodičový laser, kde se buzení provádí elektrickým polem.[14]

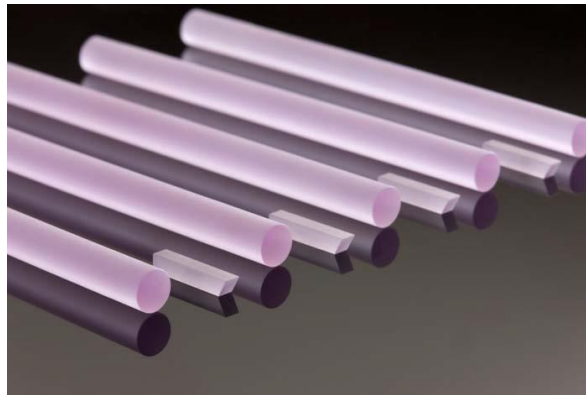
Mezi nevýhody polovodičových laseru patří jejich vysoká pořizovací cena. Dnes polovodičové lasery nahrazují CO₂ lasery a zažívají velký rozmach a to hlavně díky mobilitě, rozměrům a účinnosti oproti těžkým méně kompaktním plynovým laserům. Hlavně díky snadné manipulaci a rozměrům se tyto lasery hodí pro povrchové zpracování především povrchové kalení. Na obrázku 8 je schéma polovodičového laseru a na obrázku 8 je ukázka hotového polovodičového laseru. [4]



Obrázek 8 - Schéma diodového laseru [4]

4.2.3 Pevnolátkové Nd:YAG lasery

Pevnolátkový iontový Nd:YAG laser obsahuje jako aktivní prostředí opticky propustný izotropní krystal, který se nazývá Nd:YAG krystal, který je zobrazen na obrázku 9. Zkratka YAG znamená Ytrium Aluminium Granát s obohacením ionty neodymu Nd₃₊. Tento laser může pracovat jak v pulsním tak v kontinuálním režimu. Laser pracuje na vlnové délce 1064nm, která prochází přes křemenné sklo. Nd:YAG laser je v dnešní době nejvyužívanějším pevnolátkovým laserem. Čerpání krystalu se provádí pomocí kryptové výbojky. Když Nd:YAG laser dosahuje vlnovou délku o hodnotě 1064,1 nm v kontinuálním režimu (CW) tak má maximální výkon, který se pohybuje od stovky do tisíce wattů. Pokud je laser v pulsním režimu tak dosahuje řádově desítky joulů. Délka těchto pulsů se pohybuje od mikrosekund do 5 pikosekund. Záleží na druhu použité modulace jakosti rezonátoru. Proto na krátký čas můžeme docílit vysokého výkonu laseru. [4]

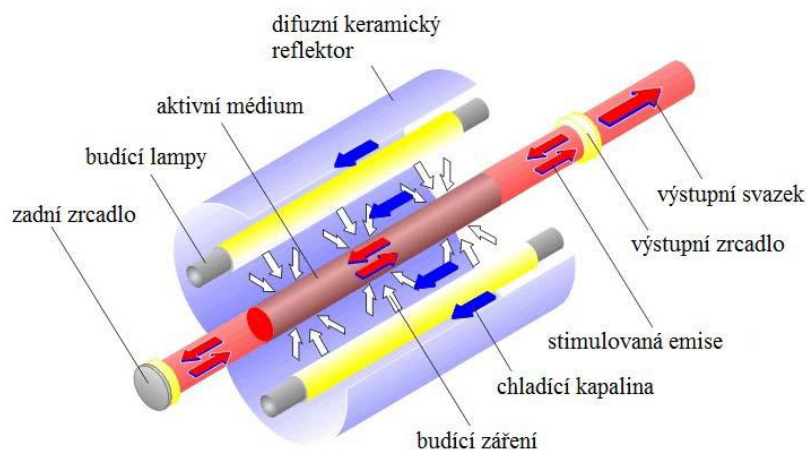


Obrázek 9 - Nd:YAG krystaly [16]

Mezi výhody pevnolátkového Nd:YAG laseru patří jeho aktivní prostředí, které obsahuje krystal. Krystal jakožto látka vyznačující se vysokou hustotou energie, která má velmi dobrou stabilitu a s možností generovat krátké vysokovýkonné pulsy. Na obrázku číslo 10 je zobrazena struktura rezonátoru Nd:YAG laseru a na první pohled je vidět, že je tento laser výrazně kompaktnější než plynový CO₂ laser. Další velikou výhodou oproti plynovým CO₂ laserům patří její nízká vlnová délka, která je až desetkrát nižší a proto je možné laserové záření přenášet pomocí optického vlákna na vzdálenosti až několika desítek metrů. [4]

Mezi nevýhody pevnolátkového Nd:YAG laseru patří jeho malá účinnost, která se pohybuje v rozmezí 2-3%. Z hlediska účinnosti je na tom lépe CO₂ laser. Další velkou nevýhodou je přívod značně velkého příkonu, který má hodnotu až 200kW. Takto velké výkony produkují teplo a zařízení je nutné chladit podobně jako je tomu u CO₂ laserů. [4]

Dnes se tyto nedostatky s nízkou účinností a s vysokou teplotou snaží výrobci vyřešit tak, že nahrazují výbojkové čerpání čerpáním pomocí polovodičových diod. Tímto nahrazením se rapidně zvedne účinnost až na 15-20% sníží se spotřeba elektrické energie a chladících medií. Tyto lasery pak mají nízkou hmotnost, tím se stávají mobilními. S použitím vysokovýkonných diod se rapidně zvyšuje cena zařízení, což brání rozmachu tohoto řešení. [4]



Obrázek 10 - Struktura rezonátoru Nd:YAG laseru [14]

5. Zkoušky tvrdosti

Vnikací zkoušky nám dávají zejména informaci o jedné z důležitých vlastností materiálu a to tvrdosti. Tvrdost lze charakterizovat jako odolnost povrchu proti vniknutí cizího tělesa a vytvoření místní deformace. Měření tvrdosti je jednoduché z důvodu, že pro měření není nutné vytvářet speciální zkušební vzorek. Tvrdost se měří přímo na příslušném výrobku. [2]

Vnikací zkoušky rozdělujeme na statické a dynamické. U statické zkoušky je zkušební těleso vtačováno klidnou silou do zkoušeného tělesa. A při dynamických zkouškách se zatížení vyvodí dynamicky tudíž rázem. U statických zkoušek tvrdosti dochází k narušení povrchu. Jedná se o vniknutí zkušební tělesa a vytvoření vtisku nebo vrypu. Vnikací těleso se nesmí plasticky deformovat. Proto musí být z vysoce tvrdého materiálu a mít vysokou hodnotu modulu pružnosti. [2]

Vnikací zkoušky se využívají nejvíce. U těchto metod dochází k vnikání indentoru do povrchu materiálu. Hloubka tohoto proniknutí závisí na velikosti zatěžovací síly. Pro přesné měření musí být povrch zkušební tělesa rovný a čistý a nesmí být po zkoušce viditelné otlacení na protilehlé straně materiálu, přesněji musí být splněna podmínka poměru hloubka vtisku a tloušťka vzorku. Základní vnikací zkoušky jsou rozděleny dle druhu zatížení a použitého vnikacího tělesa na zkoušku tvrdosti dle Brinella, Rockwella a Vickerse.[2]

5.1.1 Zkouška tvrdosti dle Brinella

Tato zkouška podléhá normě ČSN 42 0371 a při teplotách 400°C normě ČSN 42 0358. Tudíž je pevně stanovený materiál kuličky, doba a síla zatěžování a rozměry kuličky. Tuto metodu vytvořil J.A.Brinell podle nějž se i metoda nazývá. U této metody se tvrdost vyjadřuje jako poměr působící zátěžové síly na plochu vtisku po vniknutí kuličky. Jako vnikající těleso se nejčastěji používá kalená ocelová kulička nebo ojediněle ze slinutého karbidu. Po vtisku se měří průměry vtisku kolmé na sebe. Tyto průměry se zprůměrují a dosadí do následujícího vztahu pro výpočet HB.

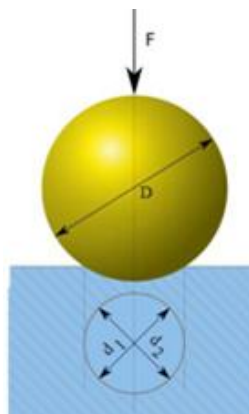
$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{A} = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi \cdot D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Kde F je zátěžová síla, D je průměr kuličky a d průměr vtisku. Nebo lze odečíst z tabulek.

Za normálních podmínek u makrotvrdosti dle normy jsou hodnoty D = 10mm , F = 29430N (udává se většinou 3000kp) a doba působení kuličky 10-15s. Pokud zkouška vyhovuje normě, uvádí se u tvrdosti pouze HB. Pokud měříme s jinými parametry, uvádí se za HB měřené parametry a to průměr kuličky/ velikost zatížení/ doba jeho působení. [2]

Aby nedocházelo k nepřesným výsledkům, je nutné měřit v příslušné vzdálenosti od vedlejšího vtisku a od okraje vzorku. Vzdálenost středů vtisků by měla odpovídat hodnotám přibližně 4d. Okolí vtisku je totiž plasticky zpevněné a má tudíž větší tvrdost. [2]

Zkouška tvrdosti dle Brinella je vhodná pro měkké materiály a středně tvrdé materiály. Proto nevýhodou této zkoušky je, že se nehodí pro tvrdé materiály. Důvodem je, že není splněna podmínka maximální měřitelné tvrdosti ocelovou kalenou kuličkou nebo slinutým karbidem. [2]



Obrázek 11 - Zkouška tvrdosti dle Brinella [23]

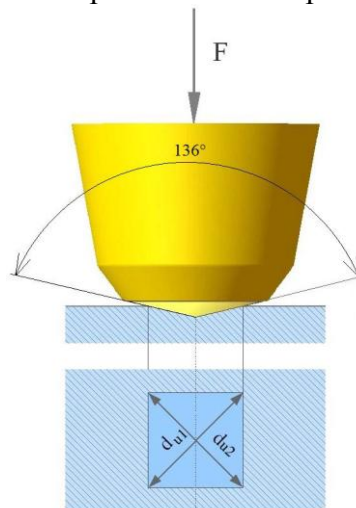
5.1.2 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Tato zkouška je dána normou ČSN 420374. Tuto zkoušku vymyslel R.L. Smith a G.E. Sentland. Zkouška Vickerse je obdobná zkoušce dle Brinella, avšak s rozdílným zatížením a vnikacím tělesem. U měření tvrdosti dle Vickerse se do povrchu zkoušeného materiálu vtlačuje pravidelný čtyřboký diamantový jehlan o vrcholovém úhlu 136°. Vyhodnocuje se na základě zkušebního zatížení na plochu vtisku. Měří se úhlopříčky pomocí měřicího mikroskopu a určí se jejich aritmetický průměr. Tvrdost se určí dle následujícího vztahu

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{d^2}$$

Normalizované podmínky jsou zatěžovací síla 30kp. Doba zatížení 10-15s. Označení HV/velikost zatížení/doba působení. [2]

Zkouška musí probíhat za plynulého zatížení a bez rázů. A musí být minimálně ve vzdálenosti o 2,5d od sousedního vtisku a od okraje vzorku. Kvůli vlivu plastického zpevnění. Výhodou je, že výsledky z měření nejsou závislé na zatížení. Přesnost měření je závislá na čistotě a hladkosti povrchu a na homogenitě měřené struktury. Zkouška tvrdosti dle Vickerse je na rozdíl od ostatních zkoušek velice přesná a vhodná pro laboratorní měření. [2]

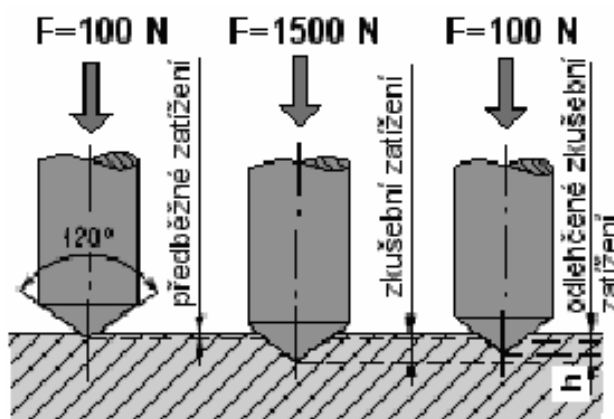


Obrázek 12 - Zkouška tvrdosti dle Vickerse [24]

5.1.3 Zkouška tvrdosti dle Rockwella

Tato metoda má normu ČSN 42 0373. Tuto metodu vytvořil S. P. Rockwell. Na rozdíl od předchozích zkoušek se liší tím, že zde místo průměrů a úhlopříček měříme hloubku vtisku. U této zkoušky vtlačujeme diamantový kužel se zaobleným poloměrem 0,2mm nebo ocelovou kalenou kuličku 1/16 “. Postup měření je znázorněn na obrázku číslo 13. [5]

Měření probíhá tak, že zkoušené těleso umístíme kolmo vůči vnikacímu tělesu a zatěžujeme ho postupnými silami. Indikátor na přístroji nastavíme na výchozí polohu a začneme těleso zatěžovat. Po zastavení ručičky zatížení odlehčíme a odečteme výsledek tvrdosti. Hodnota 0,002mm hloubky odpovídá 1HRC. Čím je materiál měkčí tím je hlubší vtisk. Pro tvrdé materiály se používá jako vnikající těleso diamantový kužel a pro měkký materiál kulička. Pro přesné měření musí být minimální vzdálenost mezi sousedním vtiskem aspoň 3mm. [5]



Obrázek 13 - Tvrdost dle Rockwella kužel [25]

Značení tvrdosti dle Rockwella je HR a k tomu je připojeno písmeno stupnice. A,B,C v závislosti na použité vnikající těleso.

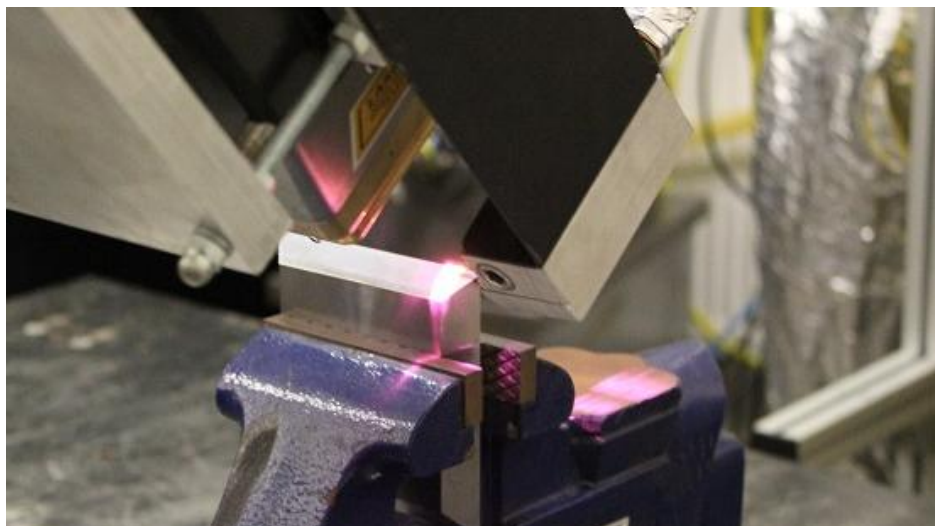
Označení	Tvar indentoru	Zatížení [N]		
		F_0	F_1	$F_0 + F_1$
HRA	kužel	98	490	588
HRC	kužel	98	1373	1471
HRB	kulička	98	883	980
HRN	kužel	29,4	117,7	147,1
HRT	kulička	29,4	268,4	294,2
			419,9	441,3

Tabulka 1 - Označení tvrdostí dle Rockwella

6. Úvod do experimentální části

Cílem experimentální části bakalářské práce je porovnat dvě metody laserového povrchového kalení. Jsou kaleny vzorky z materiálu 12050 v oblasti ostré hrany. První, standardní metoda laserového povrchového kalení, má velikost stopy laseru 12x6mm. Širšího pokrytí je docíleno pomocí defokusační optiky. Pro zakalení širší oblasti je nutné umístit tyto stopy vedle sebe. Výhodou velikosti spotu je rychlost procesu kalení, nevýhodou nutnost překryvu jednotlivých stop, což vede k částečnému popuštění v místě překryvu a tím k nehomogenitě vlastností kaleného povrchu. Druhá metoda je skenovací laserové kalení, kde dochází pomocí optických zrcadel k rychlému vychylování laserového paprsku. Výhodou je zde odstranění překryvů jednotlivých stop. Na druhou stranu však metoda není vhodná pro kalení velkých ploch.

Vzorek byl zakalen čtyřmi různými způsoby, které jsou popsány později. Z takto zakaleného vzorku byly zhodnoceny vzorky vhodné pro mikroskopii a měření tvrdosti.



