

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Sledování opotřebení a dynamického rázového kontaktního namáhání
laserem povrchově kalených ocelí

Autor: **Lukáš FIEDLER**

Vedoucí práce: **Doc. Dr. Ing. Antonín KRÍŽ**

Akademický rok 2011/2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš FIEDLER**
Osobní číslo: **S09B0260P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**
Název tématu: **Sledování opotřebení a dynam. rázového kontaktního namáhání laserem povrchově kalených ocelí**
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. Tepelné zpracování ocelí
2. Popis technologie laserového povrchového kalení a indukčního povrchového kalení
3. Tribologická zkouška "PIN-on-DISK" na experimentálních materiálech
4. Vyhodnocení tribologické zkoušky
5. Závěr

Rozsah grafických prací: fotodokumentace, obrázky

Rozsah pracovní zprávy: 30-40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- Totten, G. E., Steel heat treatment, Taylor&Francis Group, Portland State University, 2007
- Kříž, A., Povrchové kalení v průmyslové aplikaci
- <http://www.ateam.zcu.cz>
- ASM Handbook, Volume 4 - Heat Treating, ASM International 2002
- materiálový list ČSN 41 9520
- materiálový list ČSN 41 9573
- materiálový list ČSN 41 6343
- Hájek, J., Kříž, A., Tribologická analýza PIN-on-DISC, Metal 2005, Hradec nad Moravicí 2005
- Klufová, P., Návrh technologie laserového povrchového zpracování konstrukčních ocelí, ZČU v Plzni, 2010

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Dr. Ing. Antonín Kříž

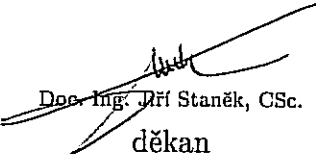
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant bakalářské práce: Ing. Pavla Klufová

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání bakalářské práce: 19. září 2011

Termín odevzdání bakalářské práce: 25. května 2012


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.

děkan




Prof. Ing. Václav Mentl, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 19. září 2011

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

ANOVAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Fiedler	Jméno Lukáš	
STUDIJNÍ OBOR	Strojní inženýrství		
VEDOUČÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Dr. Ing. Kříž	Jméno Antonín	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Sledování opotřebení a dynamického rázového kontaktního namáhání laserem povrchově kalených ocelí		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2012
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	83	TEXTOVÁ ČÁST	83	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí, teoretické a experimentální. Teoretická část se zabývá obecným tepelným zpracováním ocelí, technologií povrchového kalení a to především technologií indukčního povrchového kalení a laserového povrchového kalení. Experimentální část zkoumá velikost opotřebení povrchu povrchově kalených ocelí vybranými zkouškami. Dále se snaží vystihnout závislost opotřebení povrchu na tepelném zpracování základního materiálu před povrchovým kalením.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>Laserové povrchové kalení, Indukční povrchové kalení, Opotřebení, Impact test, Tribologický test PIN-on-DISC</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Fiedler	Name Lukáš	
FIELD OF STUDY	Mechanical Engineering		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Dr. Ing. Kříž	Name Antonín	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	An observation on laser surface hardened steels - wear and dynamical contact stress characteristics		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2012
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	83	TEXT PART	83	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The bachelor's thesis is divided into two parts – theoretical and experimental. The theoretical part is focused on common ways of heat treatment and the vast majority is devoted to laser surface hardening technology and induction hardening technology. Firstly, the experimental part evaluates a volume wear of surface hardened steels. Secondly, it makes a description of a surface wear influential in heat treatment of basic material before surface hardening process.
KEY WORDS	Laser surface hardening, Induction surface hardening, Wear, Impact test, Tribological test PIN-on-DISC

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu práce Doc. Dr. Ing. A. Křížovi a konzultantce Ing. P. Klufové za jejich podporu, trpělivost a cenné rady při vypracování této bakalářské práce.

Dále děkuji Ing. J. Hájkovi, Ph. D., Ing. J. Šimečkovi a Ing. M. Vnoučkovi, Ph. D., za konzultace problematiky bakalářské práce.

Na závěr bych rád poděkoval společnosti MATEX PM, s.r.o., za povrchové laserové zakalení experimentálního materiálu.

Obsah

1 Úvod.....	9
2 Tepelné zpracování.....	10
2.1 Tepelné zpracování – úvod.....	10
2.2 Austenitizace	10
2.3 Žihání.....	11
2.4 Druhy žihání.....	11
2.4.1 Žihání na měkko [2].....	11
2.4.2 Žihání ke snížení pnutí [2].....	12
2.4.3 Žihání rekrystalizační.....	13
2.4.4 Homogenizační žihání [2].....	13
2.4.5 Normalizační žihání [2].....	13
2.4.6 Izotermické žihání [2].....	14
2.4.7 Základní žihání.....	14
2.5 Kalení.....	15
2.5.1 Kalící teplota [2].....	15
2.5.2 Rychlost ochlazování [2].....	16
3 Povrchové kalení.....	17
3.1.1 Kalení plamenem.....	18
3.1.2 Povrchové kalení v lázních roztavených solí.....	19
3.1.3 Povrchové kalení elektrolytem.....	19
3.1.4 Povrchové kalení indukční.....	19
3.1.5 Povrchové kalení laserem.....	19
4 Technologie povrchového indukčního kalení.....	20
4.1 Indukční ohřev.....	20
4.1.1 Základní vztahy [6].....	20
4.1.2 Hloubka vniku vířivých proudů.....	21
4.1.3 Induktory.....	22
4.2 Indukční kalení.....	23
4.2.1 Výhody indukčního povrchového kalení:.....	23
4.2.2 Nevýhody indukčního povrchového kalení:.....	24
5 Technologie povrchového kalení laserem.....	25
5.1.1 Laserový ohřev.....	25
5.1.2 Zdroje laserového záření.....	25
5.1.3 Absorbce laserového záření.....	26
5.1.4 Výhody laserového povrchového kalení [4]:.....	27
5.1.5 Nevýhody laserového povrchového kalení [4]:.....	27
5.1.6 Společnosti zabývající se laserovými úpravami povrchu.....	27
6 Srovnání technologií indukčního povrchového kalení a laserového povrchového kalení.....	28
6.1.1 Jakost zakalené vrstvy.....	28
6.1.2 Rychlost ohřevu.....	28
6.1.3 Příprava výroby.....	29

6.1.4 Chladící média.....	29
7 Tribologie.....	30
7.1.1 Tribologická analýza PIN-on-DISC	30
7.1.2 Materiál PIN tělíska.....	31
7.1.3 Poloměr tribologické plochy.....	31
7.1.4 Drsnost povrchů.....	32
7.1.5 Průběh opotřebení povrchu.....	32
7.1.6 Způsob vyhodnocení zkoušky.....	32
8 Impact test.....	33
8.1.1 Zkušební zařízení Impact testu.....	33
8.1.2 Impact kráter.....	33
8.1.3 Vyhodnocení Impact kráteru [14].....	33
9 Experimentální program.....	34
9.1 Experimentální materiál.....	35
9.2 Materiál ČSN 41 2050.....	35
9.2.1 Výchozí struktura ČSN 41 2050.....	36
9.2.2 Tepelné zpracování ČSN 41 2050.....	36
9.2.3 ČSN 41 2050.1.....	37
9.2.4 ČSN 41 2050.3.....	37
9.2.5 ČSN 41 2050.6.....	38
9.3 Materiál ČSN 41 6343.....	38
9.3.1 Výchozí struktura materiálu ČSN 41 6343.....	39
9.3.2 Tepelné zpracování materiálu ČSN 41 6343.....	39
9.3.3 ČSN 41 6343.0.....	40
9.3.4 ČSN 41 6343.3.....	40
9.3.5 ČSN 41 6343.6.....	41
9.4 Materiál ČSN 41 9573.....	41
9.4.1 Výchozí struktura materiálu ČSN 41 9573.....	42
9.4.2 Tepelné zpracování materiálu ČSN 41 9573.....	42
9.4.3 ČSN 41 9573.3.....	43
9.4.4 ČSN 41 9573 T1.....	43
9.4.5 ČSN 41 9573 T2.....	44
9.5 Povrchové kalení experimentálních materiálů.....	44
9.5.1 Zpracování vzorků po povrchovém kalení.....	44
9.6 Tribologická zkouška PIN-on-DISC.....	46
9.6.1 Návrh parametrů zkoušky.....	46
9.6.2 Měření a vyhodnocení tribologických stop.....	46
9.6.3 Diskuze výsledků tribologické zkoušky.....	48
9.7 Impact test.....	51
9.7.1 Návrh parametrů zkoušky.....	51
9.7.2 Měření a vyhodnocení impact kráterů.....	51
9.7.3 Grafické znázornění výsledků.....	51
9.7.4 Tabulkové porovnání	55
9.7.5 Diskuze výsledků Impact testu.....	56
10 Diskuze výsledků.....	57

10.1 Metalografie.....	57
10.1.1 Mikrotvrdost.....	58
10.2 Tribologická zkouška PIN-on-DISC.....	58
10.3 Impact test.....	59
11 Závěr.....	60
11.1.1 Metalografie.....	60
11.1.2 Tribologická zkouška PIN-on-DISC.....	60
11.1.3 Impact test.....	61
12 Seznam použité literatury.....	62
13 Struktury materiálů po povrchovém kalení laserem.....	64
14 Struktury materiálů po povrchovém kalení indukci.....	74

1 Úvod

Snaha dosáhnout co nejvyšší životní úrovně nutí lidstvo k vývoji a rozvoji nových technologií, které život zjednodušují. Společně s rozvojem nových technologií se zároveň lidstvo snaží co nejúčinněji a nejúčelněji využívat zdroje, které nám Země nabízí. Minulostí je doba, kdy se nad plýtváním zdroji nikdo nepozastavil. A právě z těchto důvodů je nutné zaměřit se i na nejmenší detaily, které mohou v důsledku vést k omezení tohoto plýtvání. Jedním z těchto detailů je povrch strojních součástí.

Nevhodně navržená povrchová úprava materiálu, může mít signifikantní vliv na životnost celé strojní součásti, potažmo na celý stroj. Nejsou to ovšem ztráty pouze materiálové. Nesprávný povrch dvou po sobě se pohybujících součástí může mít výrazný podíl na energetických ztrátách stroje. To a mnoho dalšího zdůrazňuje důležitost povrchů a jejich správného využití napříč celým oborem strojního inženýrství a v mnoha jiných oborech.

Cíle této bakalářské práce se orientují na problematiku opotřebení povrchu materiálu. Vzhledem k tomu jak je toto téma obsáhlé, věnuje se bakalářská práce jen úzké oblasti povrchových úprav materiálu a to především technologiím povrchového kalení laserem a indukci. Tyto dvě technologie byly vybrány kvůli jejich častému využití ve výrobě, možnostem automatizace a zajímavému porovnání kladů a záporů obou technologií.

Povrchové kalení je progresivní metoda zvyšování povrchové tvrdosti při současném zachování houževnatého středu materiálu potažmo strojní součásti. Využívá se v oblastech strojního inženýrství, kde je strojní součást silně namáhaná na povrchu, ale zároveň musí mít vysokou dynamickou únosnost. Takovým příkladem za všechny může být ozubené kolo.

Významný vliv na vlastnosti povrchově zakalené vrstvy má základní materiál. Faktorů, které ovlivňují základní materiál je mnoho. Tato práce se zaměřuje na vliv tepelného zpracování materiálu na výslednou základnou strukturu po povrchovém kalení, hloubku prokalení, tvrdost a odolnost proti opotřebení. Především odolnost proti opotřebení materiálu v závislosti na výchozí struktuře materiálu před povrchovým kalením bude hlavní informační hodnotou této práce.

Metody ověřování opotřebení povrchu materiálu, byly vybírány s ohledem na komplexnost a alespoň částečnou převoditelnost do praxe. Bohužel, vzhledem k rozsahu bakalářské práce, nemohlo být zařazeno do experimentálního programu více zkoušek, které by podaly další výsledky a mohly tak vytvořit komplexněji ucelený pohled na opotřebení povrchu materiálu po povrchovém kalení. Z důvodů vybavení, nicméně i dlouholetých zkušeností s vybavením pracovníků katedry, byly vybrány jako testovací zkoušky tribologický test PIN-on-DISC a Impact test.