Obrázek 14 - Ukázka kalení ostré hrany

7. Technologická zařízení

7.1 Použité lasery

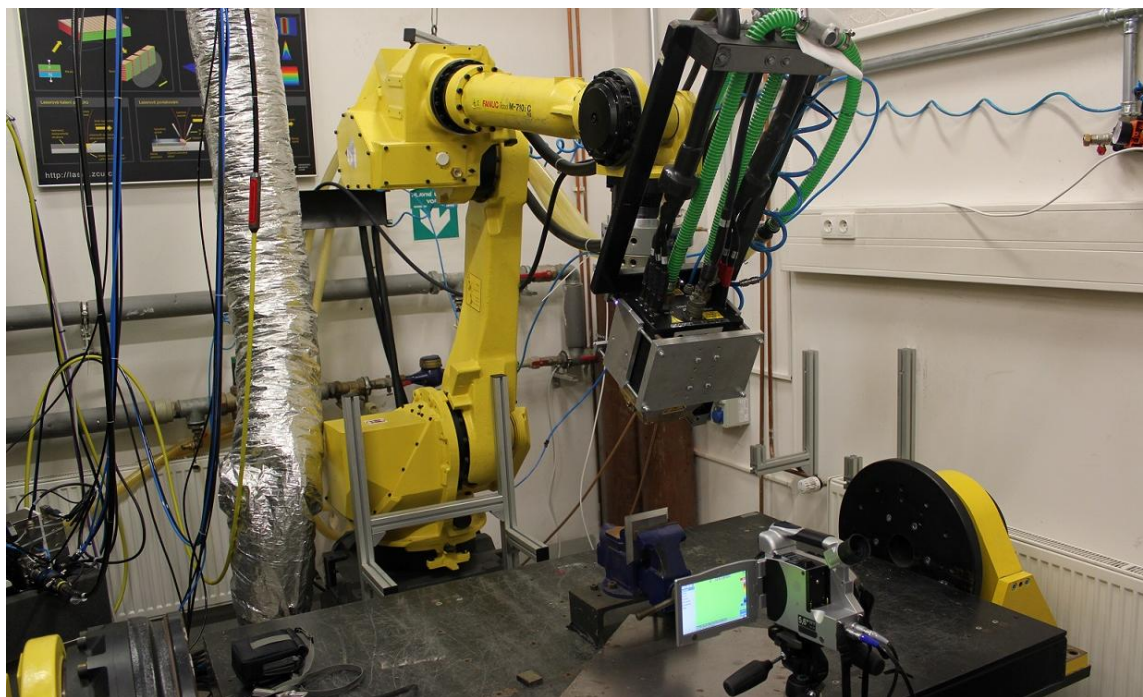
Pro samotné povrchové kalení se použili různé typy laserů. Pro standardní laserové kalení se použil výkonný kontinuální laser HighLight ISL4000L. Pro druhou metodu kalení konkrétně skenovací metodu byl použit Trumpf TruDisk 8002 – Blackbird se skenovací hlavou Scanlab intelliWELD 30 FC V.

7.1.1 Výkonný kontinuální laser HighLight ISL4000L

Tento výkonný diodový laser (HPDD – High Power Direct Diode) se zejména používá pro povrchové zpracování kovových materiálů a to zejména povrchové kalení. Laserové diody, které jsou nedílnou součástí tohoto laseru, vytváří obrazec o rozměrech 12 x 1 mm při pracovní vzdálenosti 90mm. Takovýto tzv. „surový“ svazek lze tvarovat za pomoci pracovní optiky. K povrchovému kalení se tento spot upravuje za pomoci defokusační optiky a to na zvětšený rozměr 12 x 6 mm. Pohyb laseru je zajištěn pomocí laserového manipulátoru Fanuc M-710iC. Tento manipulátor se pohybuje v šesti osách. Aby bylo možné zpracovávat rotační součásti je v tomto systému integrované rotační polohovadlo. [27]

Technické parametry: [27]

Max výkon	4,38 kW CW
Vlnová délka	802 nm
Profil laserové stopy	12 x 6 mm
Pracovní vzdálenost optiky	90 mm
Provozní režim	Kontinuální a modulovaný
Min. šířka pulzu	1 ms
Max. opakovací frekvence pulzu	350 Hz
Výkonová stabilita	< 1 %/hod



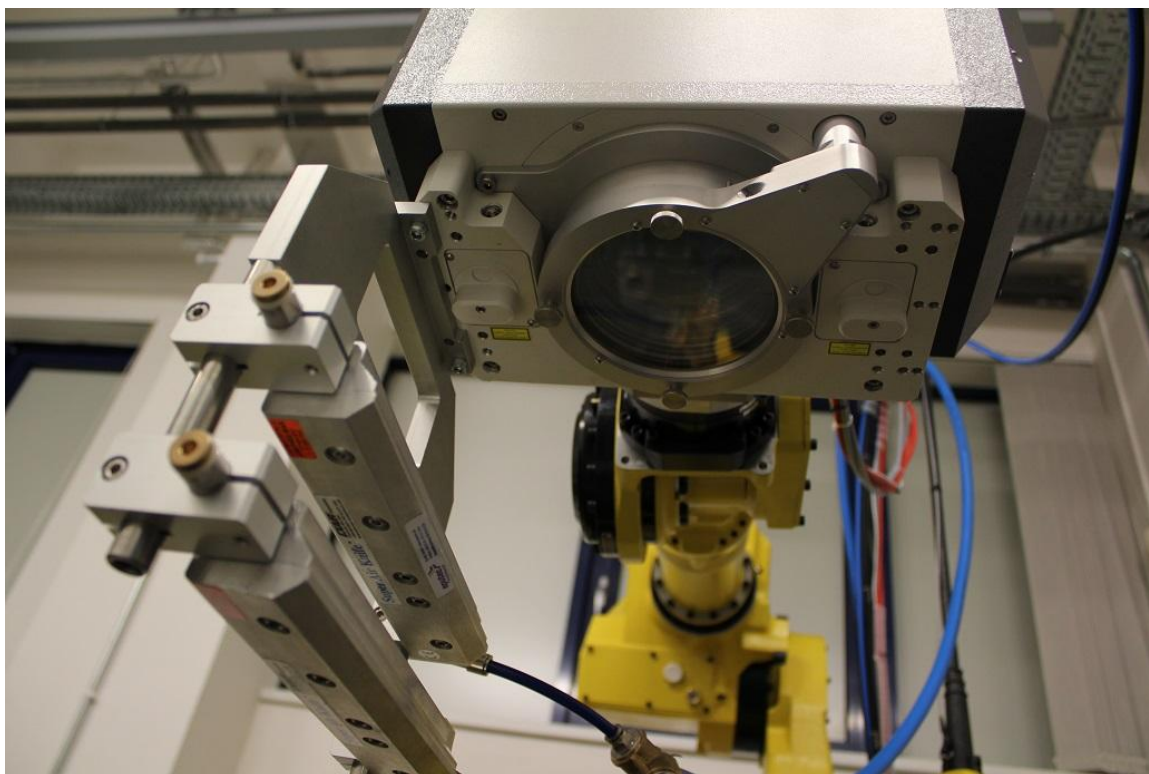
Obrázek 15 - Výkonný kontinuální laser HighLight ISL4000L

7.1.2 Trumpf TruDisk 8002 – Blackbird

Trumpf TruDisk 8002 je pevnolátkový diskový laser, který je buzený pomocí laserových diod. Dosahuje maximálně výkonu 5,3 kW s možností rozšíření. V laserovém zdroji se nachází celkem čtyři výstupy do flexibilních optických vláken, které mají minimální průměr s hodnotou 200 μm a délku 20 m s možností připojení technologických hlav. Laser umožňuje komunikaci s robotem Fanuc M-710iC a RSU firmy Blackbird přes rozhraní ProfiBus. „Synchronizační jednotka Blackbird zajišťuje komunikaci s robotem, ovládá vychylování laserového svazku skenovací hlavou a řídí spínání a výkon laserového svazku.“ [27] Vychylování laserového paprsku je zajištěno skenovací hlavou Scanlab intelliWELD 30 FC V. [27]

Technické parametry: [27]

Výkon	160 - 5300 W
Vlnová délka	1030 nm
Kvalita svazku (BPP)	8 mm mrad
Stabilita výkonu	+/- 1%
Provozní režim	kontinuální, modulovaný s délkou pulsu min 0,3 ms
Průměr laserového svazku v ohnisku	cca 800 μm
Velikost skenovacího pole	eliptické, poloosy 190 \times 160 mm
Pracovní vzdálenost	vzdálenost 544 mm
Maximální rychlost skenování	až 20 m/s



Obrázek 16 - skenovací hlava Scanlab intelliWELD 30 FC V

7.2 Laboratorní zařízení

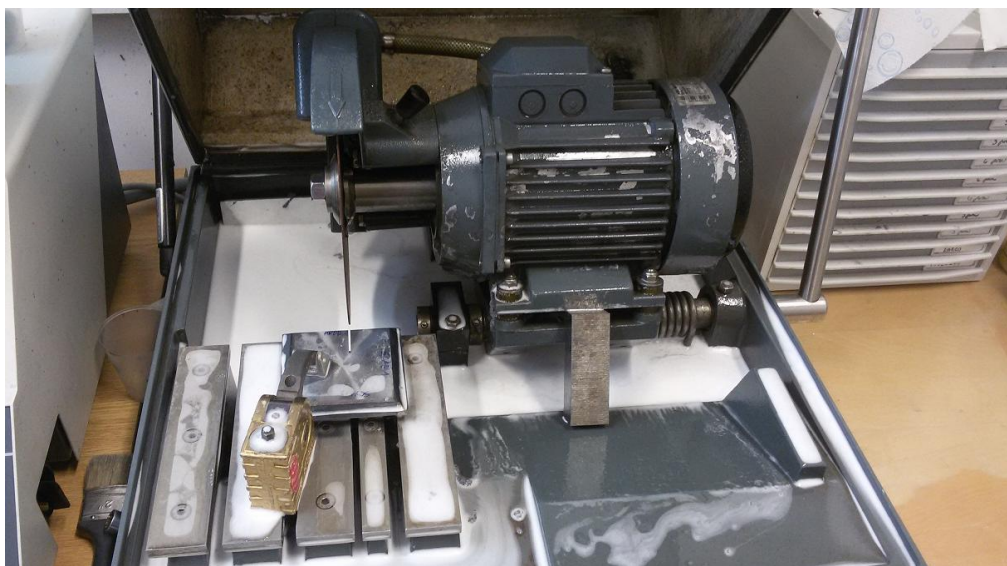
Aby bylo možné získaný zakalený vzorek vyhodnotit, je nutné ho vhodně připravit pro světelnou mikroskopii a měření tvrdosti. Proto je nutné použití laboratorní pily pro nařezání vzorku. Dále zalití vzorku do dentakrylu a jeho vyleštění na laboratorní leštičce. Naleptání vzorku 3% Nitalem pro zvýraznění mikrostruktury a použití uvedených mikroskopů pro zhodnocení mikrostruktury a tvrdoměru pro hodnocení tvrdosti.

7.2.1 Kotoučová rozbrušovací pila Struers Labotom-3

Tato pila umožňuje efektivní oddělování vzorků bez tepelného ovlivnění. K tepelnému ovlivnění nedochází díky intenzivnímu chlazení brusného kotouče. Podrobnější parametry jsou popsány v tabulce.

Technické parametry: [17]

Výkon motoru	3,2 kW
Otáčky	2845 rpm
Rozměry řezacího kotouče	250 x 1,5 x 32 mm
Hmotnost	80 kg
Rozměry	651 x 410 x 645 mm



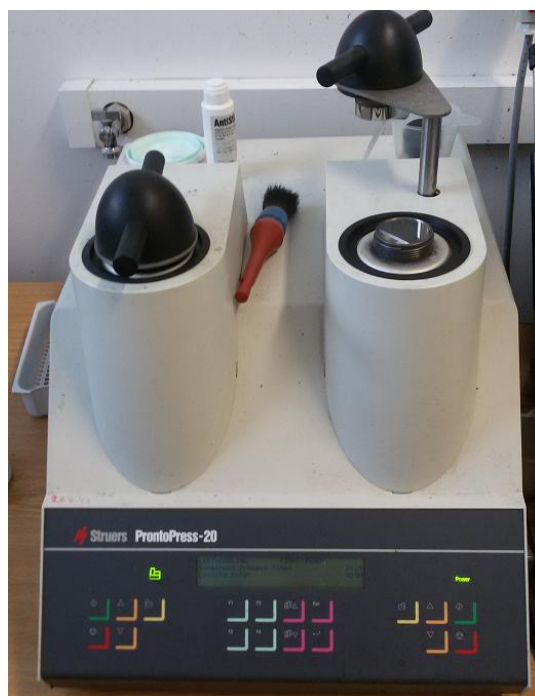
Obrázek 17 - Kotoučová rozbrušovací pila Struers Labotom-3

7.2.2 Zalisovací zařízení Struers Prontopress 20

Zalisovací zařízení umožňuje nařezané vzorky zalít do dentakrylové hmoty. S těmito zalitými vzorky je snadnější manipulace a lze je upnout do automatické leštičky.

Technické parametry: [18]

Rozmezí lisovací síly	0-50 kN
Rozmezí tlaku	0-25 to 100 Mpa
Rozmezí teploty	100 – 180 °C
Max spotřeba	1,5 kW
Hmotnost	51 kg
Rozměry	420 x 580 x 420 mm



Obrázek 18 - Zalisovací zařízení Struers Prontopress 20

7.2.3 Laboratorní automatická leštička Struers Labopol-5

Automatická leštička značky Struers typ Labopol-5 s magnetickým uchycením leštících pláten umožňuje leštění vzorku s navolenou rychlostí a přítlačnou silou.

Technické parametry: [19]

Motor	1/3 x 200-240 V / 50-60 Hz
Výkon	250 W
Otáčky	50-500 rpm



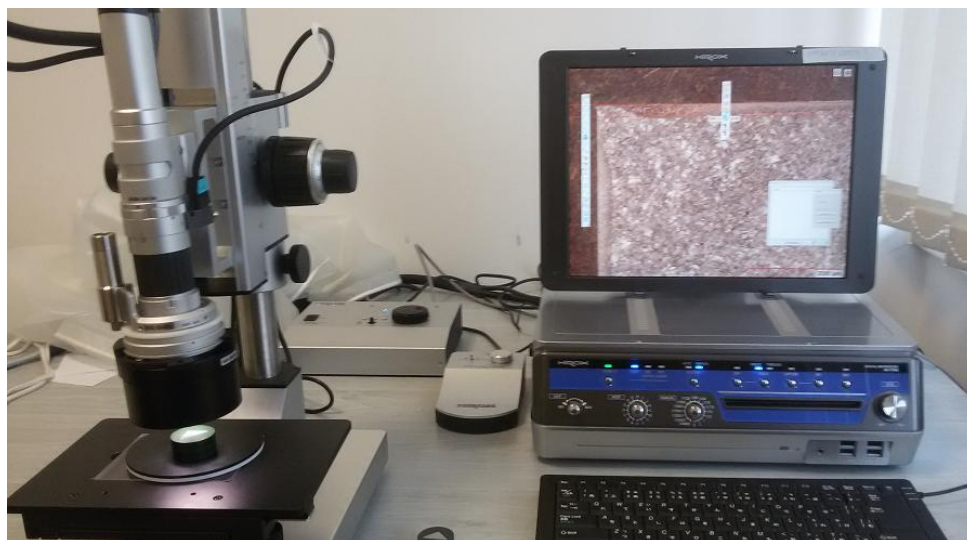
Obrázek 19 - Laboratorní automatická leštička Struers Labopol-5

7.2.4 Digitální mikroskop Hirox KH-7700

Digitální mikroskop Hirox KH-7700 je zařízení pro 2D a 3D mikroskopickou analýzu. při zvětšení v rozměrech 5-3500x. Umožňuje skládání obrazu, nahrávání videa, měřit délku a rozlohu. Také umožňuje měření geometrických vlastností vzorku jako měření výšky, úhlu a srovnávání obrazu. Dále funkcí je 360° zobrazení objektů pomocí rotačního adaptéru a nahrávání videa. [27]

Technické parametry: [27]

Zvětšení	5 – 3500x
Objektivy	MXG-MACROZ VI (zvětšení 5 – 50x)
	MXG 5040RZ (zvětšení 50 – 400x)
	MGX 10C (zvětšení 350 – 3500x)
Hmotnost: základna	12kg
Příkon	250W
Rozměry	420x430x343mm
Zdroj světla	60W halogenidová výbojka



Obrázek 20- Digitální mikroskop Hirox KH-7700

7.2.5 Optický mikroskop Nikon Epiphot 200

Optický mikroskop Nikon Epiphot 200 s digitálním zpracováním obrazu souží k optickému zobrazování fyzikálních objektů s rozlišením do 10 mikrometrů. Mikroskop je primárně určen a je konstruovaný pro metalografické účely, kde světlo osvětluje vzorek zespodu. Výhodou mikroskopu je možnost volby pozorování ve světlém nebo v tmavém poli, kde objekty jsou snímány pomocí CCD kamery a digitálně transformované do optické podoby, která umožňuje další zpracování. [21]

Mikroskop louží primárně pro pozorování metalografických výbrusů a magnetických materiálů. [21]

Technické parametry: [20]

Pozorovací režimy	Světlé, tmavé pole a polarizované světlo
Zvětšení	50x – 1000x
Rozměry	361 x 736 x 436 mm
Hmotnost	31 kg
Světelný zdroj	Halogenové osvětlení 12V – 100W



Obrázek 21 - Optický mikroskop Nikon Epiphot 200

7.2.6 Tvrdoměr Buehler

Tvrdoměr značky Buehler používá Vickersův diamantový indentor. Pro manipulaci vzorku se používá stolek umožňující pohyb v osách X a Y. Automatická změna indentoru a objektivu umožňuje okamžité změření a vyhodnocení tvrdosti.