Tato bakalářská práce vznikla v rámci řešení projektu SGS-2011-030

2 Tepelné zpracování

2.1 Tepelné zpracování – úvod

Účelem bakalářské práce je vystihnout vliv tepelného zpracování základního materiálu na odolnost povrchové vrstvy po povrchovém kalení. V teoretické části jsou uvedeny některé procesy tepelného zpracování. Především je kladen důraz na přehled jednotlivých způsobů tepelného zpracování, jejich výsledných struktur a faktorů, které je ovlivňují.

2.2 Austenitizace

Austenitizace je základním procesem u každého překrystalizačního tepelného zpracování. V metastabilním diagramu Fe-Fe₃C dochází k austenitizaci podeutektoidních ocelí s feriticko-perlitickou strukturou v rozmezí teplot Ac₁ až Ac₃. U nadeutektoidních ocelí s cementiticko - perlitickou strukturou v rozmezí teplot Ac₁ až Ac_m. Při překročení teploty Ac₁ dochází k přeměně perlitu v austenit. Zárodky austenitu začnou nukleovat na rozhraní feritu a cementitu. Přeměna feritu v austenit je rychlejší než rozpouštění cementitu a proto skončí dříve. Až po rozpouštění zbývajících karbidů je struktura čistě austenitická. Austenit ovšem nemá ještě rovnoměrné chemické složení. V místech, kde se vyskytovaly lamely feritu, ve kterém je maximální rozpustnost uhlíku přibližně do 0,02 %, je austenit na uhlík chudší než v místech, kde se vyskytoval cementit, v němž je maximální rozpustnost uhlíku přibližně 6,68 %. Obsah uhlíku se vyrovná v austenitu dalším zvýšením teploty. Docílí se takzvané homogenizace austenitu [1], [2].

Austenitizaci lze rozdělit na tři etapy:

- Přeměna perlitu v austenit.
- Rozpuštění karbidů.
- Zvýšení teploty a vyrovnání chemického složení austenitu (homogenizace).

Na rychlost vzniku austenitu má vliv výchozí struktura oceli. Rychlost přeměny austenitu je tím větší, čím větší je povrch rozhraní feritu a cementitu. Nejrychlejší austenitizace probíhá u ocelí s martenzitickou nebo sorbitickou výchozí strukturou. Z toho důvodu je možné povrchově kalit i zušlechtěné materiály. Vysoká rychlost austenitizace u zušlechtěných ocelí dovoluje přivádět materiálu teplo po kratší dobu a omezit tak tepelné ovlivnění materiálu. Vzhledem k poměrům velikostí rozhraní feritu a cementitu probíhá přeměna struktury na austenit rychleji u lamelárního perlitu než u perlitu globulárního [2].

Chemické složení oceli je dalším z faktorů ovlivňujících rychlost přeměny perlitu v austenit. Větší obsah uhlíku v oceli zvyšuje počet rozhraní feritu a cementitu a tak pomáhá k rychlejší přeměně na austenit. Prvky tvořící karbidy ustalují karbidy a brání jejich rozpuštění. To zpomaluje přeměnu v austenit. Naopak slitinové prvky netvořící karbidy urychlují tvorbu austenitu [2].

Při nedodržení technologického postupu může dojít při austenitizaci k takzvanému přehřátí. Přehřátí nastává, je-li zvolena příliš vysoká teplota austenitizace nebo příliš dlouhá výdrž na teplotě. Následně dochází k rozpouštění sulfidů, či nitridů a jejich následná precipitace při ochlazování na hranicích austenitických zrn. Tyto precipitáty po hranicích zrn zapříčiňují například pokles vrubové houževnatosti materiálu [2].

2.3 Žihání

Žihání je technologická operace tepelného zpracování, při které dochází k ohřevu výrobku na teplotu žihání, setrvání na teplotě a (zpravidla pomalému) k ochlazování. Pomalým ochlazováním se docílí přibližně rovnovážného stavu fází. Škála využití žihání je široká. Jedná se například o žihání za účelem homogenizace, tedy vyrovnání rozdílů chemického složení v objemu materiálu, žihání ke snížení zbytkového pnutí, snížení tvrdosti, rekrytalizace zrn, zjemnění struktury atd.. Žihání se často zařazuje mezi technologické operace tepelného zpracování z důvodu přípravy struktury požadovaných vlastností vhodných pro další tepelné zpracování [2].

2.4 Druhy žihání

Bez překrytalizace:

Žihání na měkko
Žihání ke snížení pnutí
Rekrytalizační žihání

S překrytalizací:

Homogenizační žihání
Normalizační žihání
Izotermické žihání
Základní žihání

2.4.1 Žihání na měkko [2]

Žihání na měkko se zařazuje do technologického postupu z důvodu snížení tvrdosti, zlepšení mechanických vlastností a vytvoření vhodné struktury pro následné kalení. Snížením tvrdosti selepší výchozí podmínky pro obrábění a tváření za studena.

Žíhací teplota při žíhání na měkko u podeutektoidních ocelí se pohybuje v těsné blízkosti pod teplotou Ac1. Po ohřevu dochází k výdrži na této teplotě. Dobu výdrže je nutné zvolit dle výchozí struktury. U bainitu a martenzitu dochází k vylučování a shlukování karbidů poměrně rychle. Lamelární perlit se sbaluje do globulárního perlitu poměrně pomalu a tím pomaleji, čím jsou lamely perlitu hrubší. Hrubý lamelární perlit se sbaluje do hrubého globulárního perlitu, který není vhodnou výchozí strukturou pro následující kalení.

U nadetektoidních ocelí se používají teploty těsně nad teplotou Ac1 pro urychlení vytváření globulárního perlitu. Po výdrži se musí materiál pomalu ochlazovat. Je-li ve výchozí struktuře lamelární perlit, je ohřev nad teplotu Ac1 a pomalé ochlazování jediným možným způsobem k dosažení jemného globulárního perlitu. Žíhací teplota lehce nad Ac1 předpokládá austenitizaci perlitu bez přílišné homogenizace austenitu. Tedy bez úplného rozpuštění cementitu. V oceli tak zůstává dostatek zárodků pro vylučování jemných a stejnoměrně rozložených karbidů při ochlazování. Na hodnotu žíhací teploty má vliv především obsah uhlíku, čím větší obsah uhlíku v oceli, tím pomaleji se karbidy rozpouštějí a tím vyšší žíhací teploty je nutné volit.

Klíčovým procesem je ochlazování. Pomalé ochlazování přes kritické teploty je nutné pro vznik hrubých karbidů a s tím spojeným výsledným poklesem tvrdosti.

2.4.2 Žíhání ke snížení pnutí [2]

Cílem tohoto způsobu žíhání je snížení vnitřního pnutí bez ovlivnění původní struktury a mechanických vlastností oceli. V oceli vzniká vnitřní pnutí mnoha způsoby. Vnitřní pnutí může vzniknout třískovým obráběním, tvářením za studena, nerovnoměrnými heterogenními strukturními transformacemi, svařováním nebo například chladnutím po tvářením za tepla.

Ohřev u žíhání na snížení pnutí dosahuje teploty pod Ac1. Po výdrži na této teplotě, následuje pomalé ochlazení. U zušlechťených ocelí, které mají být žíhány ke snížení pnutí, se musí teplota volit tak, aby byla nižší než teplota posledního popouštění. U takových výrobků se používá teplot 400 až 600 °C. Nižší hranice teploty je dána poklesem meze kluzu, při které dochází ke snižování plastických deformací, a vyšší hranice je omezena teplotou o 20-30 °C nižší než poslední popouštěcí teplota. Při těchto teplotách se vnitřní pnutí již snižují. U výrobků především z nástrojových ocelí určených pro kalení se žíhání na snížení pnutí provádí těsně pod teplotou Ac1. Prodleva na teplotě je na rozdíl od žíhání na měkko kratší. Povrchově kalené výrobky se žíhají ke snížení pnutí při teplotách kolem 150 - 200 °C. Relativně nízké teploty se volí proto, aby zůstala zachována tvrdost povrchové vrstvy. Ovšem nedojde k velkému snížení pnutí. Teplota a výdrž se volí podle požadovaného stupně snížení zbytkových pnutí.

2.4.3 Žihání rekrytalizační

Rekrytalizační žihání je určeno pro obnovení tvárných vlastností ocelí po tváření za studena. Rekrytalizačním žiháním dochází k odstranění protažených zrn a zpevnění oceli po tváření za studena. Vytváří se nová feritická zrna bez známek protváření a zvyšuje se schopnost plastické deformace oceli.

Při rekrytalizačním žihání se ocel ohřeje na rekrytalizační teplotu, která je odvislá od stupně tváření - obvykle 550 až 700 °C. Proveďte se výdrž na teplotě a následně se ocel ochlazuje. Teplota ohřevu nesmí překročit teplotu A_{c1} , aby nedošlo k překrytalizaci. Pro zjemnění struktury oceli je nutné volit nižší žihací teploty.

Rekrytalizačním žiháním lze ovšem dosáhnout i opačného cíle, a to zhrubnutí zrna. Ocel s hrubými zrny se z důvodů lepších magnetických vlastností (permeabilita) používá k výrobě transformátorových plechů. Pro zhrubnutí zrna se používají vyšší teploty žihání a nižší stupeň protváření.

2.4.4 Homogenizační žihání [2]

Homogenizačním žiháním se vyrovnává chemická nerovnoměrnost ve struktuře. Tato chemická nerovnoměrnost vzniká například už při chladnutí odlité oceli. Vyrovnání chemické heterogenity je způsobeno difuzními ději. Homogenizační žihání probíhá za teplot značně vyšších než jsou teploty A_{c3} a A_{cm} . Na této teplotě se setrvává dostatečně dlouho (6 i více hodin) k vyrovnání chemické heterogenity. Po výdrži následuje pomalé ochlazování.

Homogenizační žihání se doporučuje zařazovat nejlépe ještě u polotovaru, nebo ingotů. Především z důvodu dlouhé výdrže na vysokých teplotách homogenizační žihání způsobuje oduhličení povrchu a vznik okují.

2.4.5 Normalizační žihání [2]

Normalizační žihání se využívá k zjemnění hrubého zrna. Hrubé zrno se může vytvořit například při lití, dlouhodobým žiháním za vysokých teplot nebo při tváření za vysoké teploty. Za zjemnění zrna může překrytalizace, která začíná nad teplotou A_{c1} . Zjemnění zrna je tím větší, čím byl rychlejší ohřev na normalizační teplotu a čím rychlejší bylo ochlazení. Při normalizačním žiháním se nejenom zjemňuje zrno, ale také se vyrovnává jeho velikost. Toho se s výhodou využívá například u tvářených součástí s různými průměry, kde dochází k různému stupni protváření, který má vliv na velikost zrn. Struktura s pravidelnou velikostí zrn je výhodnější pro další tepelné zpracování.

Podutektoidní oceli se normalizačně žihají při teplotě o 30 až 50 °C vyšší, než je teplota A_{c3} a poté se součásti nechají volně chladnout na vzduchu.

Nadeutektoidní oceli se zpravidla normalizačně nežihají. Pro odstranění karbidického síťového na hranicích zrn vzniklého pomalým ochlazováním po tváření je vhodná teplota přibližně 30 °C nad bodem A_{cm} . Pak následuje rychlé ochlazení až na teplotu pod 700 °C.

Další ochlazování musí být pomalé, aby byl zajištěn dostatek času pro difuzní procesy a austenit se mohl přeměnit na perlit. Jestliže by bylo ochlazování příliš rychlé, došlo by k vytvoření zákalné struktury. To by mělo při takto vysoké austenitizační teplotě za následek vysoké pnutí a vznik trhlin.

Pro zjemnění zrna nadeutektoidních ocelí normalizačním žiháním se provádí ohřev nad teplotu A_{c1} s následným dochlazením na vzduchu. Při překročení teploty A_{cm} zrno hrubne a při pomalém ochlazování se vytváří karbidická síť z karbidů vyloučených po hranicích austenitických zrn.

Normalizačního žihání lze využít i jako konečné operace pro méně namáhané strojní součásti. Pro snížení vnitřního pnutí, snížení pevnosti a zlepšení plastických vlastností oceli se výrobek ještě normalizačně žihá při teplotách mezi 500-600 °C.

2.4.6 Izotermické žihání [2]

Izotermické žihání zlepšuje změnou mikrostruktury mechanické vlastnosti materiálu. Zvyšuje obrobiteľnosť, snižuje vnitřní pnutí a tvrdost. Obvyklým způsobem izotermického žihání je ohřev o 30 – 50 °C vyšší než teploty A_{c3} či A_{cm} a výdrž na teplotě, aby mohlo dojít k celkové austenitizaci. Následuje ochlazení na teploty blízké A_{c1} . Na této teplotě se setrvá do té doby, než dojde k rozpadu austenitu na perlit. Nakonec se ocel nechá zchladnout. Správná teplota a doba výdrže se dá odečíst z diagramů IRA pro konkrétní ocel a konkrétní austenitizační teplotu.

Izotermické žihání lze použít i jako žihání na měkko především u nadeutektoidních ocelí. Teplota austenitizace se ovšem používá nižší, zpravidla nad teplotou A_{c1} . Je k tomu třeba přihlídnout při určování teploty a doby výdrže u izotermického rozpadu z IRA diagramu. Při vhodně zvolené teplotě rozpadu austenitu vzniká struktura tvořená velmi jemnými karbidy. Rozpad se děje izotermicky, což má vliv na morfologii karbidů. Ty se tvoří stejně velké a rovnoměrně rozložené ve struktuře. Prodloužení doby na teplotě i po ukončení rozpadu austenitu, by mělo za následek hrubnutí karbidů.

Izotermické žihání je vhodné především pro malé výrobky, u nichž je možná rychlá změna teploty.

2.4.7 Základní žihání

Základní žihání se zařazuje do tepelného zpracování pro snížení vnitřního pnutí, zlepšení obrobiteľnosti a tvařitelnosti. Při základním žihání se ohřívá materiál na teploty 30 až 50 °C nad křivky A_{c3} a A_{cm} . Po ohřevu následuje výdrž na teplotě a následně pomalé ochlazení v peci [2].

2.5 Kalení

Kalení se využívá za účelem zvýšení tvrdosti materiálu [2].

Kalení je ohřev předmětu nad teplotu A_{c3} resp. na teplotu nad A_{c1} , výdrž na této teplotě a následující tak rychlé ochlazení, že se event. rovnovážné přeměny více nebo méně potlačí [2].

Rychlým ochlazováním z kalící teploty dochází k rozpadu austenitu na bainit či martenzit. Případný vznik jemného lamelárního perlitu, tzv. troositu, je také provázen zvýšením tvrdosti oproti původní struktuře glubulárního nebo hrubého lamelárního perlitu [2].

K materiálu určeného ke kalení se zavádí několik pojmů popisující vlastnosti materiálu při kalení. Jsou jimi kalitelnost a prokalitelnost. Kalitelnost je schopnost oceli zvýšit svoji tvrdost kalením. Prokalitelnost popisuje do jaké hloubky materiálu kalení zasáhne a jaké tvrdosti se dosáhne. Prokalitelnost se stanovuje z Jominiho zkoušky prokalitelnosti [2].

2.5.1 Kalící teplota [2]

Kalící teploty se volí u podeutektoidních ocelí přibližně $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ nad teplotou A_{c3} , u nadeutektoidních ocelí asi $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ nad teplotu A_{c1} . Kalící teplota se mění s chemickým složením oceli. Některé karbidotvorné prvky vytváří karbidy s vysokou teplotou tání a čím vyšší je teplota tání karbidů, tím vyšší musí být kalící teplota.

Nevhodně zvolená teplota se projeví různými způsoby. Velké snížení kalící teploty podeutektoidní oceli má za následek výskyt feritu ve výsledné struktuře. Kvůli výskytu feritu se výsledná tvrdost struktury sníží. Krátká doba výdrže nebo menší snížení kalící teploty způsobí nedostatečnou homogenizaci austenitu. Ta má za následek zvýšení kritické ochlazovací rychlosti.

Příliš dlouhá doba výdrže nebo příliš vysoká kalící teplota způsobí zhrubnutí austenitického zrna. Výsledná struktura bude po ochlazení obsahovat hrubé martenzitické jehlice. Hrubý martenzit je většinou ve struktuře nechtěným jevem, protože má menší houževnatost než martenzit jemný. Dalším projevem vysoké kalící teploty je zvýšení podílu zbytkového austenitu ve struktuře. To vede ke snížení tvrdosti struktury.

Teplota kalení a doby výdrže nadeutektoidní oceli je ovlivněna množstvím nadeutektoidních karbidů a jejich druhem tj. teplotní stabilitou, které mají být v kalené struktuře zachovány, tedy nerozpuštěny a zvyšovat tak otěruvzdornost oceli. Rozložení, tvar a velikost karbidů jsou dány výchozí strukturou před kalením. Z toho plyne, že je nutné nadeutektoidní ocel před kalením správně vyžít. Jestliže je nadeutektoidní ocel kalena ze stavu po tváření, jsou karbidy vyloučeny ve formě síťoví po hranicích zrn a takto zůstanou i struktuře po kalení. To je samozřejmě nežádoucí stav.

Zvolením nízké kalící teploty nedojde k rozpouštění karbidů. Austenit je tak chudší na uhlík a tvrdost klesá. Naopak při zvolení vysoké kalící teploty dojde k zhrubnutí zrna a

rozpuštění většiny nebo všech karbidů. Austenit je tak bohatý na uhlík a při ochlazování se rozpadá na hrubý martenzit s velkým podílem zbytkového austenitu.

2.5.2 Rychlost ochlazování [2]

Pro získání martenzitické struktury při kalení je nutné ochlazovat ocel rychlostí stejnou nebo větší, než je kritická ochlazovací rychlost. Tato rychlost ochlazování zamezuje uhlíku v difuzi a zabraňuje tak vzniku bainitu a perlitu. Ochlazovací rychlost klesá se zvyšujícím se množstvím uhlíku a slitinových prvků v oceli. Dalšími faktory, které snižují kritickou rychlost, jsou velikost austenitického zrna a výše kalící teploty. Ochlazuje-li se ocel rychleji než je kritická ochlazovací rychlost, dojde k nepatrnému zvýšení tvrdosti. Tvrdost se zvýší díky menšímu podílu zbytkového austenitu ve struktuře a nedojde při ochlazování k popuštění martenzitu. Ochlazovací rychlost je závislá na měrném teple oceli, tepelné vodivosti oceli, tvaru a velikosti výrobku a na zvoleném ochlazovacím médiu.

3 Povrchové kalení

Povrchovým kalením se vytvářejí tenké zakalené vrstvy na povrchu výrobku. Cílem povrchového kalení je vytvořit tvrdý povrch se zachováním houževnatého jádra předmětu. K dosažení takových vrstev je nutný rychlý ohřev povrchu výrobku a následné rychlé ochlazení. Je-li povrch předmětu ohříván větší rychlostí, než jakou je schopen materiál teplo odvádět, vzniká tepelný spád. Ten dovoluje dosažení kalící teploty jen do určité hloubky od povrchu. Tepelný spád je tím větší, čím je ohřev povrchu rychlejší. Rychlým ohřevem vznikají tenké vrstvy. Ohřev musí být zároveň krátký, aby nedošlo k přehřátí nebo spálení oceli. Pomalejší ohřev povrchu dovoluje vytvoření silnějších vrstev [2].

Kalící teplota u povrchového kalení musí být podstatně vyšší než u kalení v peci. Všechny mechanismy fázových přeměn jsou při povrchovém kalení zachovány. Přeměna výchozí struktury v austenit a vyrovnání uhlíku v austenitu probíhá difúzně. Proto se vzrůstající rychlostí ohřevu se rozšiřuje oblast přeměny perlitu na austenit. Vytvoření chemicky homogenního austenitu si žádá vyšší kalící teploty. I při použití vysokých teplot však nedochází k přehřátí oceli. Rychlým ohřevem totiž vzniká jemné austenitické zrno, které se vzrůstající teplotou při rychlém ohřevu hrubne pomalu. Přehřátí dochází až u opravdu vysokých teplot, které nejsou pro běžné kalení použitelné [2].

Následkem nedostatečného ohřevu na správnou kalící teplotu nedojde k dostatečné chemické homogenizaci austenitu. Tím se zvýší kritická ochlazovací teplota a i při správném ochlazování může dojít k výskytu troostitu v zakalené struktuře. Troostit snižuje celkovou tvrdost vrstvy [2].

Příliš vysoká teplota kalení zase způsobuje hrubnutí austenitického zrna, takže po kalení zůstane ve struktuře větší podíl zbytkového austenitu a tvrdost vrstvy poklesne [2].

Důležitou roli hraje v povrchovém kalení výchozí struktura. Správná homogenizace austenitu je odvislá od rozmístění, tvaru a velikosti karbidů ve výchozí struktuře. Jsou-li karbidy jemné a rovnoměrně rozmístěné, dochází při ohřevu na kalící teplotu k jejich rychlému rozpouštění a austenit se chemicky homogenizuje rychleji. Nejvýhodnějšími strukturami pro povrchové kalení jsou sorbit a jemný lamelární perlit. Nejméně vhodný je hrubý globulární perlit. Z toho důvodu je vhodné před povrchovým kalením materiál zušlechťovat nebo normalizačně žíhat [2].

Požadovaná hloubka kalené vrstvy (zpravidla 0,5-3 mm) je dána rozměry a účelem užití součásti. Ve výjimečných případech může být tloušťka vrstvy větší nebo menší. Výslednou hloubku zakalení ovlivňují mnohé faktory, jako použitá technologie povrchového kalení nebo stav výchozího materiálu. Na kvalitu zakalené vrstvy má vliv především stejnoměrnost vrstvy a plynulý přechod základní struktury do nezakaleného jádra. V porovnání povrchového kalení a kalení obvyklými způsoby dosahují na stejných materiálech větší tvrdosti povrchově kalené vrstvy. Tento jev se nazývá superhardness, nebo česky supertvrdost. Lze ho vysvětlit chybějícím zbytkovým austenitem ve výsledné struktuře a velkým pnutí v povrchové vrstvě [2].

Povrchové kalení nemění chemické složení kalené povrchové vrstvy ani houževnatého jádra, tedy jejich chemické složení je před i po kalení stejné. Z toho důvodu se používají pro povrchové kalení kalitelné oceli s obsahem uhlíku vyšším než 0,35 %. Nejvíce se osvědčily uhlíkové oceli s obsahem 0,4 - 0,5 % uhlíku. U takových ocelí je snížena možnost popraskání při kalení a lze s nimi dosáhnout vysoké povrchové tvrdosti. Je-li třeba kalit materiál s vyšší pevností je vhodné použít středně legované konstrukční oceli. Například legované prvky (Cr - V, Cr - Mo, Cr - Ni). Oceli s vyšším obsahem legur působí při povrchovém kalení značné obtíže [1],[2].

Deformace spojené se strukturní přeměnou při ochlazování kalené součásti jsou u technologie povrchového kalení značně menší než u celoobjemového kalení. Je to způsobeno ohřevem pouze tenké povrchové vrstvy součásti. Velikost deformací závisí na tvaru a rozměrech kalených součástí, na množství zbytkových pnutí po předchozích operacích, na poměrné tloušťce zakalené vrstvy a na zvolené metodě povrchového kalení. U dlouhých předmětů hrozí při jednostranném kalení vznik nepřijatelných deformací. Pro snížení zbytkových pnutí v povrchové vrstvě kaleného výrobku se používá popouštění za nízkých teplot do 200 °C [3].

Povrchové kalení lze rozdělit podle způsobu ohřevu na:

- povrchové kalení plamenem,
- povrchové kalení v lázních roztavených solí,
- povrchové kalení elektrolytem,
- povrchové kalení indukční,
- povrchové kalení laserem.

3.1.1 Kalení plamenem

Ohřev materiálu je zajištěn plamenem vhodného topného plynu s kyslíkem. Je vhodné volit plyny s vysokým příkonem energie při hoření. Takovým plynem je například acetylen s kyslíkem. Dalšími plyny, ovšem s nižším příkonem, mohou být směsi svítiplynu, propanu a zemního plynu s kyslíkem. Tvar a typ hořákové trubice se odvíjí od tvaru a velikosti kalené plochy a dále se upravuje dle potřeby technologie. Častým materiálem pro výrobu hořáků je čistá měď, která má výbornou tepelnou vodivost a je odolná proti opalu. Další možností jsou například hořáky z chromniklové nerezavějící oceli. U tohoto materiálu je však nutné zajistit dobrý odvod tepla. Součásti určené k povrchovému kalení plamenem by měly mít kovově čistý, nejlépe obrobený povrch [1].

Nevýhody povrchového kalení plamenem jsou např. větší tloušťka zakalené vrstvy (od 0,8 mm) a její nerovnoměrnost, pracná výroba hořáků a jejich nízká životnost, práce s hořlavými plyny. Výhodami jsou nízká pořizovací cena technologie, nízké provozní náklady a široká škála výkonů [1].