Technické parametry:

Možnosti měření	HV 0.3
	HV 1
	HV 5



Obrázek 22 - Tvrdoměr Buehler

7.2.7 Infrakamera VarioCAM HD InfraTec (Jenoptic)

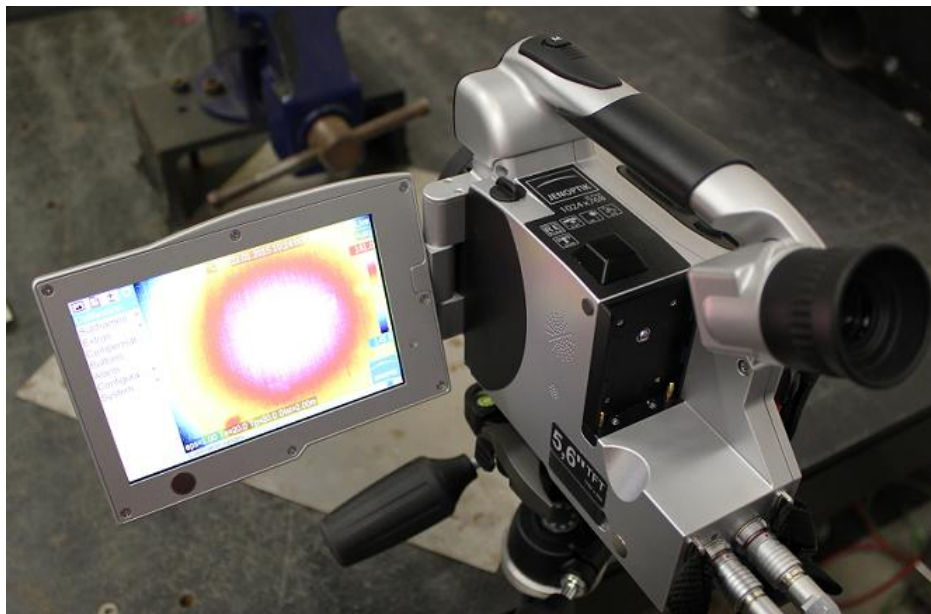
Je termokamera, která umožňuje zachycení teplotního stavu daného předmětu. „InfraTec VarioCam HD, která je průkopníkem v oblasti nechlazených bolometrů. Termokamera má skvělou ergonomii kovového housingu se stupněm krytí IP54, obrovskou naklápěcí 5.6" TFT obrazovku, pokročilé měřicí funkce a uživateli tak nabízí profesionální přístup k vědeckým, vývojovým a průmyslovým aplikacím.“ [22]

„Termokamera má integrované rozhraní GigE-Vision pro rychlý přenos dat z kamery do PC, možnost ukládání periodických IR sekvencí, široké portfolio objektivů (f/1.0) včetně výkonného vyhodnocovacího softwaru IRBIS 3, možnost ukládání hlasových a textových poznámek.“[22]

Termokamera má širokou škálu využití. Například v automobilovém průmyslu, diagnostika budov, testování materiálů, vědecké aplikace a medicínské aplikace.

Technické parametry: [22]

Rozlišení	1024 x 768
Měřicí teplotní rozsah	-40 – 1200 °C
Display	5,6“ colour TFT display (1280 x 800 px)
Teplotní rozlišení	30 °C
Možnost uložení	SDHC, Interní paměť, Gig-E Vision
Napájecí zdroj	Lithium-on baterie a AC adaptér
Rozměry	210 x 125 x 155 mm
Hmotnost	1,7 kg



Obrázek 23 - Infrakamera VarioCAM HD InfraTec (Jenoptic)

7.3 Volba materiálu

Pro vlastní experiment byl zvolen materiál ČSN 12 050. Jedná se o uhlíkovou ocel, která je vhodná k zušlechťování a povrchovému kalení. Je vhodná pro hřídele těžkých strojů, turbokompresorů, karuselů apod., na větší ozubená kola, šneky, ozubené věnce, rotory šroubových kompresorů, ojnice pístnice. Tato ocel je poměrně obtížně svařitelná. [29]

Dodaný vzorek z materiálu ČSN 12 050 nebyl nijak před provedením experimentu tepelně upravován ani znehodnocen.

Značení oceli: [29]

ČSN	EN	ISO
12050	C45	C60E4

Tabulka 2 - Značení ocelí

Chemické složení dle normy ČSN 12050 [hm. %]: [29]

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
0,42-0,50	0,50-0,80	0,17-0,37	max 0,25	max 0,30	max 0,30	max 0,040	max 0,040

Tabulka 3 - Chemické složení oceli ČSN 12050 dle normy

Mechanické vlastnosti: [29]

Re [MPa]	Rm [MPa]	A5 [%]	Tvrdość HB
390	640 - 780	20	Max 253

Tabulka 4 - Mechanické vlastnosti oceli ČSN 12050 dle normy

Re - minimální mez kluzu

Rm - mez pevnosti

A5 - tažnost

HB - tvrdość dle Brinella

Chemické složení materiálu bylo zjišťováno pomocí metody GDOES. Dále byla měřena tvrdość základního materiálu. Porovnáním tabulek 3 a 5 lze opravdu prohlásit, že se skutečně jedná o normovaný materiál dle ČSN 12050.

Chemické složení dle GDOS použitého materiálu [hm. %]:

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S	Nb	V	Ti	Al
0,500	0,760	0,270	0,240	0,100	0,050	0,009	0,008	0,065	0,008	0,010	0,030

Tabulka 5 - Chemický rozbor materiálu pomocí GDOES

Naměřená tvrdość základního materiálu dle Vickerse: 176,3 HV

8. Návrh experimentu

Experimentální program byl prováděn z důvodu zjištění vhodnosti vybrané metody pro kalení ostré hrany. Standardní laserové kalení má nevýhodu míst překryvu oproti skenovacímu laserovému kalení. Skenovací laserové kalení v tomto případě tento nedostatek odstraňuje. Na standardní laserové kalení byl použit výkonný diodový laser HighLight ISL4000L. Zde je široký paprsek získáván defokusační optikou. Kalení probíhalo se stálým výkonem 3,3kW. Rychlost posuvu laserového paprsku byla nastavena na 23,33 mm/s. Vzorek byl zakalen dvěma způsoby: i) z obou stran a ii) pouze z jedné strany.

Pro kalení skenovací metodou byl využit pevnolátkový diskový laser Trumf TruDisk 8002 se skenovací hlavou Scanlab intelliWELD 30 FC V. Kalení probíhalo na dva způsoby. Kalilo se shora a jeden způsob byl kalení shora obou ploch najednou. Druhý způsob kalení jedné a pak druhé strany obdélníkovým profilem s 1mm rezervou v místě hrany. Pro prvním způsob byl zvolen výkon 740W. Rychlost skenování: 4000 mm/s, Rychlost zpracování: 4 mm/s, fokus: -10 mm. Pro druhý způsob byl zvolen výkon 480W ostatní parametry zůstali stejné.

Po zakalení vzorků bylo navrženo vyhodnocení způsoby s ohledem na mikrostrukturu, geometrii a tvrdość. Pro hodnocení tvrdości byl zvolen Vickersův tvrdoměr a to z důvodu přesnosti měření a možnosti výběru široké škály tvrdości.

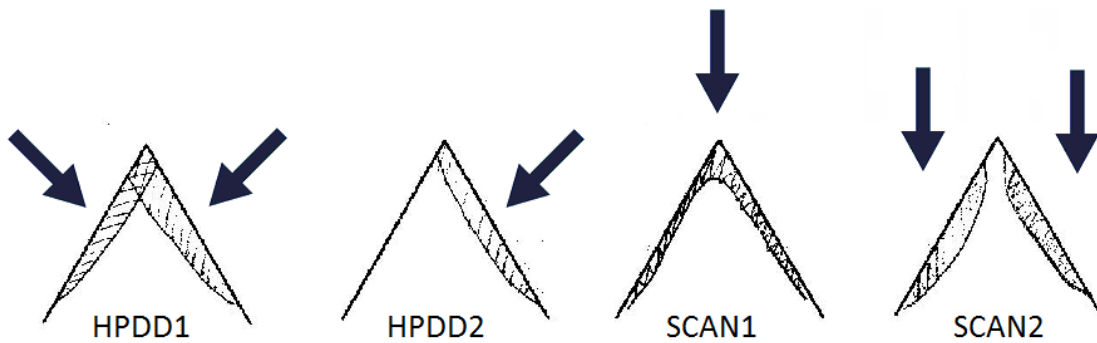
Pro snazší orientaci byly pro jednotlivé metody kalení zvoleny pracovní názvy.

HPDD 1 - Standardní kalení obou ploch

HPDD 2 - Standardní kalení jedné plochy

SCAN 1 - Kalení skenováním obou ploch včetně špičky

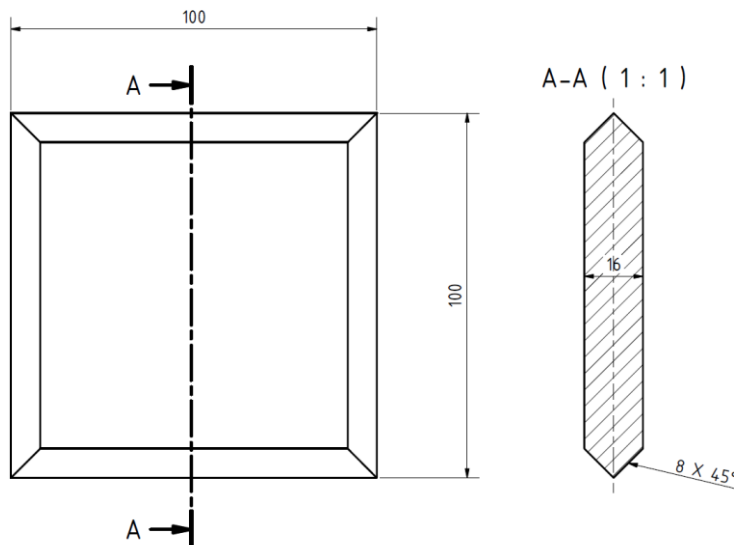
SCAN 2 - Kalení skenováním obdélníkové profily postupně jedna a druhá strana s 1mm rezervou v oblasti špičky.



Obrázek 24 - Schéma metod kalení

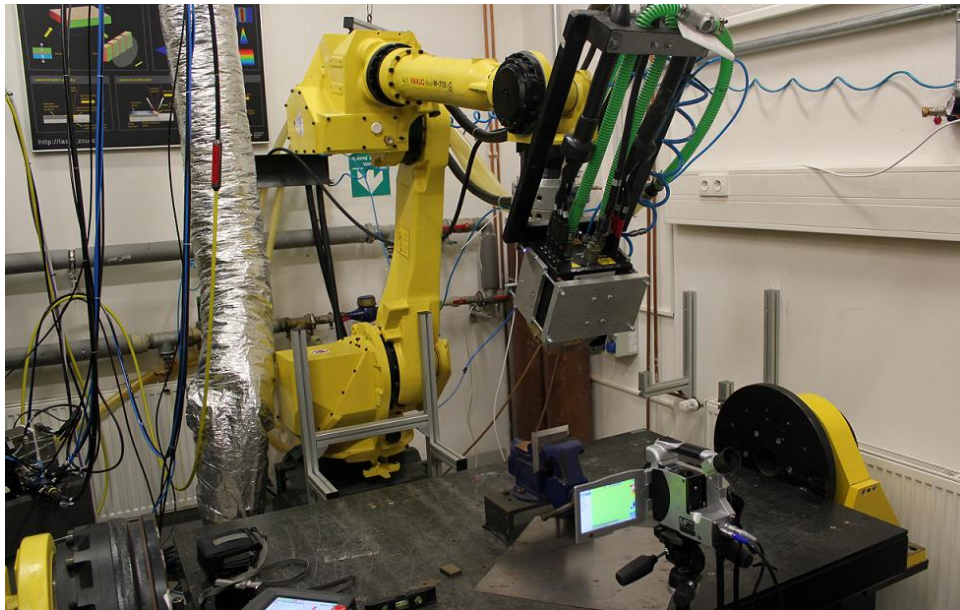
9. Postup provedení experimentu

Pro kalení byl zvolen vzorek z materiálu 12050. Tato ocel nebyla nijak tepelně upravovaná ani žádným způsobem nijak znehodnocená. Naměřená tvrdost základního materiálu byla 176 HV. Přesné chemické složení je popsáno ve volbě materiálu. Vzorek má tvar čtvercového profilu 100x100mm. Po jeho 4 stranách jsou hrany se sražením o 45°.



Obrázek 25 - Rozměry základního vzorku

Vlastní příprava kalení a později samotné kalení probíhalo v budově vědeckotechnologického centra NTC v Plzni. Při kalení byl vzorek upnut do strojního svěráku a bylo na něm prováděno kalení. U standardního kalení byl laser kolmo na kalenou plochu. U skenovacího módu kalení byl laser směřován nad ostrou hranou, viz šipky v obrázku č. 11. Parametry, které byly nastaveny při kalení a principy jednotlivých metod kalení jsou popsány v kapitole 3. Návrhu experimentu. Průběh kalení byl zaznamenáván termokamerou pro pozdější vyhodnocení průběhu chladnutí teplot a pro zhodnocení orientační kalící teploty. U termokamery byl použit standardní objektiv s frekvencí 30Hz teplotní rozsah měření byl stanoven na 250 až 2000°C. Délka záznamu byla 1 minuta.



Obrázek 26 - Příprava pro kalení

Aby bylo možné vyhodnotit zakalené vzorky, bylo nutné provést metalografický výbrus a vhodně připravit vzorky pro pozdější měření.

Nejdříve bylo nutné vzorek nadělit na vhodné vzorky na kotoučové pile Struers Labotom - 3. Na kotoučové pile se dělil vzorek metodou abrazivního rozbrušování za mokra. V této pile byl upnut rozbrušovací kotouč a celý proces byl chlazený vodou. Rychlost otáček řezacího kotouče se pohybuje při 50Hz 2960 rpm.



Obrázek 27 - Ukázka dělení vzorku na kotoučové pile

Vzorek byl vhodně nadělen pro měření povrchové tvrdosti a příčný řez pro pozdější hodnocení. Celkem tímto dělení vzniklo 8 vzorků, které byly zality do dentakrylové směsi a slisovány.

Parametry pro zalití vzorků:

dentakrylová směs:	Phenocur (IsoFast)
zahřívací čas:	6min + 3min ochlazování
teplota:	180°C
lisovací síla:	20kN

Takto zalité vzorky bylo nutné vyleštit na automatické leštičce Struers Labopol - 5. Pro leštění kaleného materiálu byl stanoven přesný postup leštění. Za použití příslušně odpovídající suspenze s ohledem na drsnost plátna.

Postup leštění:

1. rovinné broušení - MD (magneticdisk) Piano 120 (Struers), síla 20N, 300ot, brousíme do roviny
2. 9 μm - allegro, síla 20N, 150ot, doba 5min
3. 3 μm - DAC, síla 30N, 150ot, doba 5min
4. 1 μm - NAT, síla 15N, 150ot, doba 2min

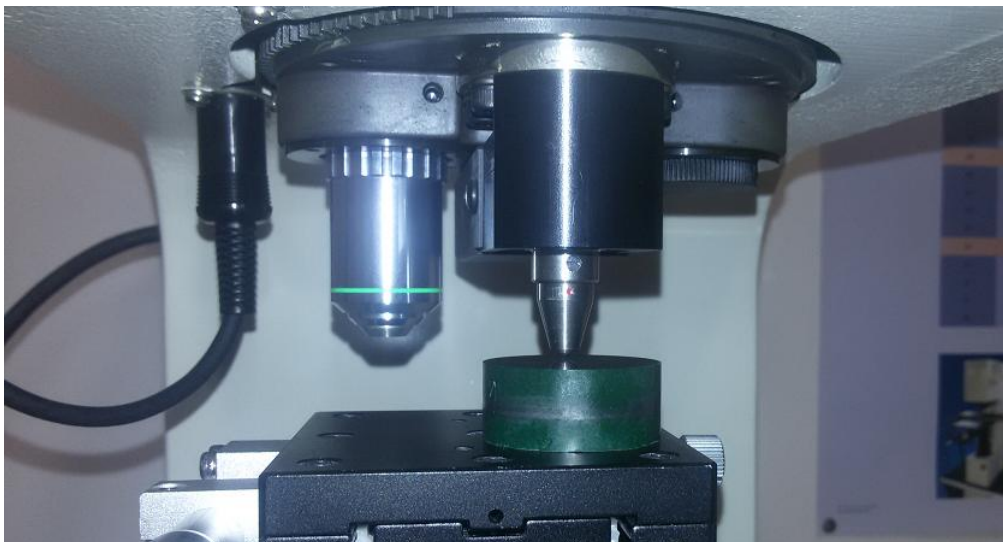


Obrázek 28 - Zalité a vyleštěné vzorky připravené pro vyhodnocení

Na obrázku 28 jsou vyfocené připravené vzorky. Aby bylo možné porovnávat mikrostruktury bylo nutné tuto mikrostrukturu nejdříve zviditelnit. Zviditelnění mikrostruktury se provádí pomocí leptadla. Konkrétně pro naleptání oceli 12050 bylo použito leptadlo 3% Nital. Vzorek byl ponechán 5s v leptadle ponořený a poté byl opláchnut vodou, vymyt lihem a osušen.

Vyhodnocování metod laserového kalení bylo prováděno na mikroskopech a na tvrdoměru. Na digitálním mikroskopu Hirox KH-7700 bylo prováděno měření geometrie. Data z toho měření sloužila pro porovnání změn geometrie špičky a pro orientační určení vzdálenosti hloubky kalení. Pro hodnocení mikrostruktury byl použit optický mikroskop Epiphot 200. Mikrostruktura se hodnotila v oblasti bříty, přechodu z kalené oblasti na základní materiál a pouze základního materiálu. Při použitých zvětšeních 5x, 20x a 50x. Data z tohoto měření sloužila k vyhodnocení změn z hlediska mikrostruktury.

Aby bylo možné změřit hloubku prokalitelnosti, vychází se z údajů tvrdosti. K měření tvrdosti byl použit Vickersův tvrdoměr. Z naměřených hodnot se vypočetla hloubka prokalitelnosti. Tvrdost se měřila s krokem vtisků od sebe ve vzdálenosti 150 μm v ojedinělém případě s krokem 100 μm . V HV1 (10N, 5s) a HV 0,3 (3N, 5s) a pro určení povrchové tvrdosti bylo vybráno 5 náhodných míst a HV5 (49N, 5s).



Obrázek 29 - Měření tvrdosti dle Vickerse

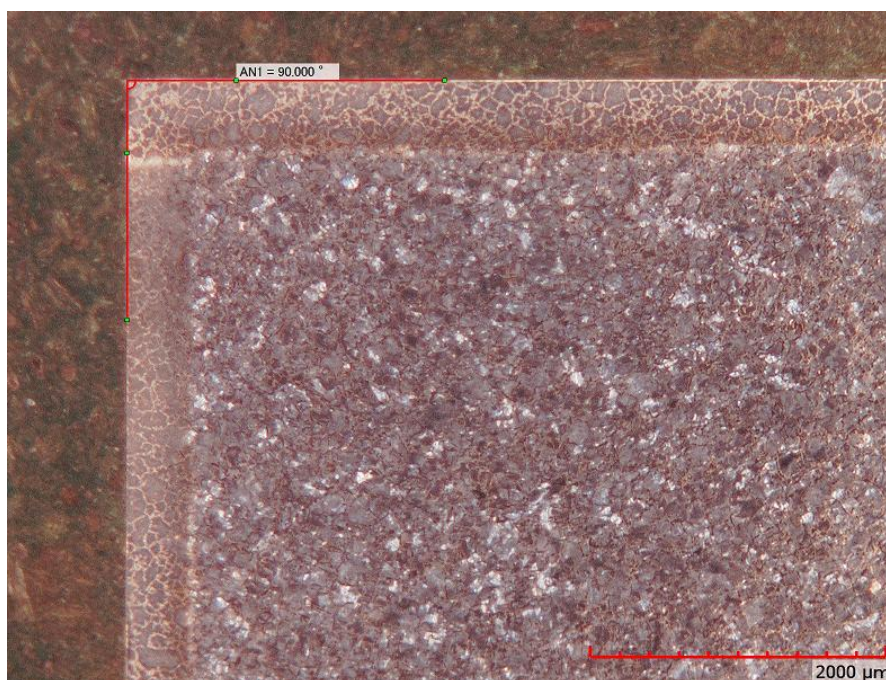
10. Výsledky

Pro vyhodnocení optimálnější metody laserového kalení se vycházelo z porovnání geometrie břitu, z porovnání mikrostruktury a zhodnocení prokalitelnosti na základě změření tvrdosti. Průběh teplot byl při kalení zaznamenáván termokamerou.

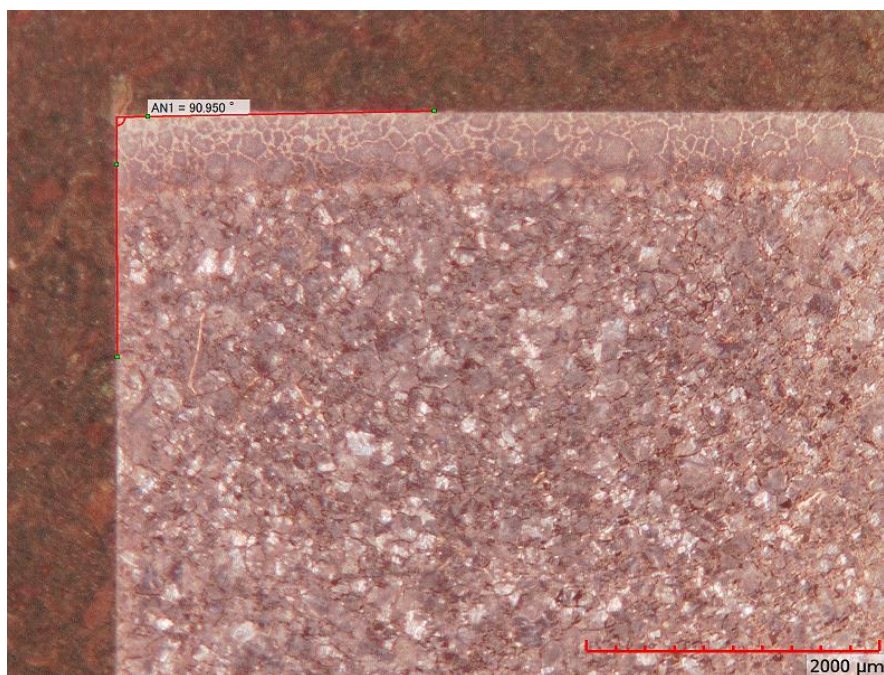
10.1. Vyhodnocení z geometrického hlediska

Pro hodnocení geometrických parametrů byl použit digitální mikroskop Hirox KH-7700. Hodnotila se geometrická přesnost úhlu břitu, rovnost stran a přibližná velikost stop po kalení.

Porovnání úhlu břitu:

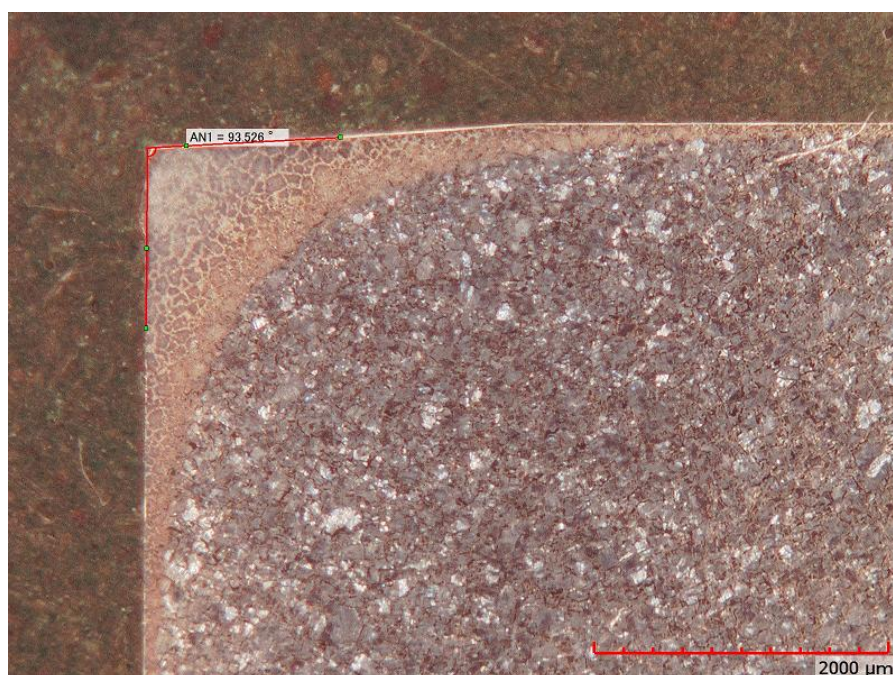


Obrázek 30 - HPDD 1 úhel břitu

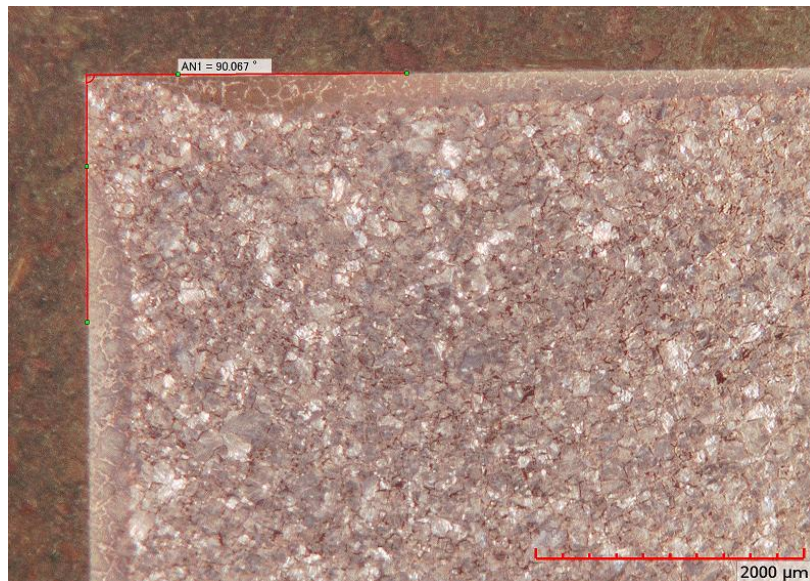


Obrázek 31 - HPDD 2 úhel břítu

Na první pohled je vidět, že u standardního laserového kalení nedošlo k výrazné deformaci břítu. U druhé metody kalení, kdy byla zakalena pouze jedna strana je mírná odchylka, která nemusí být způsobena deformací po kalení a pro nás je zanedbatelná.



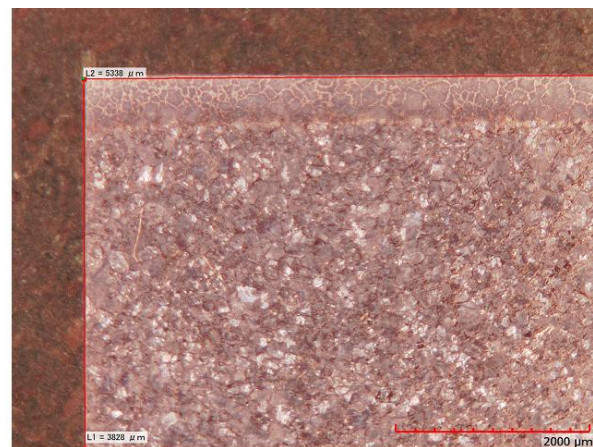
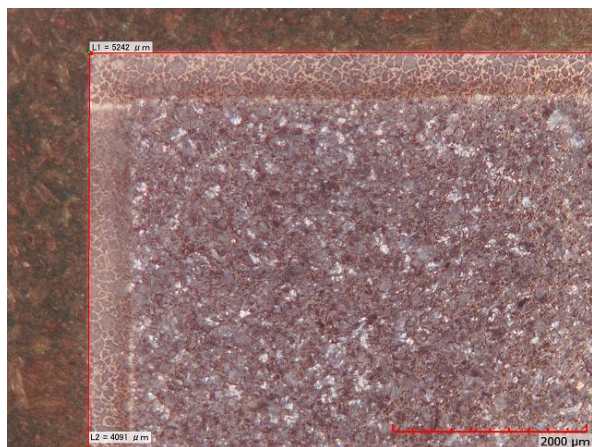
Obrázek 32 - SCAN 1 úhel břítu



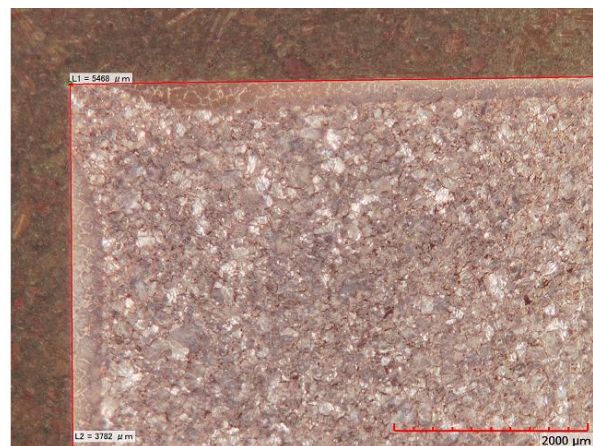
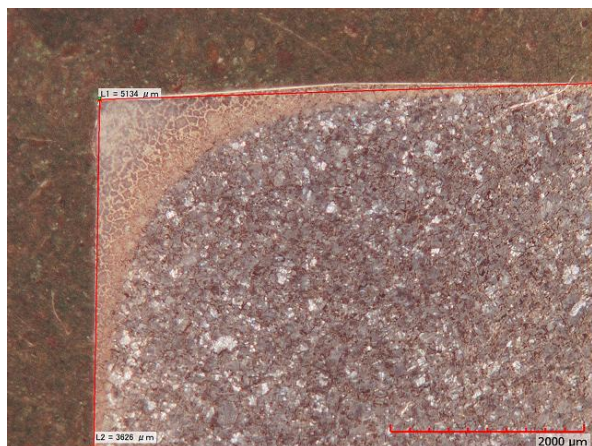
Obrázek 33 - SCAN 2 úhel břitu

U skenovacího laserového kalení v prvním případě byla pozorovatelná značná deformace špičky, což se také projevilo na úhlu, který se z hodnoty 90° změnil na hodnotu 93.526° . U druhého způsobu kalení bylo pozorovatelné, že nedošlo k zakalení břitu tudíž nemohlo ani dojít k jeho deformaci.

Porovnání rovnosti hran:



Obrázek 34 - Vlevo HPDD 1 vpravo HPDD 2



Obrázek 35 - Vlevo SCAN 1 vpravo SCAN 2

U standardního laserového kalení (HPDD 1 a 2) je rovnost hran zachována. U skenovacího laserového kalení (SCAN 1 a 2) je u prvního případu kalení na první pohled vidět defekt v rovnosti hrany.

10.2. Určení hloubky prokalení pomocí měření tvrdosti

Určení hloubky prokalení vychází z normy, konkrétně ČSN EN 10328. Tato norma pojednává o určení střední hodnoty z povrchové tvrdosti měřené na několika místech. A měření tvrdostí od povrchu s určitým odstupem v příčném řezu. Dále pojednává o experimentálním určení koeficientu 0,8. Který hraje roli pro hraniční tvrdost a tím určení hloubky prokalení. [30]

Z důvodu nepřesnosti měření byla vzata v potaz směrodatná odchylka a přesná hloubka prokalení byla zvolena metodou interpolace.

10.2.1 Metoda HPDD 1

Povrchová tvrdost:

Hodnoty povrchové tvrdosti jsou uvedeny v tabulce č. 6. Povrchová tvrdost byla naměřena na pěti náhodně vybraných místech v oblasti kalení.

Číslo měření	HV5
1	709
2	707,2
3	616,8
4	664,2
5	622,4

Tabulka 6 - Hodnoty povrchové tvrdosti

Průměrná hodnota tvrdosti včetně směrodatné odchylky: $663,92 \pm 39,6$

Určení hodnoty pro zjištění hloubky prokalitelnosti: $HV \times 0,8 = 663,92 \times 0,8 = \underline{531,136 \pm 39,6}$

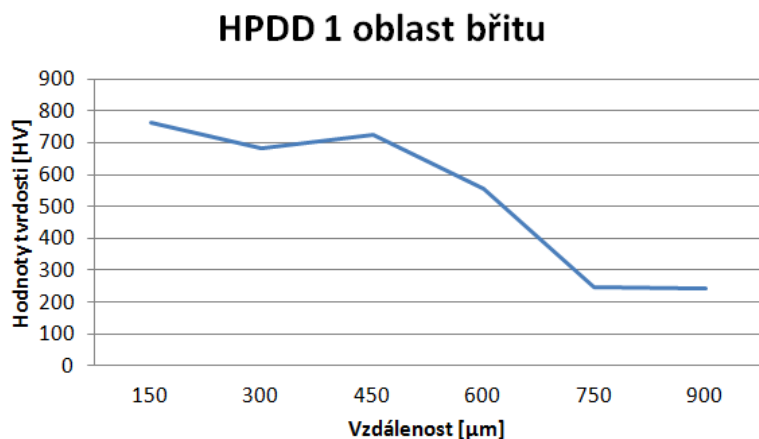
Hodnoty tvrdostí oblast bříty:

Hodnoty naměřené tvrdosti v oblasti bříty jsou uvedeny v tabulce č. 7. Průběh měření tvrdosti je znázorněn na obrázku č. 37.

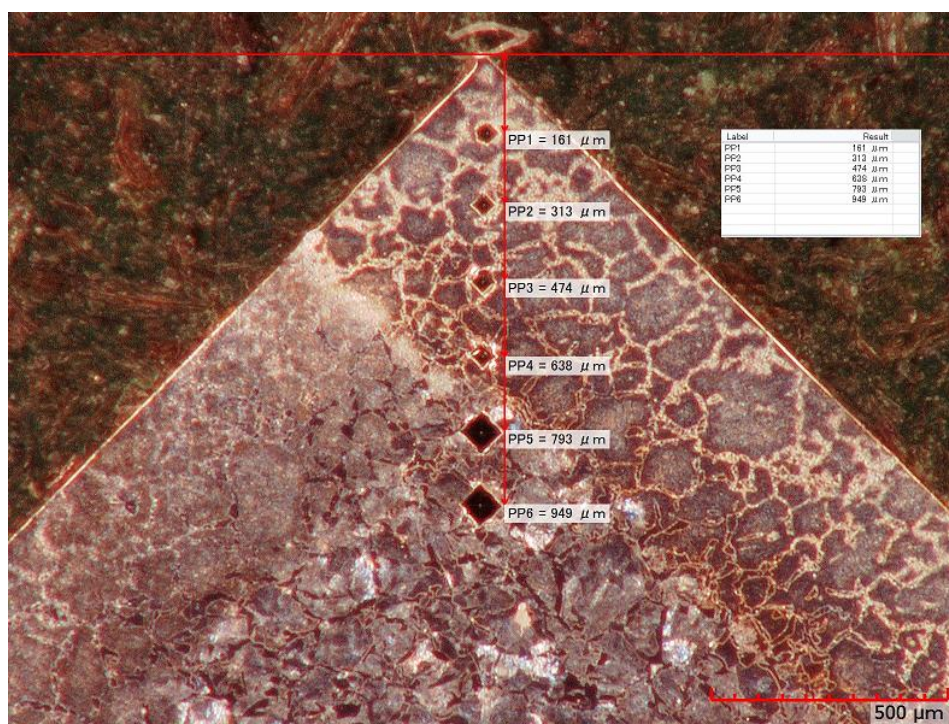
Vzdálenost [μm]	HV1
150	764,5
300	683,1
450	727,1
600	555
750	248,1
950	242,7

Tabulka 7 - Hodnoty tvrdostí v oblasti bříty

Hodnota hloubky prokalení v oblasti bříty pro metodu laserového kalení s pracovním označením HPDD 1 je $611,66 \mu\text{m}$.