3.1.2 Povrchové kalení v lázních roztavených solí

Ponorné kalení je méně častý způsob povrchového kalení. Základem je rychlý ohřev povrchu v roztavených kovech nebo solných lázních. Teploty lázní dosahují teplot 1100 až 1200 °C. Doba ponoření v lázni závisí na požadované hloubce zakalení a velikosti kaleného výrobku. Velkou roli hraje kalicí médium, jeho měrné teplo a tepelná vodivost, které má významný vliv na tloušťku zakalené vrstvy. Pro větší tloušťku zakalené vrstvy a snížení pnutí při ohřevu se může celý výrobek předehtát na teploty o něco nižší, než byla teplota popouštění u zušlechtěné oceli. Nevýhoda ponorného kalení je větší prokalení na hranách. Touto technologií nelze kalit předměty tvarově složitě [1].

3.1.3 Povrchové kalení elektrolytem

Tato technologie je založena na tom, že výrobek je umístěn do elektrolytu a plní zde úlohu katody. Teplota elektrolytu bývá 50 až 70 °C, napětí je požíváno v rozmezí 200 až 300 V a hustota proudu 2 až 6 A/m². Po připojení se vylučuje na katodě vodík, který vytváří vrstvu s velkým odporem a dochází zde k elektrickým výbojům mezi elektrolytem a katodou. Rychlost ohřevu je až 200 °C/s. Po odpojení proudu se proces zastavuje. Elektrolyt chladí výrobek a povrchová vrstva se zakalí [1].

3.1.4 Povrchové kalení indukční

viz. Kapitola 4

3.1.5 Povrchové kalení laserem

viz. Kapitola 5

4 Technologie povrchového indukčního kalení

4.1 Indukční ohřev

Při indukčním ohřevu prochází ohříváný materiál přes vodou chlazený induktor (cívku), jež je napájený proudem 10 až 3000 [A] o střední frekvenci 3 až 50 [kHz] nebo vysoké frekvenci 50 až 500 [kHz], které jsou generovány středofrekvenčním nebo vysokofrekvenčními generátory. Ohřev materiálu umístěného v induktoru probíhá indukcí, jež je přímou aplikací Lenzova a Joulova zákona. Podle Lenzova indukčního zákona existuje v každém elektrickém vodiči umístěném do proměnného magnetického pole elektromotorická síla, a tedy v něm vznikají indukované proudy zvané Fucoultovy (vířivé) proudy. Vířivé proudy způsobují disipaci energie ohmickým ohřevem [5].

V principu se dá přirovnat sestava generátoru a induktoru k transformátoru, kde primární vinutí tvoří induktor, jímž protéká primární proud. Ohříváný materiál představuje sekundární vinutí s jedním závitem spojeným nakrátko. Materiál se zahřívá díky vzniku indukovaných vířivých proudů, tedy dojde k rozpohybování volných elektronů. Ty se pohybují po kružnicích. Při svém pohybu předávají elektrony část své energie atomové mřížce a materiál se ohřívá. Doprava tepla do výrobku tak neprobíhá tepelným spádem, ale je přepravováno střídavým magnetickým polem a vzniká přímo ve výrobku. Z toho důvodu je výrobek nejteplejším objektem v celé soustavě. Vznik tepla přímo v objemu výrobku je velkou výhodou indukčního ohřevu. Indukční ohřev dovoluje velké měrné příkony do zahříváného materiálu. Důležitým parametrem indukčního ohřevu je frekvence proudu, (kterým je napájený induktor a v jehož magnetickém poli je výrobek) která ovlivňuje rozložení vzniku vířivých proudů a tedy i tepla v materiálu [6].

4.1.1 Základní vztahy [6]

Napětí indukované v sekundárním vinutí:

$$U_2 = \frac{2\pi f N_2 \phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f N_2 \phi_m \quad [\text{V}], \quad (1)$$

kde: f je frekvence napětí [Hz],

N_2 počet sekundárních závitů [-],

ϕ_m maximální hodnota střídavého magnetického toku [Wb].

Má-li vinutí pouze jeden závit, bude napětí rovno:

$$U_2 = 4,44 f \phi_m \quad [\text{V}]. \quad (2)$$

Sekundární proud bude proud roven:

$$I_2 \approx I_1 N_1 \quad [\text{A}]. \quad (3)$$

Uvažujeme-li v celé délce ohříváného materiálu homogenní magnetické pole vyvolané cívkou

s počtem závitů N_1 na 1 [m] délky bude intenzita magnetického pole:

$$H = N_1 I_1 \sqrt{2} \quad [\text{A}\cdot\text{m}^{-1}]. \quad (4)$$

Rozložení intenzity vířivých proudů pod povrchem materiálu:

$$J = J_0 e^{-\sqrt{\pi f \sigma \mu} x} \quad [\text{A}\cdot\text{m}^{-2}]. \quad (5)$$

Vztah pro výpočet hloubky vniku proudů do materiálu:

$$J = \frac{J_0}{e} \rightarrow d = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad [\text{m}]. \quad (6)$$

- kde: J proudová hustota v hloubce x pod povrchem materiálu [$\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$],
 J_0 proudová hustota na povrchu materiálu [$\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$],
 f frekvence elektrického proudu [Hz],
 d hloubka vniku (ve které klesne proudová hustota na cca 37%) [m],
 σ vodivost [S]
 μ permeabilita materiálu; $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ [$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$],
 x vzdálenost od povrchu materiálu [m].

4.1.2 Hloubka vniku vířivých proudů

Mezi povrchem materiálu a takzvanou hloubkou vniku dochází k nejintenzivnějšímu vzniku tepla. Vznikne zde až 86 % celkového tepla. Zbylých 14 % absorbuje zbytek vsázky. Ze vztahů vyplývá, že rozložení indukovaných proudů v materiálu je závislé na frekvenci elektrického proudu. Větší frekvence el. proudu zmenšují hloubku vniku indukovaných proudů. Naopak menší frekvence dovolují vznik indukovaných proudů hlouběji v materiálu. Tohoto jevu se s výhodou využívá u prohřátí materiálu do různých hloubek. Použitím vysoké frekvence proudu dojde k prohřátí pouze tenké vrstvy na povrchu. Od této vrstvy se šíří teplo do zbytku materiálu vedením. Lze tak dosáhnout vysokých teplot na povrchu materiálu bez přímého tepelného ovlivnění středu materiálu. Takto lze docílit podmínek vhodných pro povrchové indukční kalení [7].

Pro ohřev materiálu je důležité zvolit vhodný zdroj o požadované frekvenci. Středofrekvenční a vysokofrekvenční zdroje se svými frekvencemi částečně překrývají, avšak pro dosažení skutečně tenkých vrstev je třeba použití vysokofrekvenčních zdrojů. Obecně platí, že náklady na zařízení vztažené na jednotku výkonu rostou s požadovanou frekvencí [3].

Středofrekvenční zdroje	Vysokofrekvenční zdroje
+ Nižší pořizovací cena + Vysoká účinnost + Levnější náhradní díly - Oddělovací trafo - Vyšší celková energetická náročnost	+ Menší deformace materiálu - Vysoká cena zdroje - Nízká účinnost - Vysoká cena a omezená životnost elektroniky

Tab. 4-1, Srovnání středofrekvenčních a vysokofrekvenčních zdrojů

4.1.3 Induktory

Na induktory jsou kladeny extrémní požadavky z hlediska elektrického a tepelného namáhání, protože jimi může v některých situacích být veden proud v řádech desítek kA. Při takovém namáhání je nutné induktory vyrábět duté s vodním chlazením. Díky takto vysokým proudům také dochází ke značnému mechanickému namáhání některých částí, i když se nedotýkají přímo zpracovávaného dílu [8]. Další faktory ovlivňující konstrukci induktoru jsou velikost a tvarová složitost ohřívané součásti, případně sériovost zakázky [4]. Všechny tyto aspekty je třeba zohlednit při konstrukci a výrobě induktorů. Konstrukčně se vyrábějí induktory jednozávitové nebo mnohozávitové. Obvyklý materiál pro jejich výrobu jsou měděné trubky různých průměrů [1].

Tvar induktoru udává, jak se bude vytvářet elektromagnetické pole v jeho okolí a tedy jak se bude formovat elektromagnetické pole ve výrobku. Výsledný magnetický tok, tak může být vzhledem k ose nebo směru posuvu výrobku podélný nebo příčný. Nejpoužívanější je podélný směr magnetického toku a vytváří se za pomoci závitů induktoru obklopujících výrobek s malou vzduchovou mezerou, jejíž velikost závisí na frekvenci a elektrickém zatížení. Podélný magnetický tok vzhledem k elektromagnetické průzařnosti nachází nevýhody u tenkých výrobců, kde se vyžaduje větší frekvence než příčný magnetický tok. Návrh induktorů je často řešen na základě empirických poznatků [3].

Pro induktory platí [3]:

- induktor musí být vzdálen od výrobku tak, aby maximální hustota siločar elektromagnetického pole byla v místě, kde má být největší teplota výrobku.
- Největší hustota magnetického toku je uvnitř induktoru.
- Nesouměrnost polohy výrobku a induktoru vede k různým hloubkám ohřevu.
- Elektromagnetické pole se vzdáleností od místa připojení induktoru ke zdroji elektrického proudu roztváří. Tedy v místě připojení el. proudu je slabší než ve vzdálenějších částech induktoru. To negativně ovlivňuje hloubku ohřevu především u jednozávitových induktorů a u součástí které při ohřevu nerotují.

4.2 Indukční kalení

Výchozím parametrem povrchového indukčního kalení je požadovaná hloubka zakalení. Ta se volí v rozmezí 1/10 až 1/20 příčného rozměru výrobku. Přibližně je možné pokládat hloubku průniku vířivých proudů za hloubku prokalení. Ovšem v praxi bývá tato skutečnost jiná vzhledem k tomu, že v celé hloubce nedojde k autenitizaci, tedy hloubka prokalené vrstvy je menší než hloubka průniku. Hloubka průniku je závislá na frekvenci elektrického proudu, vodivosti a permeabilitě ohřívaného materiálu. Při zvolené frekvenci závisí hloubka prokalení na hustotě příkonu a době ohřevu materiálu. Tyto všechny proměnné ovlivňují experimentálně zjištěnou hloubku prokalení. Pro povrchové kalení se měrné příkony pohybují v rozmezí 1,5 až 2,5 kW/cm². Dolní hranice je vhodná z hlediska frekvence a účinnosti při ohřevu bez vzájemného pohybu výrobku a induktoru. Horní hranice se naopak používá u ohřevu se vzájemným pohybem. Díky tomu je výroba rychlejší [3].

Další důležitou součástí soustavy pro indukční ohřev a kalení bývají sprchy. Ty mohou být přímo součástí induktoru (tzv. dvoukomorové induktory), nebo zcela nezávislé. Vyrábějí se buď z nemagnetických materiálů (mosaz, měď, hliník), nebo nekovové např. z teflonu. Obvyklým chladicím médiem je voda. Chlazení vodou je nenáročné na údržbu a nevznikají při něm škodliviny. Voda musí vyhovovat kvalitou a proto je kontrolována. Jako další chladicí média se méně používají oleje, voda s přísadkami polymerů a stlačený vzduch. Ochlazování oleji způsobuje menší deformace a zabraňuje tak vzniku trhlin[4], [8].

Povrchové indukční kalení nachází uplatnění například ve výrobě klikových hřídelí, kde se povrchově kalí plochy, na které se umísťují ložiska. Dále se indukčním povrchovým kalením kalí osová hřídele, ozubení ozubených kol, válce válcovacích stolic a další. Tato technologie nachází uplatnění všude tam, kde je potřeba zvýšit tvrdost namáhaných ploch, ale zároveň zachovat houževnaté jádro součásti [4].

4.2.1 Výhody indukčního povrchového kalení:

- bezkontaktní ohřev,
- vysoká hustota výkonu a rychlost ohřevu,
- snadno regulovatelná teplota kovu,
- jednoduchost a automatizace činnosti,
- přesné určení ohřívaných zón,
- dobrá účinnost,
- dobré hygienické podmínky práce a minimální negativní vliv na životní prostředí.

4.2.2 Nevýhody indukčního povrchového kalení:

- problematické kalení tvarově složitých součástí,
- nutnost výroby induktorů při změně výroby,
- nad Courierovou teplotou ztrácí feromagnetické materiály magnetické vlastnosti a mění se tak i podmínky ohřevu materiálu.