Obrázek 36 - Graf průběhu tvrdostí HPDD 1 v oblasti břítu



Obrázek 37 - Průběh tvrdostí v oblasti břítu

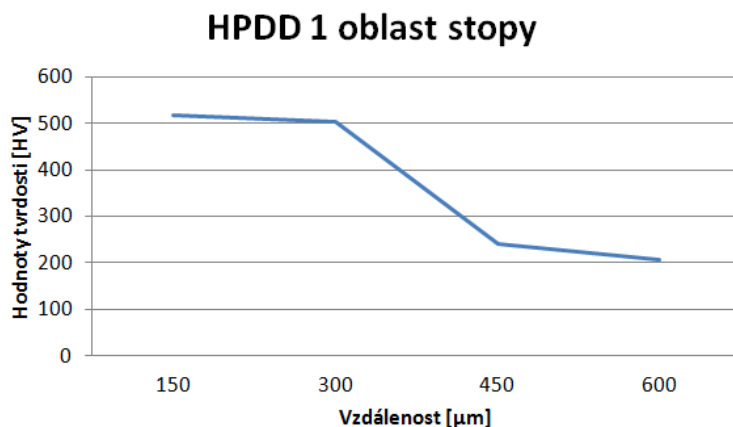
Hodnoty tvrdostí oblast stopy:

Hodnoty tvrdostí v oblasti přes stopu v příčném řezu jsou uvedeny v tabulce č. 8. A zobrazeny na obrázku č. 39.

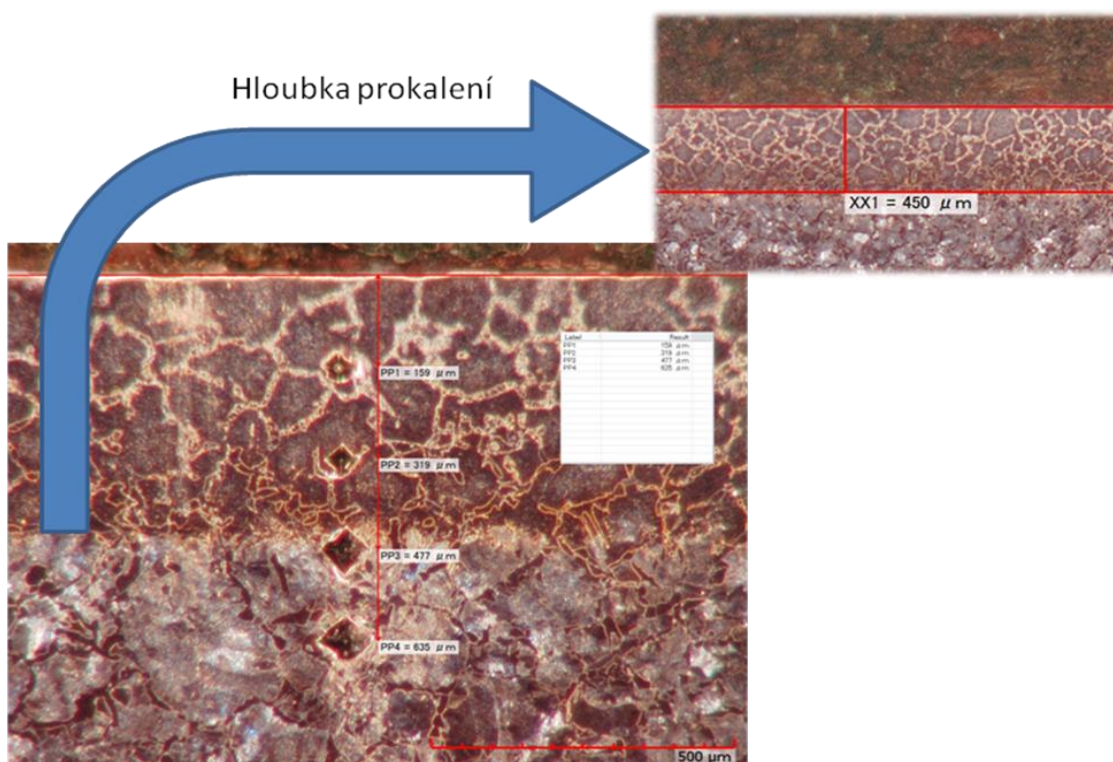
Vzdálenost [μm]	HV1
150	516,8
300	503,2
450	241,3
600	207,8

Tabulka 8 - Hodnoty tvrdostí v oblasti stopy

Hloubka prokalení v oblasti strany přes stopu je 284 μm.



Obrázek 38 - Graf průběhu tvrdosti HPDD 1 v oblast stopy



Obrázek 39 - Průběh tvrdosti v oblasti stopy

10.2.2 Metoda HPDD2

Povrchová tvrdost:

Hodnoty povrchové tvrdosti jsou uvedeny v tabulce č. 9. Povrchová tvrdost byla naměřena na pěti náhodně vybraných místech v oblasti kalení.

Číslo měření	HV5
1	655,3
2	689
3	693,8
4	685,5
5	673,2

Tabulka 9 - Povrchová tvrdost HPDD2

Průměrná hodnota tvrdosti včetně směrodatné odchylky: $679,36 \pm 13,8$

Určení hodnoty pro zjištění hloubky prokalitelnosti: $HV \times 0,8 = 679,36 \times 0,8 = \underline{543,488 \pm 13,8}$

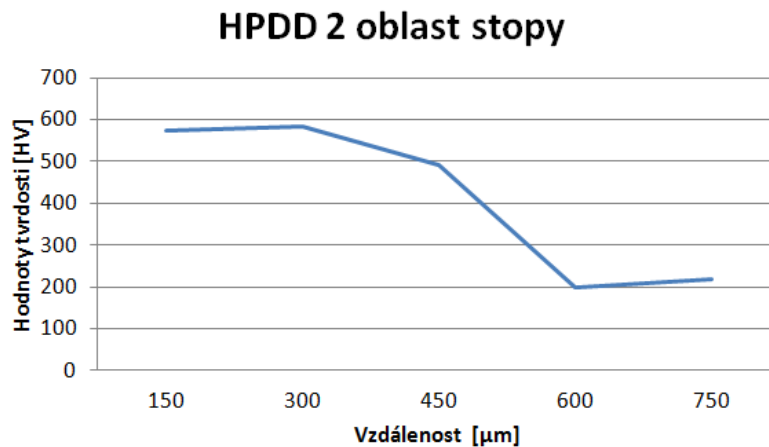
Hodnoty tvrdostí oblast stopy:

Hodnoty tvrdostí v oblasti přes stopu v příčném řezu jsou uvedeny v tabulce č. 10. A zobrazeny na obrázku č. 41.

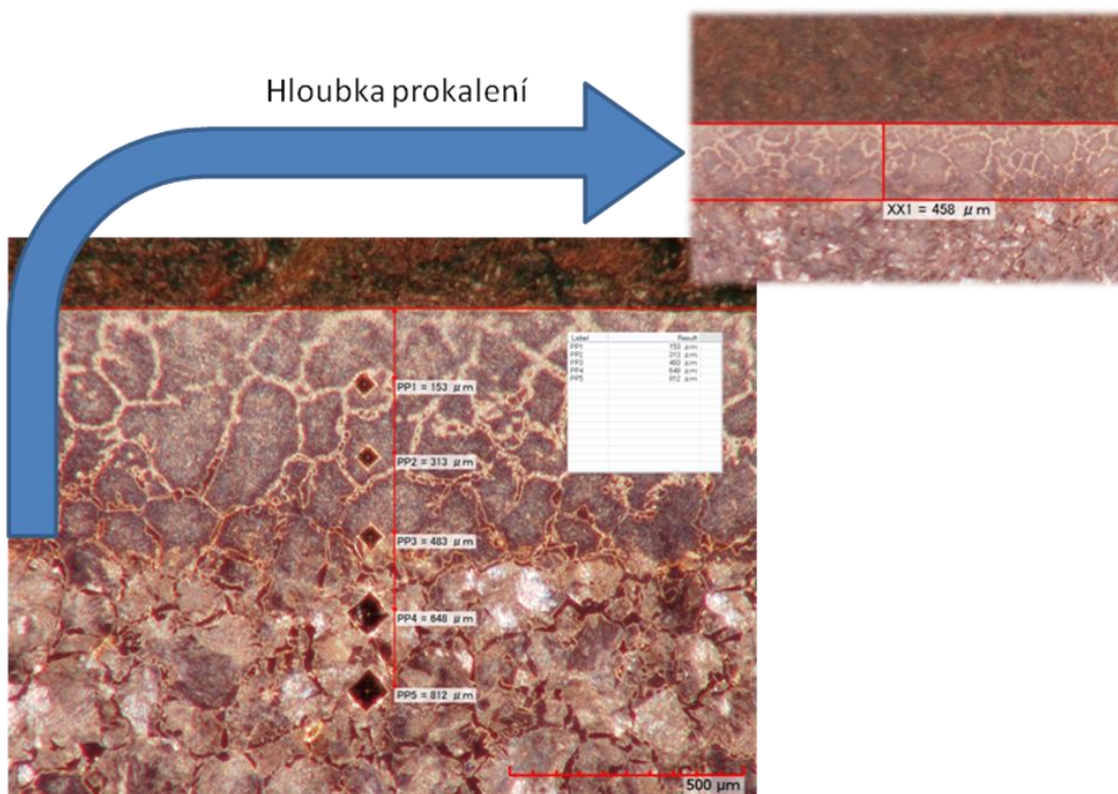
Vzdálenost [μm]	HV1
150	574,7
300	584
450	492,6
600	197,6
750	216,9

Tabulka 10 - Hodnoty tvrdostí v oblasti stopy

Hloubka prokalení v oblasti strany přes stopu je $366 \mu\text{m}$.



Obrázek 40 - Graf průběhu tvrdosti HPDD 2 v oblast stopy



Obrázek 41 - HPDD2 průběh tvrdostí

10.2.3 Metoda SCAN 1

Povrchová tvrdost:

Hodnoty povrchové tvrdosti jsou uvedeny v tabulce č. 11. Povrchová tvrdost byla naměřena na pěti náhodně vybraných místech v oblasti kalení.

Číslo měření	HV5
1	664,2
2	640,1
3	644,4
4	664,7
5	659,1

Tabulka 11 - Hodnoty povrchové tvrdosti SCAN1

Průměrná hodnota tvrdosti včetně směrodatné odchylky: $654,5 \pm 10,3$

Určení hodnoty pro zjištění hloubky prokalitelnosti: $HV \times 0,8 = 654,5 \times 0,8 = \underline{523,6 \pm 10,3}$

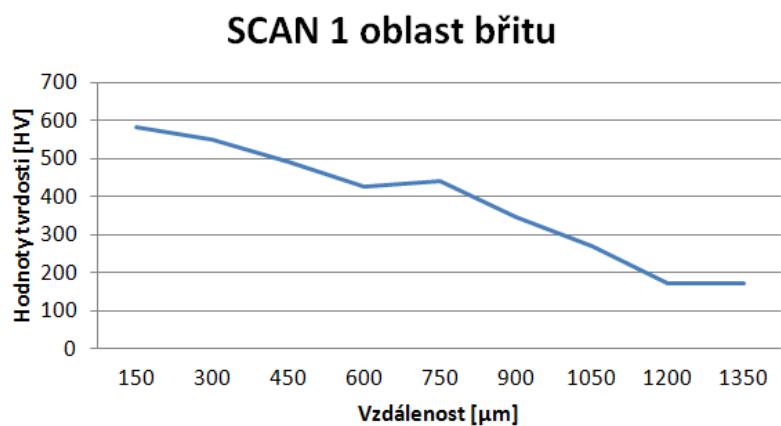
Hodnoty tvrdostí oblast bříty:

Hodnoty naměřené tvrdosti v oblasti bříty jsou uvedeny v tabulce č. 12. Průběh měření tvrdosti je znázorněn na obrázku č. 42.

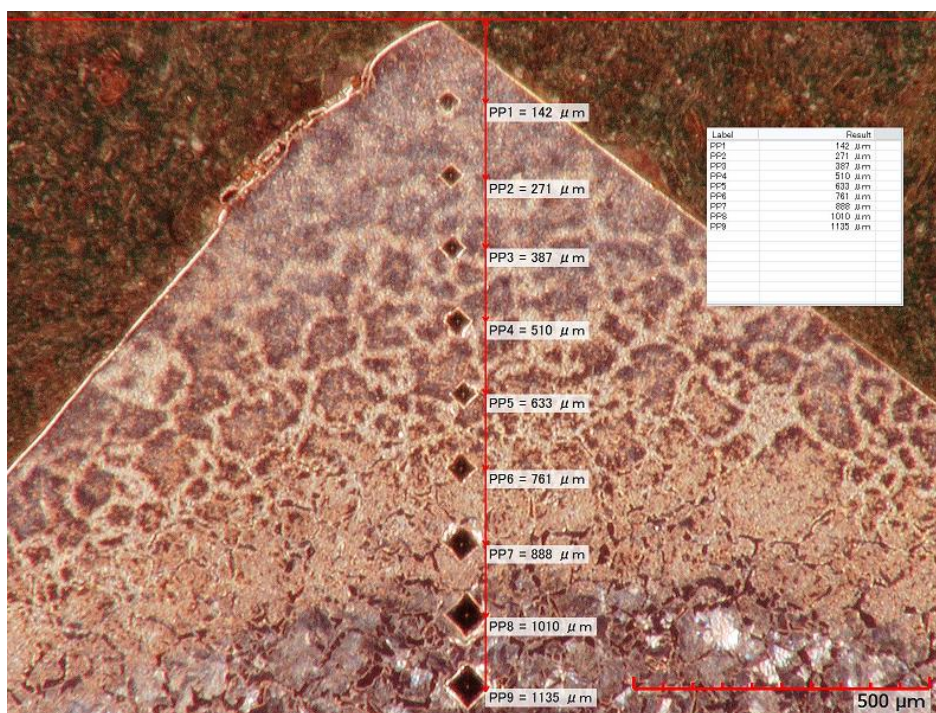
Vzdálenost [μm]	HV1
150	584
300	549,3
450	492,6
600	426,3
750	441,6
900	347
1050	268,8
1200	171,7
1350	170

Tabulka 12 - Hodnoty tvrdosti oblast břitu SCAN 1

Zjištěná hloubka prokalení v oblasti břitu je 368 μm .



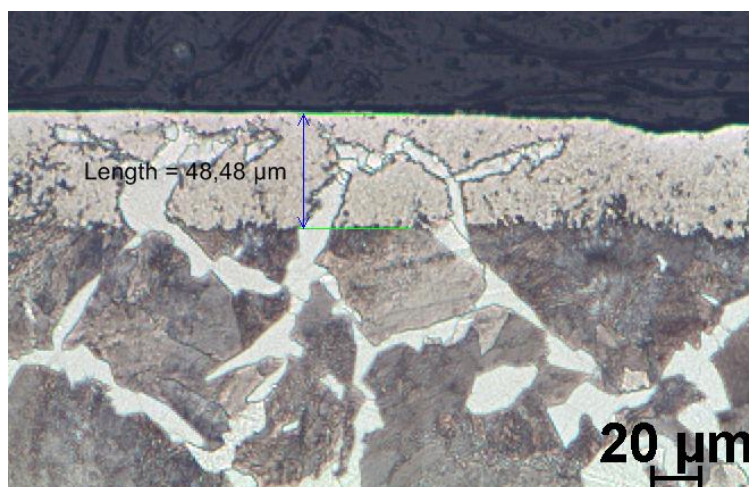
Obrázek 41 - Graf průběhu tvrdosti SCAN 1 v oblasti břitu



Obrázek 42 - SCAN 1 průběh tvrdosti v oblasti špičky

Hodnoty tvrdostí oblast stopy:

Vzhledem k velmi malé stopě této metody kalení nebylo možné určit hloubku prokalení pomocí měření tvrdosti. Na obrázku 43. Je zobrazená přibližná hloubka prokalení, která je přibližně 48,48 μm .



Obrázek 43 - Hloubka prokalení SCAN 1

10.2.4 Metoda SCAN 2

Povrchová tvrdost:

Hodnoty povrchové tvrdosti jsou uvedeny v tabulce č. 13. Povrchová tvrdost byla naměřena na pěti náhodně vybraných místech v oblasti kalení.

Číslo měření	HV5
1	624,4
2	623,4
3	673,8
4	647,1
5	634,8

Tabulka 13 - Hodnoty povrchové tvrdosti SCAN 2

Průměrná hodnota tvrdosti včetně směrodatné odchylky: $640,7 \pm 18,6$

Určení hodnoty pro zjištění hloubky prokalitelnosti: $HV \times 0,8 = 640,7 \times 0,8 = \underline{512,56 \pm 18,6}$

Hodnoty tvrdostí oblast stopy:

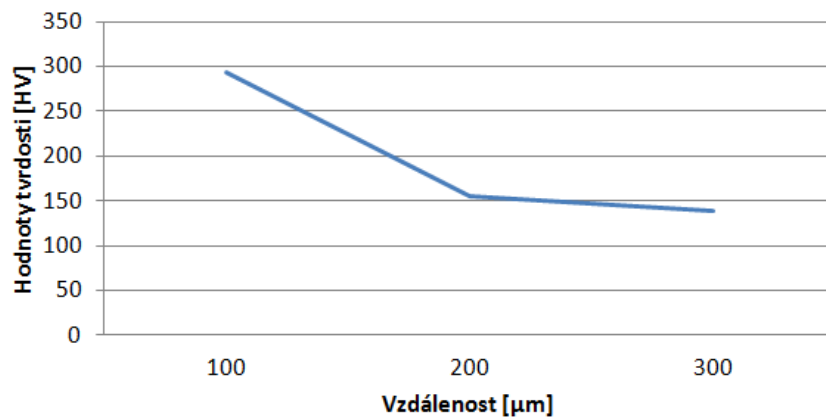
Hodnoty tvrdostí v oblasti přes stopu v příčném řezu jsou uvedeny v tabulce č. 14. A zobrazeny na obrázku č. 45.