5 Technologie povrchového kalení laserem

Při konvenčních metodách kalení, jsou výrobky ohřáté na požadovanou teplotu a následně ochlazeny chladícím médiem jako je voda, olej, solné lázně nebo vzduch. Tímto rychlým zchlazením se dosáhne požadované tvrdosti materiálu. V mnoha průmyslových aplikacích je potřeba zvýšit tvrdost pouze na určitých plochách výrobku. Rychlé zlepšování laserové technologie v minulých desetiletích umožnilo využívat laser k mnoha průmyslovým operacím jako jsou tepelné zpracování, legování nebo laser cladding. Vzhledem k tomu, že je laser drahým zdrojem energie využívá se v případech, kdy tato technologie poskytuje určité technologické nebo ekonomické výhody oproti běžným konvenčním metodám [4].

5.1.1 Laserový ohřev

Výhodou použití laseru pro povrchové kalení je možnost dopravit velké množství energie na přesně určenou plochu. Laser dopravuje energii svazkem fotonů na povrch materiálu výrobku a zbytek výrobku přitom slouží jako chladič. Velký přívod energie způsobuje rychlé ohřátí povrchu materiálu a dochází k austenitizaci v povrchové vrstvě. Rychlý ohřev povrchové vrstvy, i přes vysokou teplotu kalení nutnou pro homogenizaci austenitu, dovolí vytvoření jemné martenzitické mikrostruktury, která vykazuje vysokou tvrdost. V neposlední řadě rychlý proces ohřevu a ochlazení nedovoluje přívod velkého množství tepla do materiálu jako u jiných méně výkonných technologií a nedochází tak velkým deformacím povrchově kalených součástí [4].

Vysoká měrná energie laserového zdroje dovoluje přivádět na povrch velké množství energie, která rychle ohřívá materiál. Tato rychlost je tak vysoká, že dochází ke vzniku prudkého teplotního gradientu. Protože kovové materiály jsou velmi dobrými tepelnými vodiči dochází k odvodu tepla z povrchu samotným materiálem a to tak rychle, že není třeba používat dalších chladících médií. Dosahuje se tak výrobků s tvrdým povrchem a houževnatým středem [4].

Další zajímavostí povrchového kalení laserem je vznik tlakových napětí na povrchu a v podpovrchových vrstvách materiálu. Zvyšuje se tak odolnost materiálu proti opotřebení a únavě. Tlaková napětí působí jako předpětí povrchu materiálu a ten je schopný snést vyšší zatížení. Zároveň zabráňuje vytváření a postupování trhlin z povrchově kalené vrstvy do materiálu [4].

5.1.2 Zdroje laserového záření

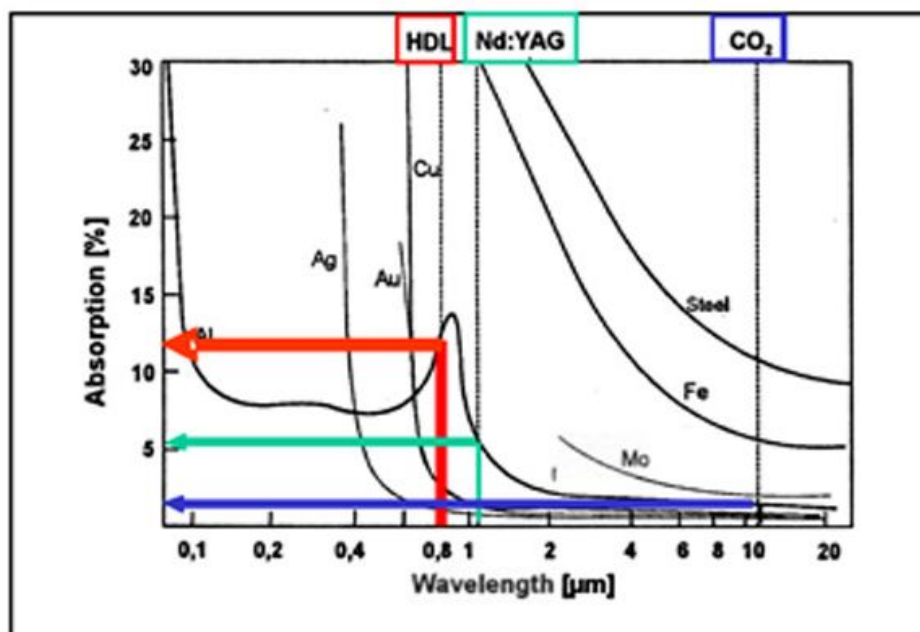
Nejpoužívanějšími zdroji laserového záření pro využití ve strojírenství jsou pevnolátkový laser Nd:YAG, kde aktivní prostředí tvoří izotropní krystal Yttrium Aluminium Granát. Dalším je CO₂ Laser s aktivním plynným prostředím CO₂ (a dalšími plyny) a nakonec HPDD laser, který čerpá diodami aktivní prostředí laseru. Pro povrchové kalení se používají nejčastěji poslední dva typy laserů [9].

Tloušťky prokalených vrstev se zřídka dosahuje větší než 2,5 mm. Je to především dáno vlastnostmi materiálu, který je laserem povrchově kalen. U nízkouhlíkových ocelí se dosahuje tlouštěk vrstev ještě nižších a to kolem 0,25 mm. Ovšem díky vysokým příkonům energie do materiálu a velkým odvodem tepla, je možné kalit i materiály konvenčními metodami nekalitelné [4].

Běžně používané měrné výkony pro povrchové kalení se pohybují v rozmezí mezi 500 až 5000 W/cm² a doba ohřevu dosahuje časů od 0,1 do 10 sekund [4].

5.1.3 Absorbce laserového záření

Absorbce laserového záření kovy je podmíněna interakcí elektromagnetického vlnění s elektronovým plynem materiálu. K přenosu energie z paprsku vyzářených fotonů laseru dochází na poruchách krystalové mřížky v krátkých časových úsecích. Tyto časové úseky jsou kratší než doba relaxace elektronového plynu. Absorbce laserového záření s vlnovou délkou 10,6 μm se pohybuje kolem 2 až 5 %. Zbytek energie představuje ztráty v důsledku odrazu záření od povrchu materiálu. Na absorpci má také vliv teplota materiálu, který je ohříván. Se zvyšující se teplotou vzrůstá absorbce materiálu. Při natavování materiálu je možné dosáhnout absorpce kolem 55 %. Závislost absorpce kovových materiálu na vlnové délce laseru je vidět na obrázku (obr. 5-1). Možností jak zvýšit absorpci laserového paprsku jsou vysoko absorpční nátěry, které se aplikují na materiál. Jsou to nátěry na bázi grafitu, křemíku a uhlíku. Některé tyto nátěry v průběhu ohřevu shoří. Některé mohou indikovat dosažení maximální povrchové teploty. Tyto nátěry mají obecně absorpci kolem 90 % [4].



Obr. 5-1, Závislost absorpce kovových materiálů na vlnové délce laseru [10]

5.1.4 Výhody laserového povrchového kalení [4]:

- rychlá regulace výkonu laserového paprsku,
- laser může přivádět velkou energii v krátkém čase na určitou plochu a tím snížit celkové teplo přijaté materiálem. Tím se sníží rozměrové deformace,
- může ohřívat plochy, které nejsou běžnými technologiemi dostupné. Například u tvarově složitých nebo rozměrově velkých součástí,
- laser nevyžaduje použití speciálních atmosfér nebo vakua,
- laserový paprsek může být opticky pozměněn do různých geometrií.

5.1.5 Nevýhody laserového povrchového kalení [4]:

- pouze omezená hloubka prokalení,
- vysoká cena vybavení,
- nutnost velmi pečlivé analýzy využití laseru vzhledem k produktivitě.

5.1.6 Společnosti zabývající se laserovými úpravami povrchu

Je vhodné uvést alespoň některé společnosti zabývající se laserovým povrchovým kalením. Dále je nutné poznamenat, že většina firem zabývající se laserovou technologií nabízí i další služby v oboru laserových technologií.

- Matex PM, s.r.o, Plzeň – laserové kalení, laserové svařování, laserové navařování, nástříky aj.
- LaserTherm, s.r.o, Plzeň – laserové kalení, laserové svařování, laserové navařování aj.
- Nové technologie – výzkumné centrum, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň – laserové kalení, laserové navařování.

6 Srovnání technologií indukčního povrchového kalení a laserového povrchového kalení

Ke srovnání obou uvedených technologií povrchového kalení lze podle autora této práce přistupovat z pohledu mnoha hledisek. Ovšem nelze vždy jednoznačně posoudit, která z technologií je v jakém hledisku lepší. Je to způsobeno už samotným principem jednotlivých technologií, které se liší svou fyzikální podstatou. Nicméně některá vybraná srovnání budou uvedena.

6.1.1 Jakost zakalené vrstvy

Jedním z nejviditelnějších rozdílů výsledných zakalených vrstev mezi oběma technologiemi je jejich morfologie. Zatímco u technologie indukčního povrchového kalení, dochází k vytvoření zakalené vrstvy s přibližně konstantní hloubkou prokalení díky induktorům, které většinou kopírují tvar kalené součásti, u laserového povrchového kalení dochází k vytváření jednotlivých zakalených stop po průchodu paprsku laseru, který má omezenou plochu působení. Tyto stopy se navzájem překrývají, aby došlo k zakalení celého povrchu materiálu. V těchto překryvech dochází ke snížení tvrdosti zakalené vrstvy vlivem popouštění předchozí stopy laseru. V příčném průřezu materiálu se toto jeví jako vzájemně na sebe napojené kruhové úseče. Ve výsledku je tedy hloubka zakalené povrchové vrstvy u laserového povrchového kalení nerovnoměrná a tvrdost zakalené vrstvy měřené pod povrchem ve směru kolmém na průchodu laserového paprsku bude kolísat.

Ze samotného principu indukčního povrchového kalení, které využívá Foucaultovy vířivé proudy ke generaci tepla v materiálu a nutnosti využívání induktorů, plyne problém s povrchovým kalením tvarově složitých součástí. I přes výrobu tvarově složitých induktorů nelze vždy technologicky docílit prokalení všech tvarů. Za příklad může sloužit tvarově složitá forma na vstřikování plastů. Technologie povrchového kalení laserem je v tomto ohledu značně pružnější. Především využíváním robotických ramen je možno naprogramovat průchod laserového paprsku tak, aby došlo k zakalení celého povrchu součástí. Také u ostrých hran dosahuje technologie laserového povrchového kalení lepších výsledků než indukční povrchové kalení.

6.1.2 Rychlost ohřevu

Společným znakem obou technologií je přívod velkého množství energie na jednotkovou plochu. To dovoluje rychlou austenitizaci a rychlou homogenizaci austenitu díky vyšším kalícím teplotám. Nicméně zde existuje rozdíl ve velikosti přivedené energie na jednotku plochy, která může být u laserového povrchového kalení o několik řádů vyšší než u technologie indukčního povrchového kalení. Rychlý ohřev dovoluje vznik jemnozrnných zákalných struktur - především martenzitu, který potom vykazuje tvrdosti vyšší než u celoobjemového kalení.

Rychlost ohřevu ovlivňuje u laserového povrchového kalení také vlastnosti materiálu a to hlavně absorbita laserového záření. V závislosti na vlnové délce laseru a vlastnostech

materiálu dochází pouze k určité absorpci energie, která se transformuje na teplo. Zbytek záření je odražen. Zlepšit absorpci pomáhají speciální nátěry. Pomocí těchto nátěrů lze zlepšit průběh ohřevu.

Indukční povrchové kalení vykazuje značný pokles rychlosti ohřevu při dosažení a překročení Curieho teploty, kdy materiál ztrácí magnetické vlastnosti. Pro ohřev materiálu o jeden °C je potřeba více energie než pod Curieho teplotou.

6.1.3 Příprava výroby

Technologie indukčního kalení se neobejde bez výroby induktorů před samotnou výrobou a tedy při změně výroby musí být vyrobeny i nové induktory. Induktory jsou velmi namáhány elektrickým a tepelným tokem. Tím je jejich životnost omezena. Výroba induktorů je mnohdy založena na empirických znalostech výrobců. Protože dochází k tepelnému namáhání induktorů, je třeba je chladit, aby nedošlo k jejich poškození.

Zatímco technologie indukčního kalení vyžaduje použití speciálních induktorů, tak technologie laserového povrchového kalení žádné další předvýrobní přípravy nepotřebuje, kromě možnosti použití nátěrů pro zvýšení absorpce, jak bylo popsáno dříve. Zajímavou možností technologie povrchového kalení laserem je využití robotů, kteří jsou počítačově řízeni. Celý průběh kalení může být obsluhován počítačově pomocí speciálních programů, které využívají výkresy součástí z CAD programů. V rámci kusové výroby nebo výroby na zakázku je tato možnost velmi vítaná, protože se tak zrychlí výroba.

6.1.4 Chladicí média

Dalším z hledisek porovnání je využití médií pro ochlazování materiálu. Indukční povrchové kalení využívá mnoho různých ochlazovacích médií. Nejrozšířenější jsou bezesporu voda a oleje. Využívání chladicích médií klade na celou technologii další požadavky především spojené s ekologickou likvidací vzniklých odpadů při chlazení materiálu.

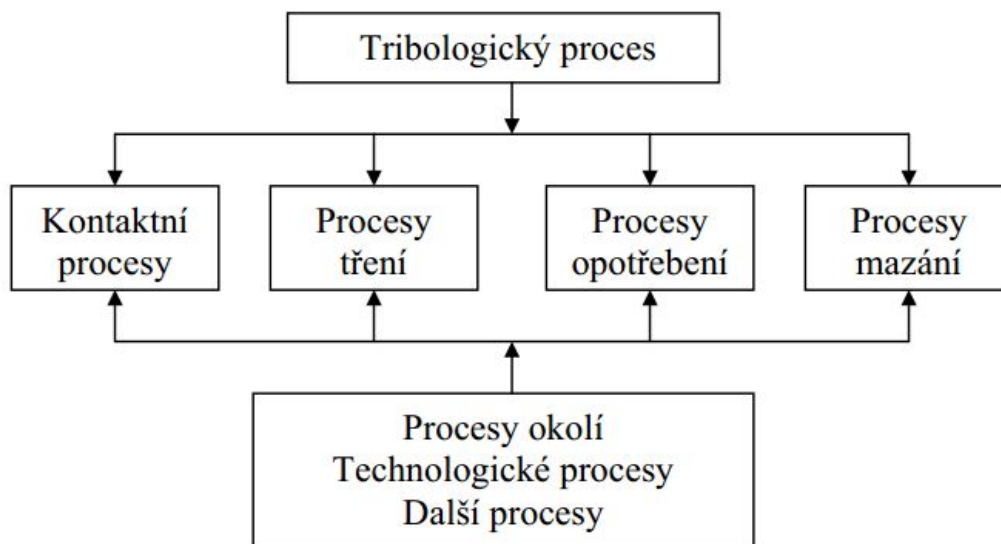
Technologie laserového povrchového kalení chladicí kapalná média jako taková nevyužívá. Vzhledem k velké přivedené energii na jednotku plochy dochází k velmi rychlému nárůstu teploty povrchu materiálu. Tento rychlý nárůst dá vzniknou velkému teplotnímu gradientu. Protože ohřev probíhá v řádech sekund, je teplo díky gradientu rychle odvedeno do středu materiálu a tedy rychlost ochlazování je rychlejší než kritická rychlost.

7 Tribologie

Pro experimentální část byla tribologická zkouška PIN-on-DISC vybrána z důvodu věrného napodobení smykového namáhání strojní součásti v provozu. Její výsledky vypovídají o odolnosti materiálu proti povrchovému opotřebení a tedy splňuje požadavek na hlavní výzkumnou činnost této práce.

Tribologie je interdisciplinární vědní obor, zabývající se interakcí materiálů, které se vůči sobě pohybují. Obecně může být tento pohyb kluzný, valivý, kmitavý nebo nárazový. Často se ve skutečnosti uplatňují dva i více pohybů [11].

Tribologický proces charakterizují materiální interakce třecích těles, mezilátky a okolí, které probíhají v prostoru a čase. Obecné vazby mezi jednotlivými částmi tribologického procesu jsou vidět na obrázku [11].



Obr. 7-1, Vazby tribologického procesu [11]

7.1.1 Tribologická analýza PIN-on-DISC

Principem této metody je vlačování tělíska (PIN) do povrchu materiálu určitou silou. Tento materiál, nejčastěji v podobě disku, rotuje. PIN nebo-li tělísko může mít tvar kuličky nebo válečku. Toto tělísko je vlačováno určenou silou do materiálu v určené vzdálenosti od osy rotace. Tím vytváří na povrchu materiálu kruhovou stopu. Tato stopa je pak základem k vyhodnocení tribologického testu [13].

Přístroj na kterém se tato metoda provádí se nazývá tribometr. Sestává se z disku se

sklíčidlem, do kterého se upíná materiál. Dále je zde elastické rameno schopné svou odchylkou zaznamenávat třecí součinitel mezi materiálem a tělískem. Na tomto ramenu je připevněn přípravek pro tělísko. Na rameno se přidává závaží, které definuje sílu, která vtlačuje tělísko do povrchu materiálu. Celé zařízení je propojeno s počítačem, na kterém se regulují otáčky a doba trvání zkoušky [13].

Faktory ovlivňující opotřebení a třecí koeficient [13]:

- mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu měřeného vzorku a kuličky,
- zatěžovací síla,
- velikost stykové plochy, průběh změny geometrie tělíska,
- stav a kvalita povrchu vzorku, případně mazací látky,
- teplota povrchu vzorku,
- počet cyklů,
- relativní rychlost mezi kuličkou a vzorkem,
- vliv prostředí (vlhkost, teplota).

7.1.2 Materiál PIN tělíska

Volba správného materiálu tělíska je jedním z klíčových parametrů, které ovlivní výsledek zkoušky. Jde především o tvrdost materiálu, ze kterého je tělísko vyrobeno. Často se k výrobě používá ocel ČSN 14 109. Tvrdost takového tělíska může být ovšem často nedostatečná. Je-li totiž zkoušený materiál tvrdší než tělísko, dochází k signifikantnímu opotřebení tělíska, které v tomto smyslu změní svou geometrii. Na tělísku se vytvoří ploška a poklesne tak tlak, který je na materiál vyvíjen. Nehledě na to, že materiál tělíska ulpívá ve stopě po tělísku a ztěžuje tak vyhodnocení stopy. Zkouška pak podává zkreslené výsledky. Možností jak zabránit změně styčné plochy tělíska a materiálu je použit jiný tvar tělíska. Možností je použit například váleček o malém průměru. Další možností je změna materiálu tělíska. Ovšem občas za volbou ocelového materiálu tělíska stojí snaha zachytit chování zkoušeného materiálu ve styku s ocelí [13].

Je-li cílem zkoušky zjistit odolnost materiálu proti opotřebení a to především abrazivnímu, je třeba vyrobit tělísko z keramiky. Aby bylo možné jednotlivé zkoušky porovnat je třeba dodržet stejné podmínky zkoušky (zatížení, rychlost otáčení vzorku, teplotu, vlhkost vzduchu, drsnost povrchu vzorku) [13].

7.1.3 Poloměr tribologické plochy

Poloměr, po kterém se pohybuje PIN tělísko, se projeví na velikosti opotřebení. Větší poloměr při zachování počtu cyklů prodlužuje dráhu, kterou tělísko vykoná. To má vliv na jeho opotřebení, které se následně promítá do vytvořené tribologické stopy [13].

Zmenšení poloměru pohybu, zkrátí dráhu vykonanou tělískem. Ovšem pro zachování relativní rychlosti je třeba zvýšit otáčky. Další problém při zmenšení poloměru je kumulace tepla. Teplo se při krátké dráze nemá čas odvádět. To má za následek nárůst teploty, která má vliv na průběh zkoušky [13].

7.1.4 Drsnost povrchů

Hodnota součinitele tření a velikosti opotřebení má jednoznačnou spojitost i s drsností styčných ploch. Nedodržením shodné charakteristiky povrchu se vnáší chyba do korelace výsledků zkoušky. Z toho důvodu je třeba sledovat jednotlivé parametry drsnosti povrchu a povrchového stavu vzorku z hlediska výskytu nejružnějších nečistot, včetně trhlin. Defekty na funkčních plochách mohou působit jako vruby vyvolávající koncentraci napětí při mechanickém i tepelném namáhání [12].

7.1.5 Průběh opotřebení povrchu

Obecně lze rozdělit průběh opotřebení do několika bodů [12]:

- Inicializace opotřebení – růst velikosti opotřebení a součinitele tření.
- Utváření kontaktních ploch – velké opotřebení a vysoký součinitel tření.
- Ustálený režim opotřebení – nízké opotřebení a nízký součinitel tření.

Během zkoušky PIN-on-DISC, při vzájemném pohybu dvou povrchů, vznikají vlivem nerovností a makročástic malé elementy, které pevně adhezně ulpívají na povrchu materiálu a vytvářejí souvislé i porušené vrstvičky. Materiál v místě kontaktu je podroben plastické deformaci a zpevnění. Tyto procesy souvisí s jakostí a vlastnostmi kontaktních ploch. Například při použití měkčího tělíska než je zkoušený materiál, dojde k adheznímu ulpívání tělíska v tribologické stopě. S tím souvisí následné zvětšení součinitele tření, kvůli zvýšení drsnosti styčné plochy. Tento jev negativně ovlivňuje správnost vyhodnocení opotřebení tribologické stopy [12].

7.1.6 Způsob vyhodnocení zkoušky

Vyhodnocení opotřebení po zkoušce PIN-on-DISC se provádí z tribologické stopy vzniklé po tělísku, které vykonalo určitý počet cyklů pod určitým zatížením. Pro vyhodnocení opotřebení je vhodné používat světelný nebo elektronový řádkovací mikroskop. Profil zkoumané tribologické stopy lze vyhodnocovat profiloměrem, či světelným mikroskopem s vhodným softwarem [12].

8 Impact test

Impact test je nová a rozvíjející se metoda testování povrchových vrstev materiálu. Reaguje na potřeby zkoumání povrchových vrstev materiálů při kontaktním dynamickém namáhání. Myšlenkou zkoušky Impact test je dynamické namáhání povrchu materiálu indentorem, který do povrchu naráží vysokou rychlostí a energií. Indentor postupně vyčerpá plastické deformace a začne docházet k degradačním jevům na povrchu. Celý tento proces doprovází vznik tzv. „Impact kráteru“, který je klíčový pro vyhodnocení zkoušky a zdrojem informací o průběhu samotné zkoušky [14].

8.1.1 Zkušební zařízení Impact testu

Zařízení pro zkoušku Impact test sestává z pohyblivého ramene, ve kterém je v přídržovači umístěna kulička nejčastěji z materiálu jako například karbid wolframu (WC). Rameno je uváděno do pohybu elektromagnetem, který rameno přitahuje. Síla vyvolaná magnetem urychluje rameno a to vrhá indentor proti materiálu. Rychlou změnou magnetického pole je rameno cyklicky přitahováno a odtahováno. K odtažení ramena do horní úvratí slouží soustava předepnutých pružin. Pomocí stavěcího šroubu je nastavena mezera mezi indentorem a materiálem v horní úvratí. Vymezením této mezery dochází k regulaci síly úderu indentoru do materiálu. Síla úderu je potom snímána piezoelektrickým snímačem umístěným ve stavitelném stolku, na kterém je upevněn materiál. Součástí celého zařízení je dále vzduchové chlazení cívky a ofukování místa vnikání indentoru do materiálu.

8.1.2 Impact kráter

Poškození povrchu materiálu vzniklé po úderech kuličky utváří prohlubeň zvanou Impact kráter. Impact kráter se skládá z několika oblastí, které procházejí různými ději opotřebení. Vyčerpáním plastických deformací povrchu dochází k nástupu dalších degradačních jevů zpevněného materiálu a mohou se tvořit trhliny, odlupy a podobně. Nejdůležitější pro vyhodnocení celé zkoušky je pak celková morfologie kráteru [14].

Proces vytvoření Impact kráteru lze rozdělit přibližně do 3 etap. V první etapě dochází k rychlému růstu kráteru. To je vyvoláno tvarem indentoru. Kulička působí v počátku velmi malou plochou na povrch materiálu. Vysoký tlak způsobí plastické deformace a tedy kráter roste. V druhé etapě se růst kráteru značně zpomalí, protože styčná plocha kuličky a materiálu je natolik velká, že tlak není dostatečný pro další plastické deformace. Samotný materiál se během tohoto procesu v nejbližším okolí kráteru zpevňuje a brání tak dalším plastickým deformacím. Poslední etapa je charakteristická tím, že se během ní vytvářejí trhliny a dochází k odlupování povrchových vrstev [14].