Vzdálenost [μm]	HV0,3
100	293,3
200	154,7
300	139,2

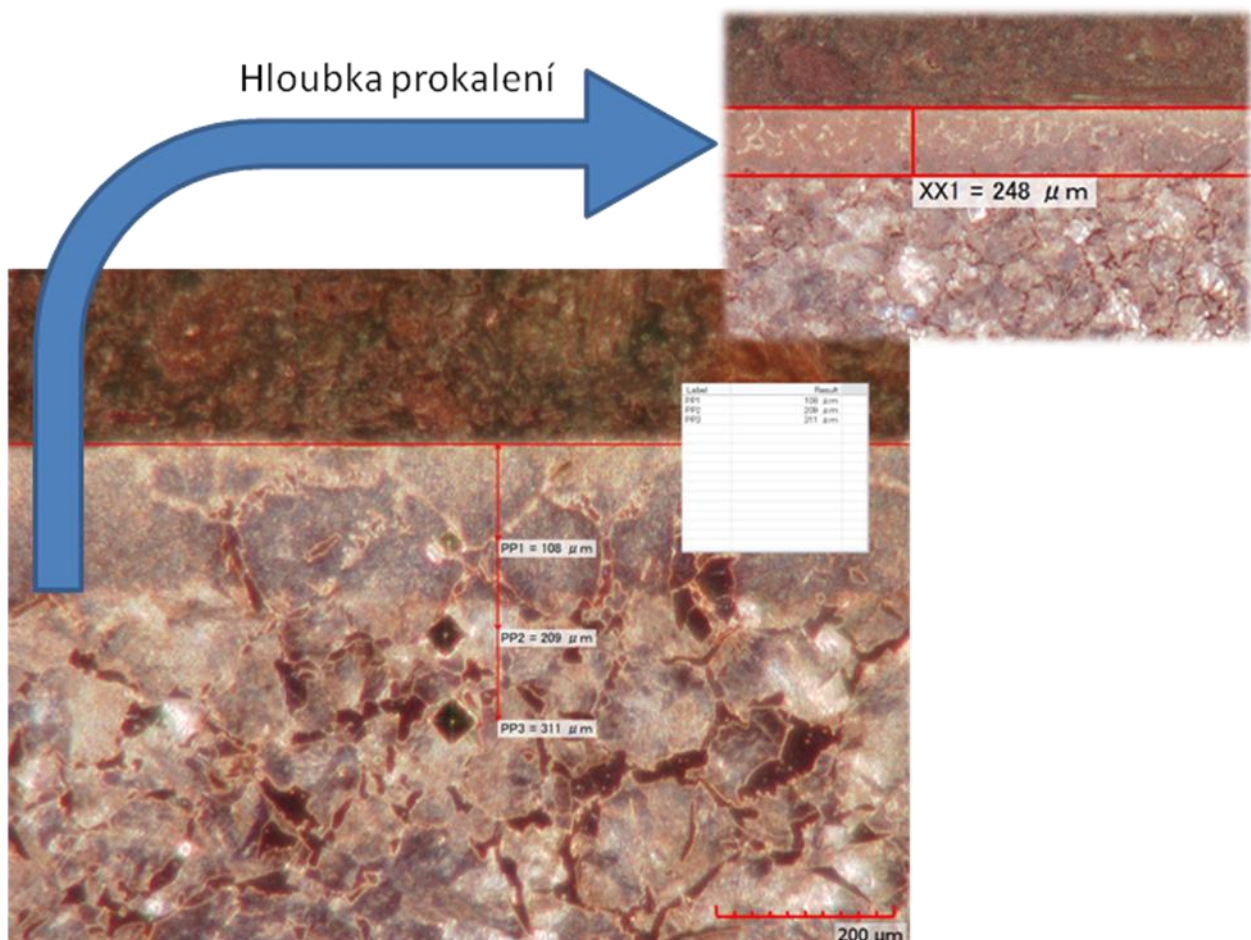
Tabulka 14 - Hodnoty tvrdostí oblast stopy SCAN 2

Vzhledem k nemožnosti měření s menším odstupem, nelze pro tuto metodu stanovit hloubka prokalení. Z rozměru stopy, která byla měřena na digitálním mikroskopu HIROX lze přibližně tuto hodnotu stanovit. Přibližná hloubka prokalení dle obrázku č. 45 je 248 μm .

SCAN 2 oblast stopy



Obrázek 44 - Graf průběhu tvrdosti v oblasti stopy



Obrázek 45 - Průběh tvrdosti pro SCAN 2

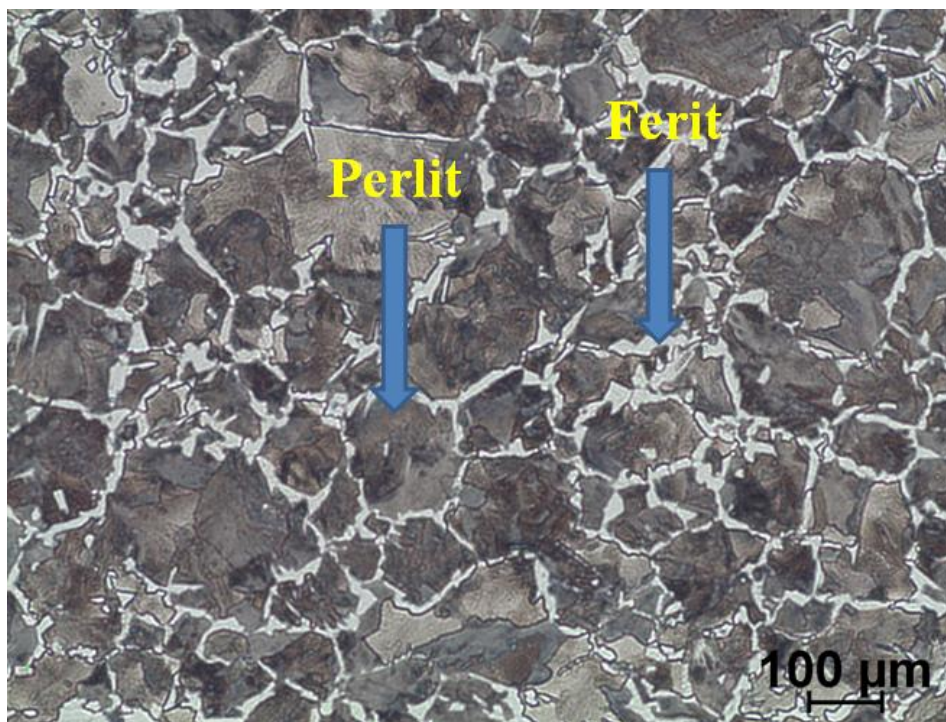
Z měření hloubky prokalitelnosti plyne, že u standardního kalení (HPDD 1 a 2) je podstatně vyšší prokalitelnost než je tomu u skenovacího laserového kalení (SCAN 1 a 2). A to jak v oblasti stopy tak i v oblasti bříty.

10.3. Porovnání mikrostruktur

Snímky mikrostruktury byly pořízeny na mikroskopu Nikon Epiphot 200 se zvětšením 5x, 10x a 20x. Pro popsání a vyhodnocení mikrostruktury byly zvoleny snímky zachycující přechodovou a zakalenou oblast. V přechodové oblasti byla pozorovatelná struktura základního materiálu a struktura zakalené oblasti.

10.3.1 Mikrostruktura základního materiálu

Na obrázku 46 je mikrostruktura základního materiálu, která je tvořena feriticko - perlitickou strukturou. Světlá zrna jsou ferit síťový a tmavá zrna jsou lamelární perlit.

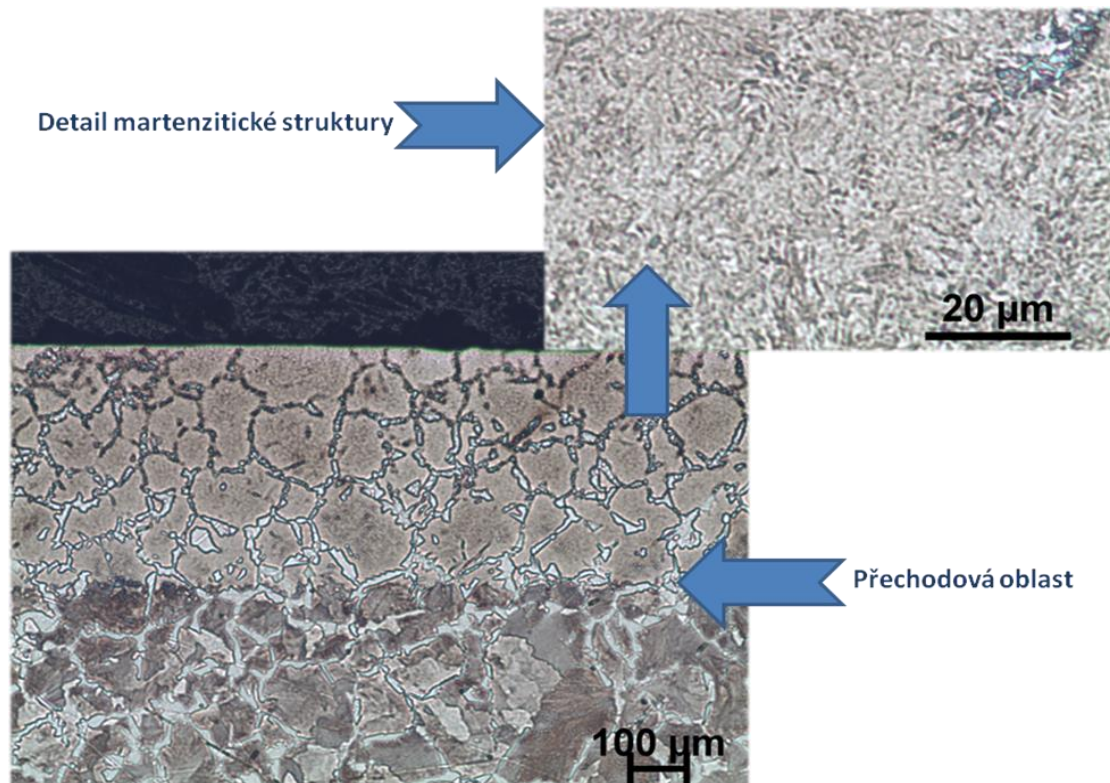


Obrázek 46 - Mikrostruktura základního materiálu

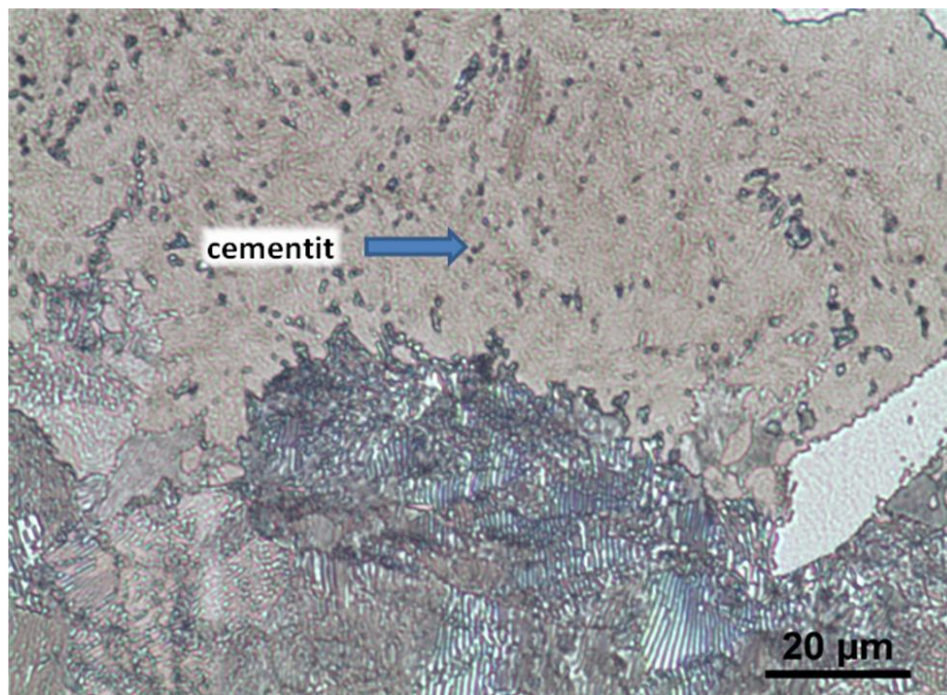
10.3.2 Mikrostruktura metody HPDD 1

Mikrostruktura metody HPDD 1 je vyobrazena na obrázku č. 47. V kalené oblasti jsou pozorovatelné nepřetržitě transformovaný síťový ferit a jemná martenzitická struktura. Zrna síťového feritu se nestačila přetransformovat, tudíž nedošlo k úplné austenitizaci. Nejspíš z důvodu rychlého ochlazení a krátké prodlevě na kalicí teplotě. Na detailu martenzitické struktury jsou viditelné velmi jemné martenzitické jehlice.

Na obrázku č. 48 je pozorovatelný cementit. Perlit je směs feritu a cementitu. Při zakalení se nejdříve rozpouští ferit a pak teprve cementit. Poslední zůstávají částičky cementitu.

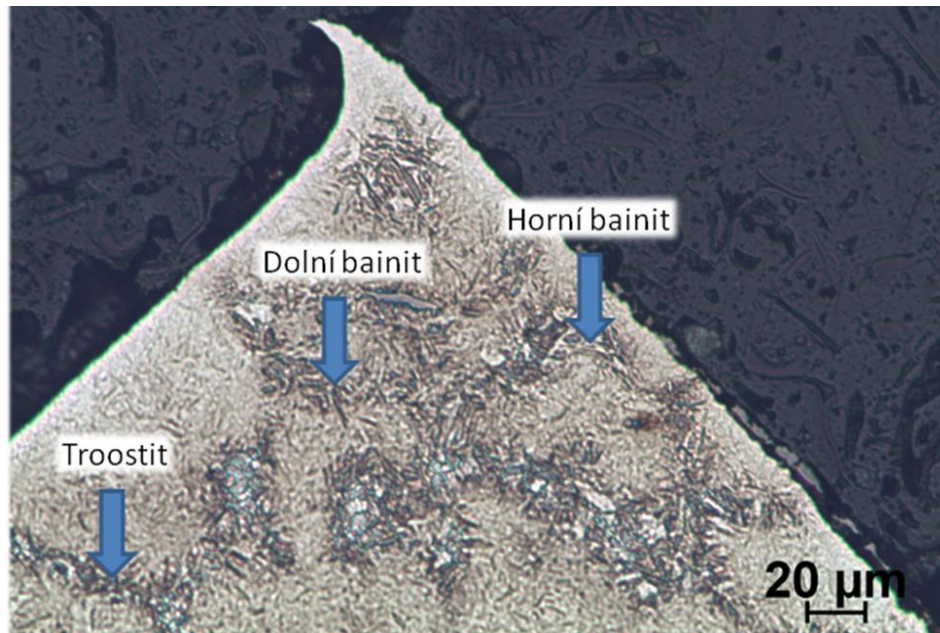


Obrázek 47 - HPDD 1 přechodová oblast zvětšení 5x a zakalená oblast zvětšení 50x



Obrázek 48 - HPDD1 přechodová oblast detail 200x

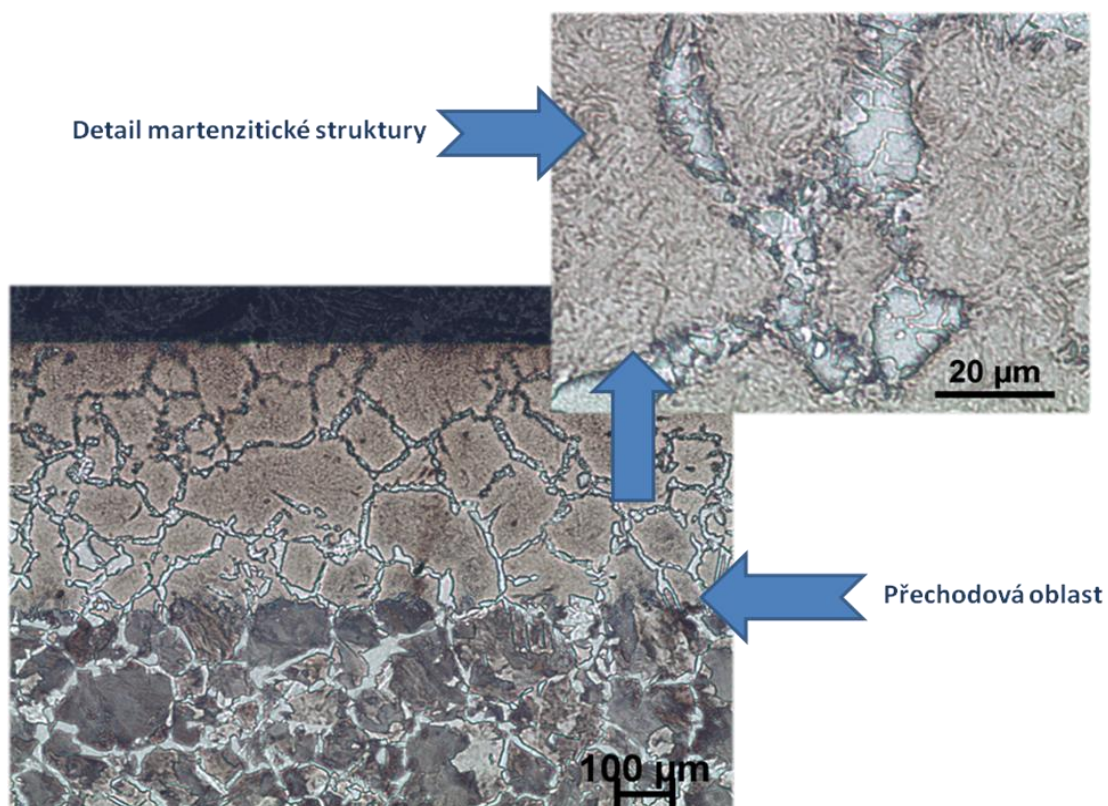
Na obrázku č. 49 je mikrostruktura postupu HPDD 1 v oblasti břitu. Tmavší oblasti jsou pravděpodobně baintické a místy nejtmaší oblasti troostitu. Po hranicích původního austenitického zrna se vylučuje horní bainit.