8.1.3 Vyhodnocení Impact kráteru [14]

Jak bylo zmíněno pro vyhodnocení je klíčová morfologie kráteru a to přesněji jeho hloubka a plocha. Provedením několika testů při stejném zatížení s různým počtem úderů na stejném materiálu, je možné získat představu o chování materiálu při kontaktním namáhání.

9 Experimentální program

Experimentální část bakalářské práce se zaměřuje na poměrně rozsáhlou a složitou problematiku vlivu výchozí struktury materiálu po tepelném zpracování na vlastnosti povrchově kalených vrstev různými technologiemi povrchového kalení. Předmětem zkoumání je především odolnost povrchově kalených vrstev proti opotřebení. Vzhledem k těmto požadavkům a s ohledem na vybavenost Katedry materiálu a strojírenské metalurgie byl navržen experimentální program, který si klade za cíl pomocí akademických zkoušek porovnat odolnost povrchově kalených vrstev různých materiálů s různou výchozí strukturou po tepelném zpracování.

Jako výchozí materiály byly zvoleny tři materiály konvenčně využívané pro povrchové kalení a to přesněji materiály ČSN 41 2050, ČSN 41 6343 a ČSN 41 9573. Materiály byly zvoleny i vzhledem k jejich různému využití ve strojírenském průmyslu. Každý materiál převzatý od dodavatelů byl podroben metalografickému zkoumání, kde se hodnotila výchozí struktura ve dvou na sobě kolmých směrech. To především z důvodu zda-li se neobjeví nerovnoměrnosti protváření materiálu, které by měly vliv na izotropii materiálu a mohly tak ovlivnit výsledky zkoušek. Dále byla měřena makrotvrдость materiálu dle Vickerse.

V další části experimentálního programu bylo zvoleno výchozí tepelné zpracování materiálů. Každý materiál byl objemově tepelně zpracován do 3 stavů. Byly zvoleny takové stavy po tepelném zpracování, které se běžně dodávají od výrobců a nebo stavy, které jsou vhodné pro následné povrchové kalení. S ohledem na vlastnosti materiálů a jejich chemického složení nemohly být stavy zvoleny u všech materiálů zcela totožné. Protože jsou materiály využívány pro různé účely ve strojírenském průmyslu není tento rozdíl ani nijak podstatný. Na tepelně zpracovaných materiálech byla provedena metalografie a vyhodnocení mikrostruktury ve dvou na sobě kolmých směrech. Dále byla vyhodnocena makrotvrдость dle Vickerse.

Pro samotné povrchové kalení byly zvoleny dvě technologie povrchového kalení - povrchové kalení laserem a indukční povrchové kalení. Technologie byly zvoleny z důvodu progresivity a využití v automatizovaných výrobních linkách. Výše zmíněné technologie již byly porovnány v předchozích statích bakalářské práce. Experimentální materiál byl laserem povrchově kalen ve společnosti Matex PM, s.r.o v Plzni a indukční povrchové kalení proběhlo ve společnosti Martenzit, s.r.o v Kutné Hoře. Vzhledem k tomu, že obě společnosti jsou komerčními subjekty, nebylo možné zjistit zcela přesné parametry povrchového kalení. Z toho důvodu se v práci vychází z předpokladu, že materiály byly kaleny za stejných nebo velmi blízkých podmínek ohřevu a ochlazování dle potřeby každé jednotlivé technologie.

Zkoušky kterým se experimentální materiál podrobil byly vybrány tak, aby se k jejich výsledkům dalo přihlídnout při výběru vhodného materiálu v průmyslové praxi. Tyto zkoušky se snaží simulovat namáhání, které se běžně vyskytuje na povrchu u strojních součásti. Vzhledem k těmto podmínkám, ale i vzhledem k dostupnému zařízení byly zvoleny zkoušky Impact test a tribologická zkouška „PIN-on-DISC“.

Experimentální materiál byl po povrchovém tepelném zpracování hodnocen pomocí metalografie (mikrostruktura). Dále byla měřena mikrotvrdost zakalených vrstev a také byla stanovena smluvní hloubka prokalení po povrchovém ohřevu dle normy ČSN EN 10328. Následně byl experimentální materiál podroben tribologické zkoušce PIN-on-DISC a zkoušce Impact test.

9.1 Experimentální materiál

Ze experimentální materiál byly zvolené oceli uvedené v tabulce 9-1. Vybrané materiály se hodí k povrchovému kalení především díky jejich vhodnému chemickému složení. Polotovar dodaný od výrobce byl ve formě pásoviny.

Experimentální materiál	
Značení dle ČSN	Značení dle DIN
ČSN 41 2050	C45
ČSN 41 6343	34CrNiMo6
ČSN 41 9573	X155CrVMo12.1

Tab. 9-1, Značení experimentálního materiálu

Pro přehlednost značení se v práci bude používat značení dle ČSN.

9.2 Materiál ČSN 41 2050

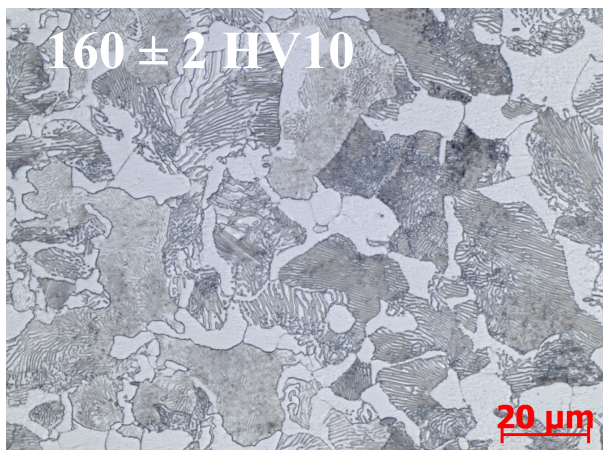
Ocel ČSN 412050 je materiál vhodný k zušlechťování a povrchovému kalení. Má široké využití ve výrobě strojních součástí jako jsou větší ozubená kola, pístnice, ojnice, čepy, šrouby, případně turbokompresory apod..

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

Obr. 9-2, Chemické složení oceli ČSN 41 2050 dle materiálových listů [15]

9.2.1 Výchozí struktura ČSN 41 2050

Výchozí strukturu v příčném řezu s naměřenou makrotvrdostí lze pozorovat na obrázku 9-3. Struktura dodaného materiálu byla perliticko - feritická.



Obr. 9-1 , Výchozí struktura materiálu ČSN 41 2050,
perliticko - feritická struktura, leptáno Nital 3%, zvětšeno
500x

9.2.2 Tepelné zpracování ČSN 41 2050

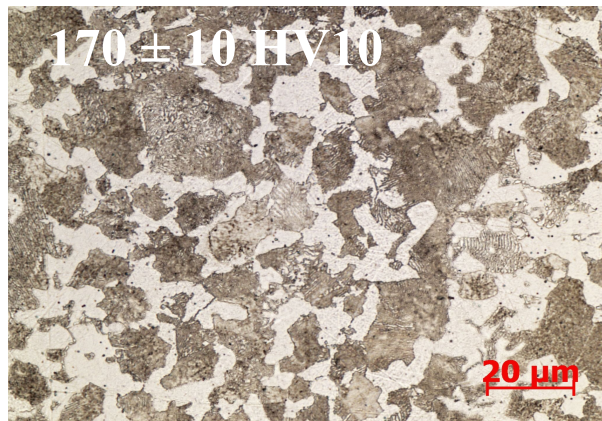
Materiálu ČSN 41 2050 byl tepelně zpracován na 3 různé stavy po tepelném zpracování dle normy ČSN. Na stav normalizačního žihání ČSN 41 2050.1, žihání na měkko ČSN 41 2050.3 a zušlechtnění ČSN 41 2050.6.

Materiál	Parametry tepelného zpracování
ČSN 41 2050.1	vloženo do vyhřáté pece na 850 °C, výdrž na teplotě 55 minut, ochlazeno na vzduchu
ČSN 41 2050.3	vloženo do vyhřáté pece na 680 °C, výdrž na teplotě 6,5 hodiny, ochlazeno v peci
ČSN 41 2050.6	vloženo do vyhřáté pece na 820 °C, výdrž na teplotě 55 minut, kaleno do vody, popouštěno při teplotě 550 °C po dobu 3 hodin, ochlazeno na vzduchu

Tab. 9-3, Parametry tepelného zpracování oceli ČSN 41 2050

9.2.3 ČSN 41 2050.1

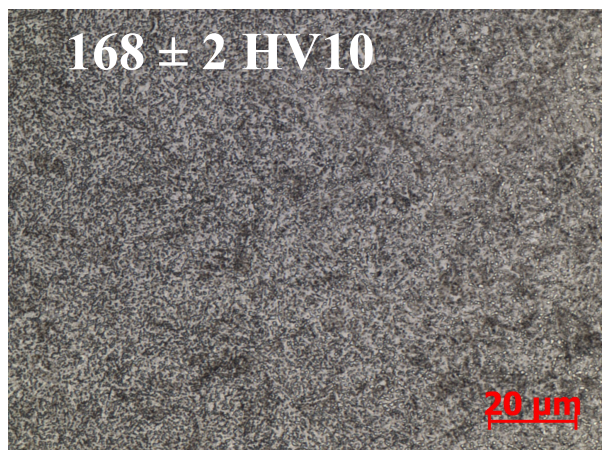
Mikrostruktura materiálu ČSN 41 2050 po normalizačním žhání byla perliticko-feritická. Strukturu lze pozorovat na obrázku 9-2.



Obr. 9-2, Struktura materiálu ČSN 41 2050.1, perliticko - feritická struktura, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

9.2.4 ČSN 41 2050.3

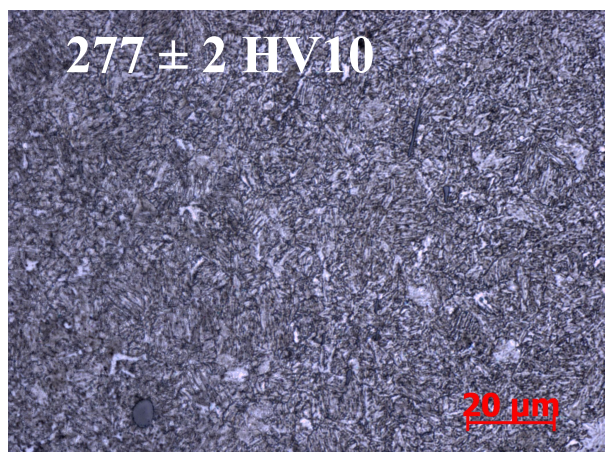
Žháním na měkko byla dosažena u materiálu ČSN 41 2050 perliticko - feritická struktura s jemným globulárním perlitem. Strukturu lze pozorovat na obrázku 9-3.



Obr. 9-3, Struktura materiálu ČSN 41 2050.3, jemná feriticko-perlitická struktura s globulárním perlitem, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

9.2.5 ČSN 41 2050.6

Po zušlechtění materiálu ČSN 41 2050 bylo dosaženo sorbitické struktury. Strukturu lze pozorovat na obrázku 9-4.



Obr. 9-4, Struktura materiálu ČSN 41 2050.6, sorbitická struktura, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

9.3 Materiál ČSN 41 6343

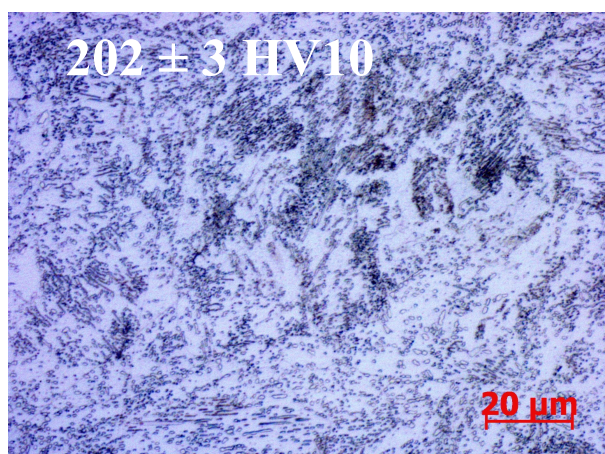
Ocel ČSN 41 6343 je legovaná ocel vhodná k zušlechtování. Využívá se ke konstrukci značně namáhaných strojních součástí, jako jsou kompresorová a turbinová kola, kardanové hřídele, ozubená kola apod.