Obrázek 49 - HPDD 1 mikrostruktura oblast bříty zvětšení 200x

10.3.3 Mikrostruktura metody HPDD 2

Mikrostruktura metody HPDD 2 je vyobrazena na obrázku č. 50. Popis je obdobný jako u metody HPDD 1. V detailu je pozorovatelný nepřetržitý nepřetransformovaný ferit. Zapříčiněno tím, že nedošlo k úplné austenitizaci.

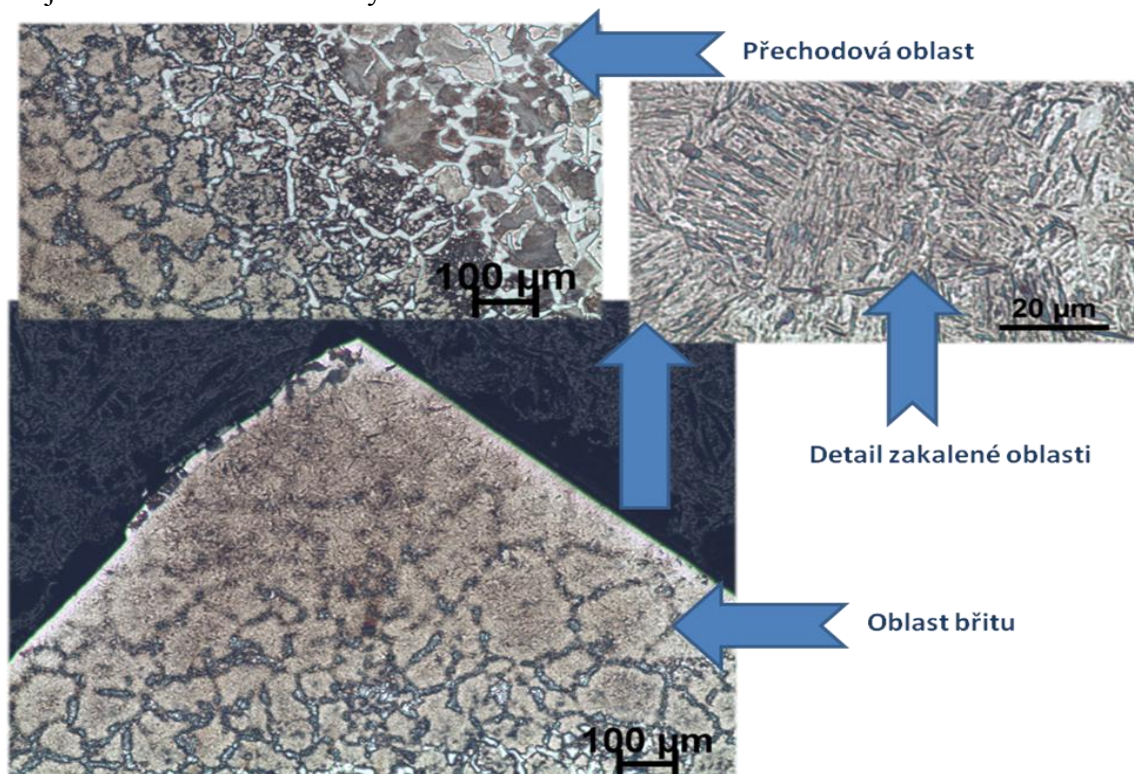


Obrázek 50 - HPDD 2 přechodová oblast zvětšení 5x a zakalená oblast zvětšení 50x

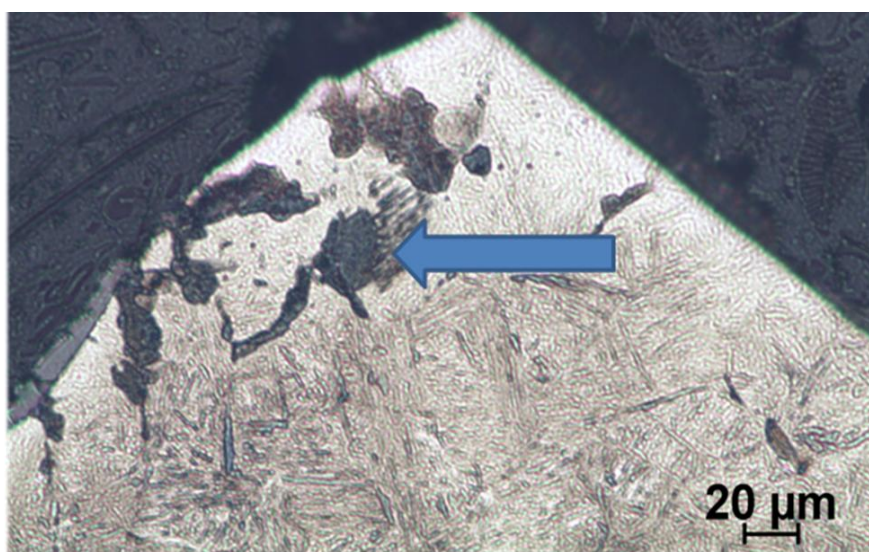
10.3.4 Mikrostruktura metody SCAN 1

Z obrázku č. 51 je pozorovatelné, že v oblasti břitu došlo k úplné austenitizaci (v Fe3C se pohybujeme nad křivkou A3) a tím byl veškerý ferit transformován na martenziticou (případně bainitickou) strukturu.

Vysvětlení: při kalení a pro docílení úplné austenitizace hraje roli teplota ohřevu a doba tohoto ohřevu. Zde byl zakalen vyšší objem materiálu tím došlo pomaleji k odvodu tepla a k vyšší výdrží na této teplotě než je tomu u HPDD 1 a 2. To má za příčinu i vytvoření hrubější martenziticke struktury než u HPDD 1 a 2.

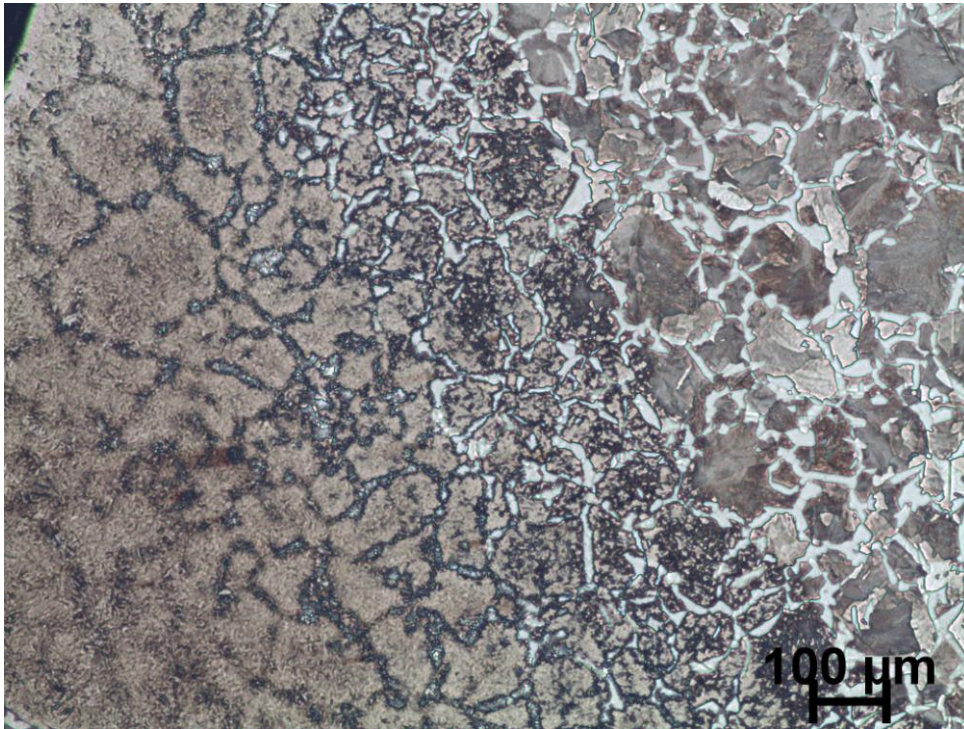


Obrázek 51 - SCAN 1 Oblast břitu zvětšení 5x a zakalená oblast zvětšení 50x



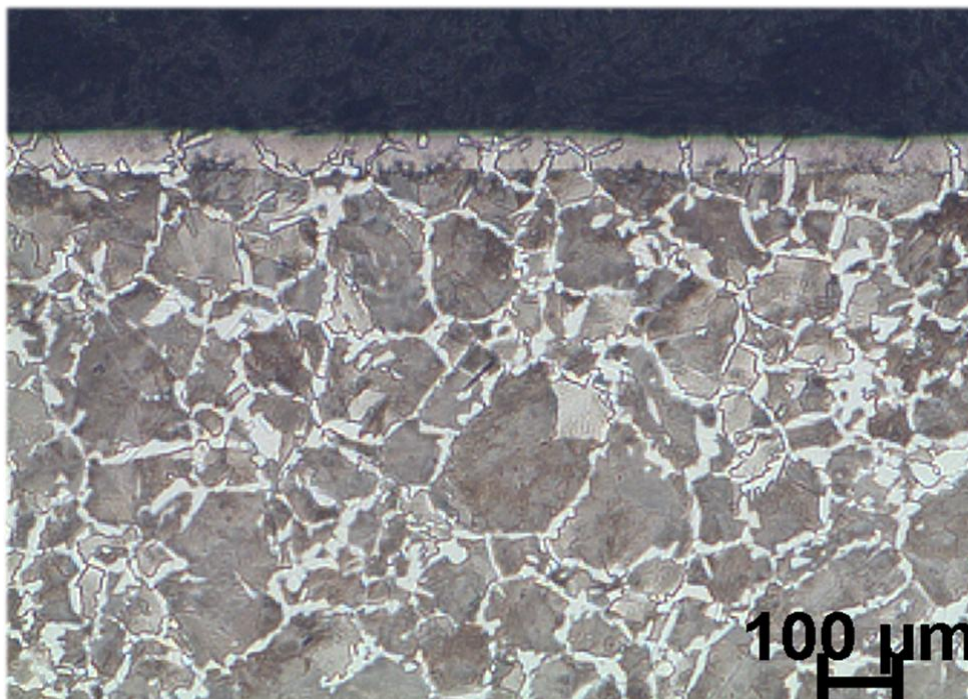
Obrázek 42 - SCAN 1 detail špičky perlit zvětšení 200x

Na obrázku č. 52 došlo v místě označené šipkou došlo pravděpodobně k oduhličení a tím k tvorbě perlitu v této oblasti.



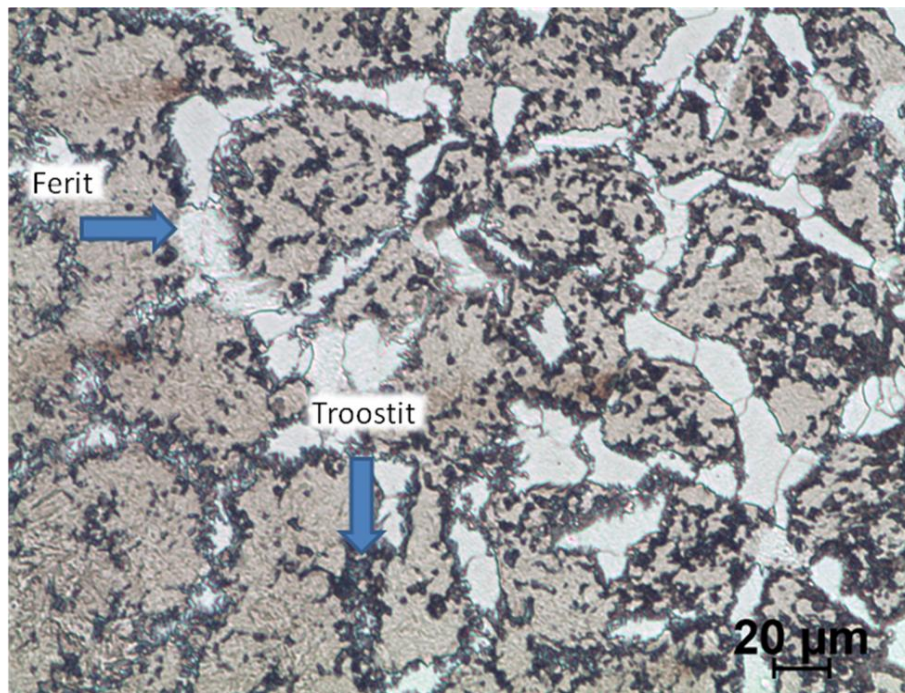
Obrázek 53 - SCAN 1 přechodová oblast zvětšení 50x

Na obrázku č. 53 je krásně zobrazená přechodová oblast zakalené oblasti a základního materiálu. Více doleva docházelo k úplné austenitizaci a směrem doprava, kde se teplo rychleji odvádělo do ZM už k ní nedošlo proto je pozorovatelný nepřetransformovaný ferit.



Obrázek 54 - SCAN 1 Zakalený povrch zvětšení 50x

Na obrázku č. 54 je pozorovatelné, že nedošlo k úplné austenitizaci (V Fe₃C se nepohybujeme nad křivkou A3) dokazuje to napojený feritu od základního materiálu do zakalené oblasti.

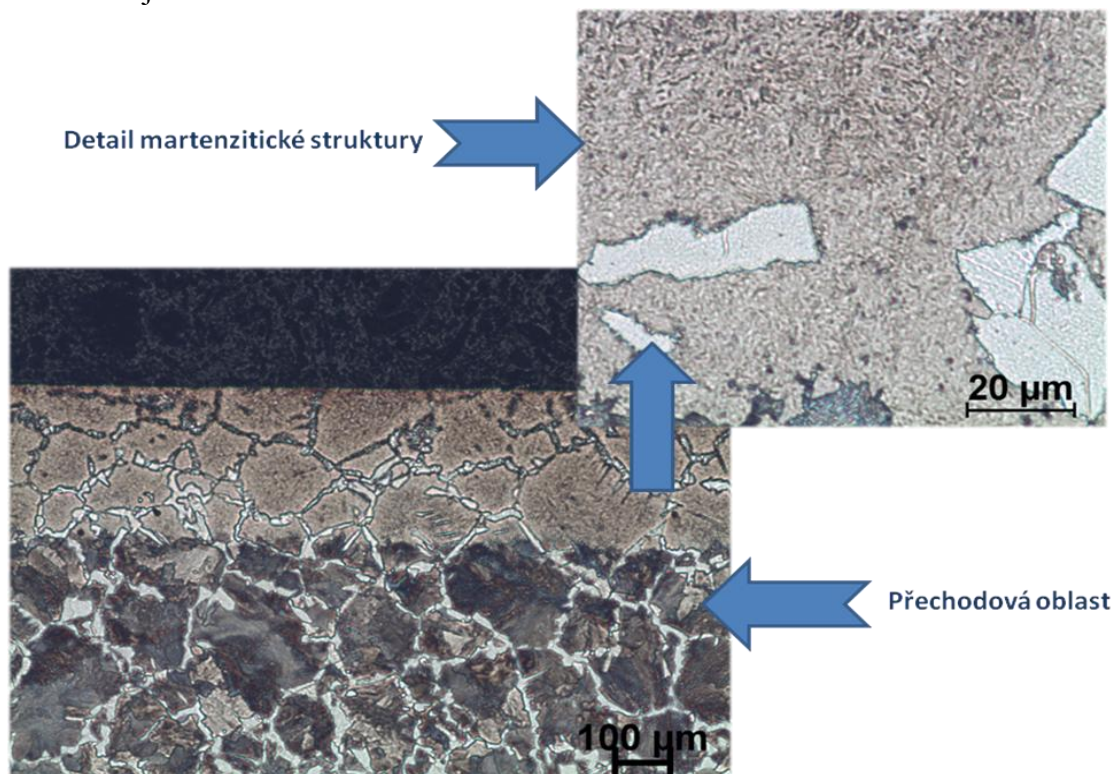


Obrázek 55 - SCAN 1 detail přechodové oblasti zvětšení 200x

Na detailu obrázek č. 55 je dobře pozorovatelný troostit a nepřetransformovaný ferit.

10.3.4 Mikrostruktura metody SCAN 2

Mikrostruktura metody SCAN 2 je znázorněna na obrázku č. 56. Na první pohled je patrný nepřetransformovaný ferit v zakalené oblasti a v detailu martenzitické struktury hrubší martenzitické jehlice.



Obrázek 56 - SCAN 2 přechodová oblast zvětšení 5x a zakalená oblast zvětšení 50x

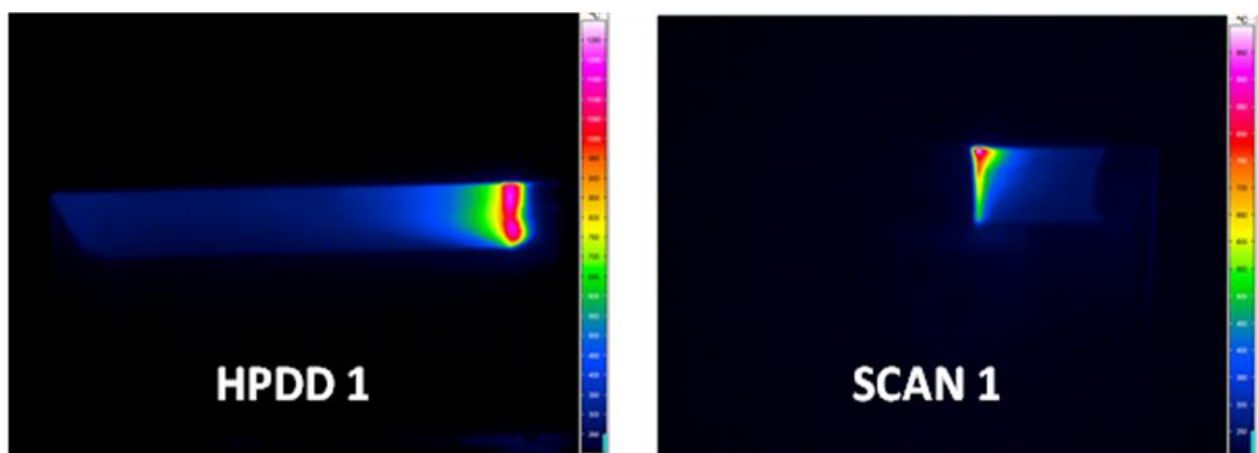
Na první pohled je patrné, že při standardním laserovém kalení vzniká jemnější martenzitická struktura než je tomu u skenovacího laserového kalení. Naproti tomu u standardního laserového kalení jsou pozorovatelné zrna feritu, která se při kalení nestihla transformovat. U skenovacího laserového kalení, konkrétně metody SCAN 1 je pozorovatelné, že došlo k velkému ohřevu velkého objemu materiálu v oblasti špičky. To mělo za následek, že při kalení došlo k úplné austenitizaci a tím byl veškerý ferit transformován na martenzit nebo bainit v oblasti špičky. To mohlo mít i za následek vznik objemnějších martenzitických jehlic.

10.4. Teplotní průběh

Teplotní průběh byl hodnocen ze záznamu termokamery. Termokamera znázorňuje rozložení teploty při procesu kalení.

Z obrázku 57 je patrné, že u standardního laserového kalení je teplotní rozložení rovnoměrné po celé ploše. Naproti tomu u skenovacího laserového kalení je větší teplota soustředěna do oblasti špičky.

Oba snímky byly pořízeny ve stejný časový okamžik a to z důvodu vlivu chladnutí a předehřevu.



Obrázek 57 - Teplotní rozložení při standardním kalení (HPDD 1) a skenovacím (SCAN 1)

Z údajů termokamery lze zjistit přibližnou teplotu kalení. Tato teplota je pouze orientační a není přesná. Pro standardní laserové kalení je přibližná teplota 1250 °C a pro skenovací byla naměřená přibližná teplota 1000 °C

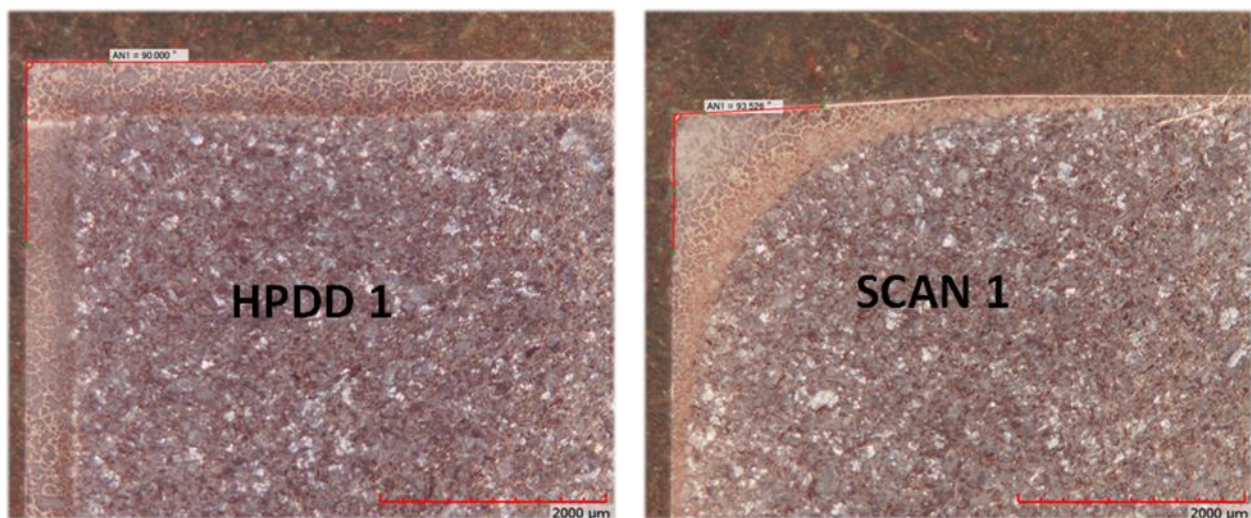
11. Diskuze výsledků

Vzorek z materiálu ČSN 12050 (uhlíková ocel vhodná k zušlechťování a povrchovému kalení) byl zvolen z důvodu vhodnosti ke kalení. Obsahuje 0,45-0,50% uhlíku což je množství uhlíku v oceli právě pro kalení ideální. [29]

Porovnání dvou metod (postupů) laserového povrchového kalení, které jsou popsány v kapitole 3. Návrh experimentu vycházel z geometrie bříty, rovnosti hran, hloubky prokalitelnosti, porovnání mikrostruktur a údajů z termokamery.

Z hlediska geometrie bylo patrné, že u skenovacího laserového kalení dochází k výraznějším deformacím. K této výrazné deformaci došlo u metody SCAN 1. Toto porovnání je zobrazeno na obrázku č. 58. K této deformaci pravděpodobně došlo vlivem k dlouhodobému působení vysoké teploty v oblasti bříty. Z mikrostruktury je potvrzeno, že v oblasti bříty došlo k dlouhodobému působení teploty. Dokazuje to úplná austenitizace v této

oblasti a v místě bříty je pravděpodobně pozorovatelné oduhličení a tím tvorba perlitu. U standardního laserového kalení byla hodnota úhlu 90° a u skenovacího $93,526^\circ$. Rozdíl úhlu činí $3,526^\circ$ což už je velmi značná deformace.



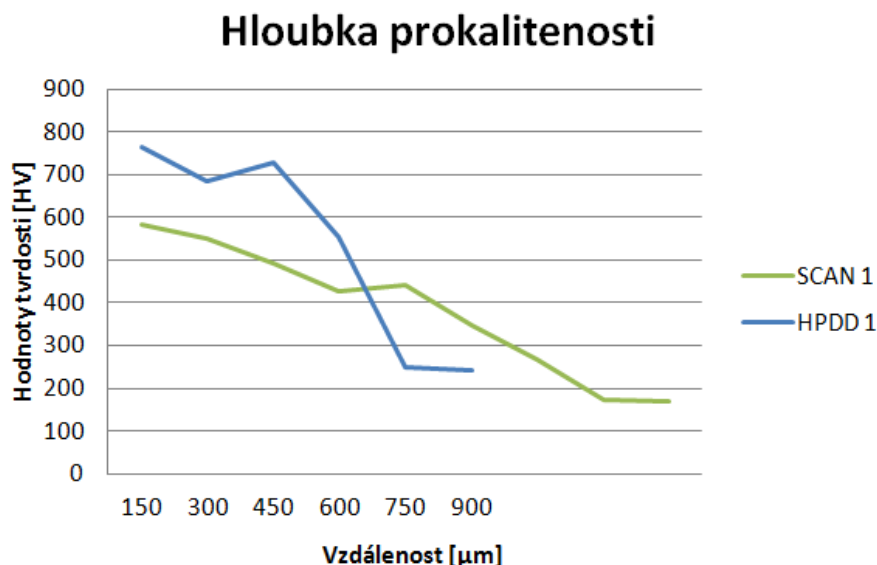
Obrázek 58 - Porovnání úhlu bříty

Hodnocení z hlediska hloubky prokalení proběhlo pomocí měření tvrdosti a výpočtu a určení hloubky prokalení. Tabulka č. 15 porovnává zjištěné hloubky prokalení jednotlivých metod.

	HPDD	SCAN
Oblast bříty	611,66 μm	368 μm
Oblast stopy	366 μm	48,5 μm
	368 μm	248 μm

Tabulka 15 - Porovnání hloubek prokalení

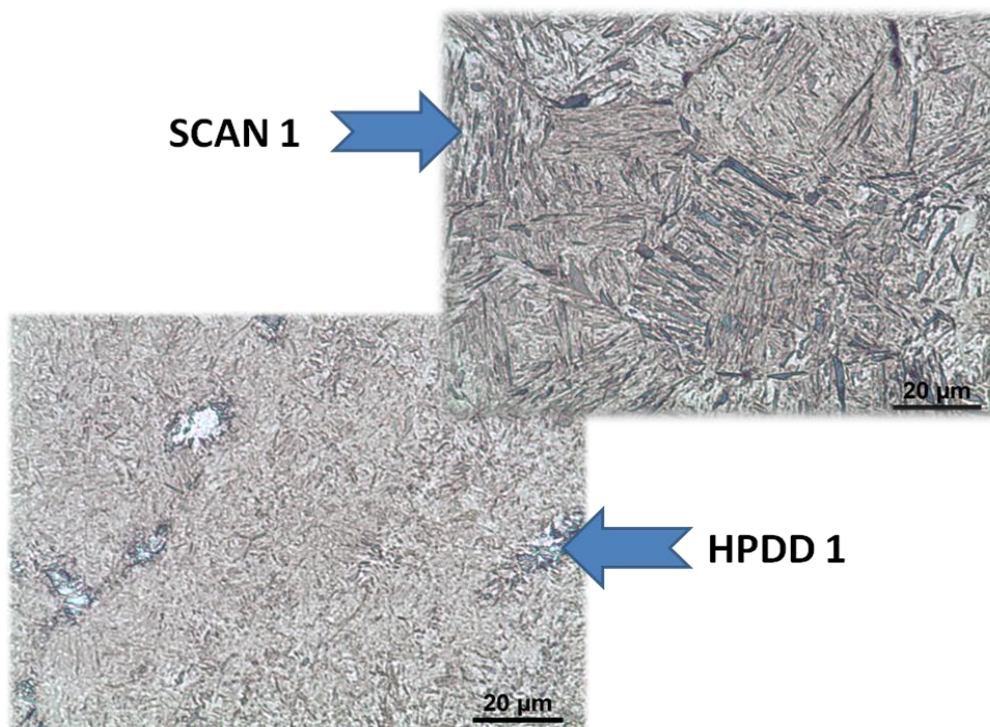
Z tabulky č. 15 hloubek prokalitelnosti je patrné, že u standardního laserového kalení bylo dosaženo vyšší hloubky prokalení než u skenovacího laserového kalení a to jak v oblasti stop tak i v oblasti bříty. Na obrázku grafu č. 59 je porovnání prokalitelnosti v oblasti bříty. Z tohoto grafu je také patrné, že u standardního laserového kalení byla získána vyšší tvrdost a tím i vyšší hloubka prokalení, což je v souladu s předchozími zjištěními [26,28].



Obrázek 59 - Porovnání hloubek prokalení

Z porovnání mikrostruktury bylo zjištěno, že u standardního laserového kalení bylo docíleno jemnější martenzitické struktury. Toto porovnání je viditelné na obrázku č. 59. U standardního laserového kalení jsou patrné jemnější martenzitické jehlice. Naproti tomu u skenovacího laserového kalení a to v oblasti břitu došlo téměř k úplné transformaci feritu. U standardního laserového kalení jsou patrné v mikrostruktuře kalené oblasti nepřetransformovaná feritická zrna. V kapitole 5.3.4 u skenovací metody kalení (SCAN 1) je uvedeno a poukázáno na zakalení většího objemu materiálu a tím i poukázáno na pomalejší odvod tepla než je tomu u standardního laserového kalení. To může být příčinou lepšího přetransformování feritických zrn v oblasti břitu a i větší velikost martenzitických jehlic.

K podobným zjištěním se došlo v předchozích bakalářských a diplomových prací. [4]



Obrázek 59 - porovnání zakalené oblasti

Rozdíl v průběhu teplot a objemu kaleného materiálu byl potvrzen záznamem termokamery. Tento záznam byl pořízen v jeden časový okamžik a to s ohledem na rychlost chladnutí. Při standardním laserovém kalení bylo rozložení teploty podstatně rovnoměrnější, zatímco při skenovacím laserovém kalení byla teplota soustředěna na oblast břítu (viz obr. 59), což mohlo způsobit úplnou austenitizaci v oblasti břítu a malé prokalení v oblasti stopy.

12. Závěr

Hlavním cílem práce bylo porovnat dvě metody kalení a to standardní laserové kalení a skenovací laserové kalení. Hlavními sledovanými charakteristikami, definujícími vhodnost metod kalení v oblasti ostré hrany, byly míra deformace, mikrostruktura a tvrdost. Kalení bylo provedeno na vzorku z materiálu ocel ČSN 12050.

Měření geometrických tvarů zakalené oblasti prokázalo menší deformaci při aplikaci standardního laserového kalení. Také tloušťka prokalené vrstvy je při standardním laserovém kalení vyšší než při použití skenovacího laserového kalení. Nejhorších parametrů z hlediska geometrie jsme docílili na vzorku s pracovním označením SCAN1, kde je na první pohled pozorovatelná značná deformace v oblasti špičky, kde patrně při kalení docházelo i k jejímu natavení.

Z hlediska mikrostruktury lze říci, že lepších výsledků, tzn. jemnější mikrostruktury, a větší hloubky prokalení, bylo dosaženo při použití standardního laserového kalení. Jemnější struktura má lepší mechanické vlastnosti i lepší životnost.

U vzorku s pracovním označením SCAN2 nedošlo vůbec k zakalení špičky. Patrně byly chybně zvoleny parametry a mezera v místě hrany byla vysoká.

Za podmínek, které byly zvoleny při experimentu, se jeví standardní metoda kalení jako vhodnější, a to i za cenu místa překryvu stop.

Nicméně potenciál skenovací metody laserového povrchového kalení nebyl při návrhu experimentu zcela vyčerpán. Pokud by se použila jiná strategie pohybu laserového paprsku, je možnost výrazného zlepšení dosažených výsledků v porovnání se zde realizovaným experimentem.

13. Seznam použité literatury

KNIŽNÍ PUBLIKACE

- [1] ION, J. C. *Laser procesing of engineering materials*. Oxford: Butterworth – Heinemann, 2005.
- [2] J. SKÁLOVÁ, R. KOVAŘÍK, V. BENEDIKT - *Základní zkoušky kovových materiálů*. Plzeň: ZČU, 2005.
- [3] H. MARTIN. *Povrchové kalení ocelí vláknovým YBYAG laserem*. Brno: VUT, 2013.
- [4] Z. ČERNÝ. *Využití laseru při povrchovém zpracování*. Plzeň: ZČU,

PUBLIKACE NA INTERNETU

- [5] *Základy tepelného zpracování kovů*.
http://jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm
- [6] *Kalení a popouštění*.
<http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep07.pdf>
- [7] WIKIPEDIE. *Popouštění*
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Popou%C5%A1t%C4%9Bn%C3%AD>
- [8] <http://laser.zcu.cz/galerie/displayimage.php?album=8&pos=2>
- [9] <http://www.industrial-laser-systems.fr/images/stories/thermal12.jpg>
- [10] <http://www.laserfest.org/lasers/how/ruby.cfm>
- [11] *Princip laseru*
<http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [12] *Seriál na téma lasery*
<http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---uvod-126>
- [13] *Lasery a jejich princip*
http://www.lt.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=161&Itemid=164&limit=1&limitstart=1
- [14] <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [15] http://www.laserline.de/diode_laser/high_power_diode_lasers_direct_diode_lasers.html
- [16] http://www.scientificmaterials.com/products/nd-yag_yttrium_aluminum_garnet.php
- [17] http://www.priniotakis.gr/catalog2/manuals/Labotom-3_brochure_English.pdf
- [18] http://vastek.co.kr/down/3_6/2/Struers/mounting_press-2.pdf
- [19] http://www.struers.com/resources/elements/12/285274/LaboPol_brochure_English.pdf
- [20] http://www.artisanng.com/info/PDF__4E696B6F6E5F45706970686F745F3230305F446174617368656574.pdf
- [21] <http://exphys.science.upjs.sk/?q=sk/vyskum/optscopen>
- [22] <http://www.termokamera-infratec.cz/infratec-variocamhd/>

[23] https://cs.wikipedia.org/wiki/Zkou%C5%A1ka_tvrlosti_podle_Brinella

[24] https://cs.wikipedia.org/wiki/Zkou%C5%A1ka_tvrlosti_podle_Vickerse

[25] <http://www.converter.cz/jednotky/tvrlost-rockwell.htm>

ČLÁNKY V ČASOPISECH, VE SBORNÍCÍCH KONFERENCÍ APOD.

[26] M. HRUŠKA, M. VOSTŘÁK, E. SMAZALOVÁ, M. ŠVANTNER. *Standart and scanning laser hardening procedure*, Brno: Metal 2013.

[27] Seznam přístrojů - Nové technologie výzkumné centrum NTC

[28] J. D. KIM, M. H. LEE, S. J. LEE, W. J. KANG. *Laser transformation hardening on rod-shaped carbon steel by Gaussian beam*, China: Metals Society of China 2009.

PATENTOVÉ DOKUMENTY: AUTORSKÁ OSVĚDČENÍ, UŽITNÉ VZORY NEBO OSVĚDČENÍ K NIM, ZVEŘEJNĚNÉ PŘIHLÁŠKY, APOD.

[29] Norma oceli ČSN 12050 *Česká státní norma*

[30] Norma učení hloubky prokalení ČSN EN 10328 *Česká státní norma*