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S
0,32–0,40	0,50–0,80	0,15–0,40	1,30–1,70	1,30–1,70	0,20–0,30	max 0,035	max 0,035

Obr. 9-4, Chemické složení oceli ČSN 41 6343 dle materiálových listů [16]

9.3.1 Výchozí struktura materiálu ČSN 41 6343

Výchozí strukturou materiálu ČSN 41 6343 dodaného od výrobce byla feriticko – perlitická struktura s globulárním perlitem. Strukturu lze pozorovat na obrázku 9-5.



Obr. 9-5, Výchozí materiálu ČSN 41 634, feriticko - perlitická struktura s globulárním perlitem, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

9.3.2 Tepelné zpracování materiálu ČSN 41 6343

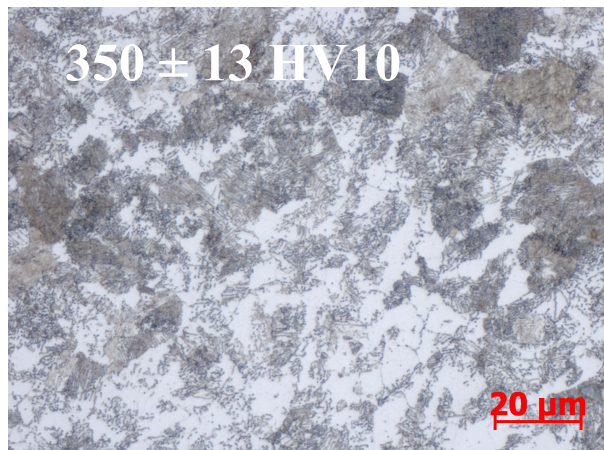
Materiál ČSN 41 6343 byl tepelně zpracován do stavů dle ČSN žihání na měkko ČSN 41 6343.3, zušlechťování ČSN 41 6343.6 a základního žihání ČSN 41 6343.0

Materiál	Parametry tepelného zpracování
ČSN 41 6343.0	vloženo do vyhřáté pece na 850 °C, výdrž na teplotě 50 minut, ochlazen v peci
ČSN 41 6343.3	vloženo do vyhřáté pece na 680 °C, výdrž na teplotě 6,5 hodiny, ochlazen v peci
ČSN 41 6343.6	vloženo do vyhřáté pece na 850 °C, výdrž na teplotě 50 minut, kaleno do vody, popuštěno při 550 °C po dobu 3 hodin, ochlazen na vzduchu

Tab. 9-5, Parametry tepelného zpracování oceli ČSN 41 6343

9.3.3 ČSN 41 6343.0

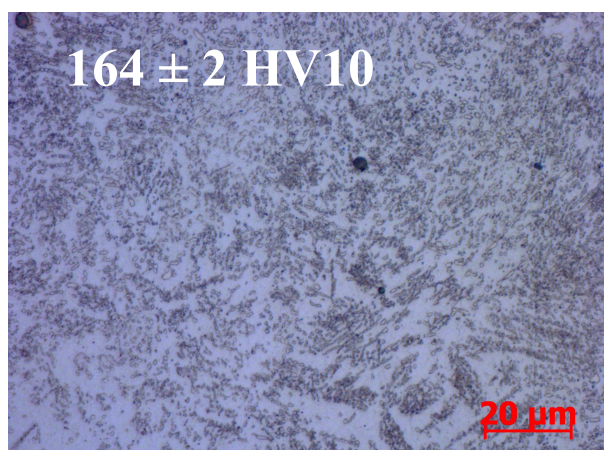
Materiál ČSN 41 6343 po základním žhání získal feriticko - perlitickou strukturu s částečně lamelárním a globulárním perlitem. Strukturu lze pozorovat na obrázku 9-6.



Obr. 9-6, Struktura materiálu ČSN 41 6343.0, feriticko-perlitická struktura s lamelárním a globulárním perlitem, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

9.3.4 ČSN 41 6343.3

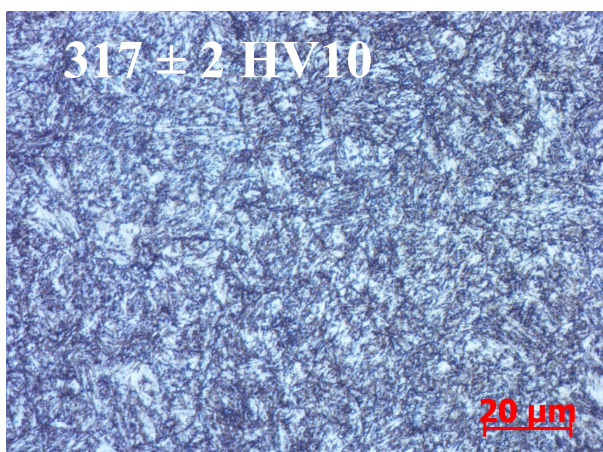
Žháním na měkko bylo u materiálu ČSN 41 6343 dosaženo feriticko - perlitické struktury s globulárním perlitem. Strukturu lze pozorovat na obrázku 9-7.



Obr. 9-7, Struktura materiálu ČSN 41 6343.3, feriticko-perlitická struktura s globulárním perlitem, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

9.3.5 ČSN 41 6343.6

Zušlechtním materiálu ČSN 16343 bylo dosaženo sorbitické struktury. Strukturu lze pozorovat na obrázku 9-8.



Obr. 9-8, Struktura materiálu ČSN 41 6343.6, sorbitická struktura, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

9.4 Materiál ČSN 41 9573

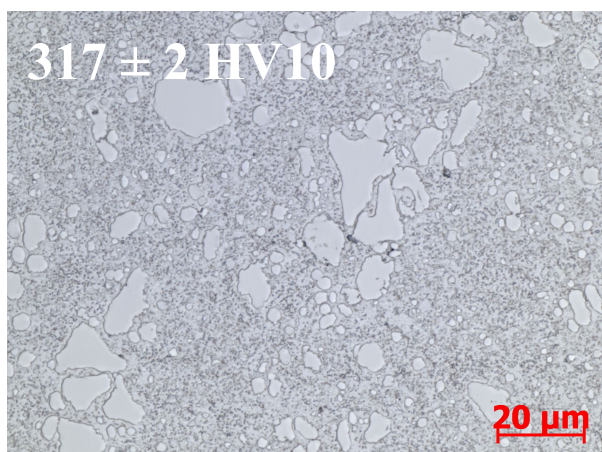
Materiál ČSN 41 9573 je vysokolegovaná ocel, která se používá na výrobu nástrojů pro stříhání za studena, nástrojů pro tváření za studena a dále na výrobu forem pro tváření plastů.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V
1,40–1,65	0,20–0,45	0,20–0,45	max 0,030	max 0,035	11,0–12,5	0,60–0,95	0,80–1,20

Obr. 9-6, Chemické složení oceli ČSN 41 9573 dle materiálových listů [17]

9.4.1 Výchozí struktura materiálu ČSN 41 9573

Materiál ČSN 41 9573 byl dodán od výrobce s feriticko - perlitickou strukturou s globulárním perlitem. Strukturu lze pozorovat na obrázku 9-9.



Obr. 9-9, Struktura materiálu ČSN 41 9573, feriticko - perlitická struktura , leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

9.4.2 Tepelné zpracování materiálu ČSN 41 9573

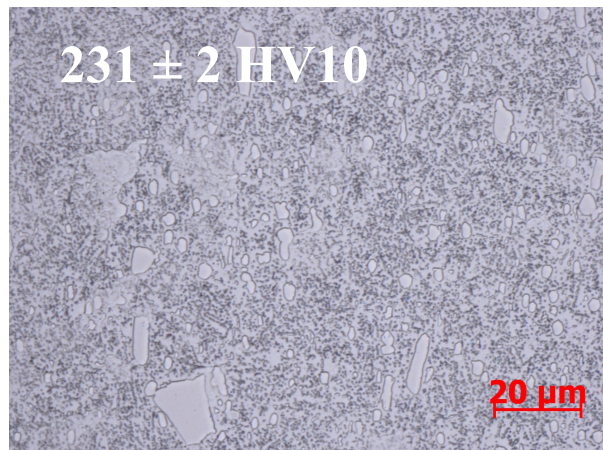
Materiál ČSN 41 9573 byl tepelně zpracován do stavů ČSN 41 6343.3 a do zušlechtěných stavů s označením ČSN 41 9573 T1 a ČSN 41 9573 T2.

Materiál	Parametry tepelného zpracování
ČSN 41 9573.3	vloženo do vyhřáté pece na 770 °C, výdrž na teplotě 7 hodin, ochlazen v peci, rychlost ochlazování 12 °C/hod
ČSN 41 9573 T1	vloženo do vyhřáté pece na 980 °C, výdrž na teplotě 40 minut, kaleno do oleje, popuštěno při 300 °C po dobu 3 hodin
ČSN 41 9573 T2	vloženo do vyhřáté pece na 1070 °C, výdrž na teplotě 40 minut, kaleno do oleje, popuštěno při 520 °C po dobu 3 hodin

Tab. 9-7, Parametry tepelného zpracování oceli ČSN 41 9573

9.4.3 ČSN 41 9573.3

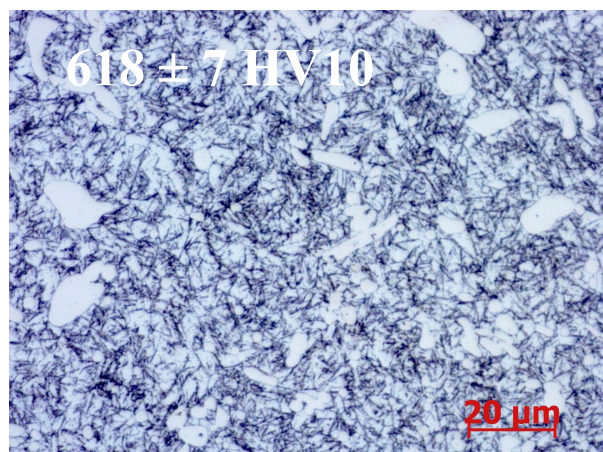
Mikrostruktura materiálu ČSN 41 9573.3 je feriticko - perlitická struktura s globulárním perlitem a výraznými karbidy. Strukturu lze pozorovat na obrázku 9-10.



Obr. 9-10, Struktura materiálu ČSN 41 9573.3, feriticko - perlitická struktura s globulárním perlitem a karbidy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

9.4.4 ČSN 41 9573 T1

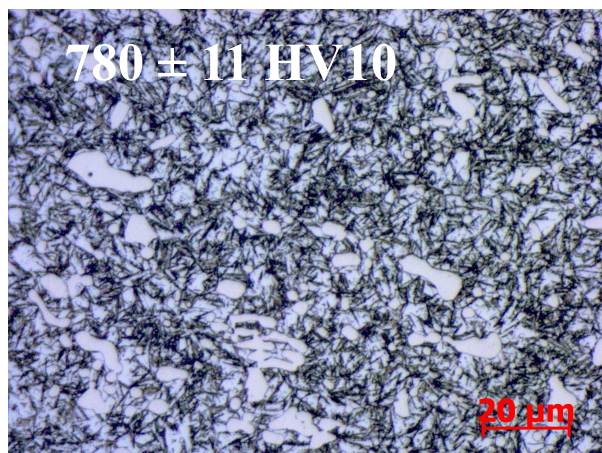
Materiál ČSN 41 9573 T1 byl zušlechtěn. Výsledná struktura je martenzitická struktura s karbidy. Strukturu lze pozorovat na obrázku 9-11.



Obr. 9-11, Struktura materiálu ČSN 41 9573 T1, martenzitická struktura s karbidy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

9.4.5 ČSN 41 9573 T2

Materiál ČSN 41 9573 T1 byl zušlechtěn a jeho výslednou strukturou byla martenzitická struktura. Strukturu lze pozorovat na obrázku 9-12.



Obr. 9-12, Struktura materiálu ČSN 41 9573 T2, martenzitická struktura s karbidy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

9.5 Povrchové kalení experimentálních materiálů

Experimentální materiál byl zakalen ve společnostech Martenzit, s.r.o (indukční povrchové kalení) a Matex PM, s.r.o (laserové povrchové kalení). Vzhledem k citlivosti údajů ohledně procesních parametrů povrchového kalení, nebyly tyto hodnoty poskytnuty a nebudou tak ani uvedeny v obsahu bakalářské práce.

9.5.1 Zpracování vzorků po povrchovém kalení

Povrchové kalení bylo provedeno na vzorcích tvaru kvádrů o přibližných rozměrech 100x100x20 mm (délka x šířka x výška). Povrchově kalena byla vždy jenom jedna z ploch o rozměrech 100x100 mm.

Po povrchovém zakalení byly odebrány dva menší vzorky ze středu původního kvádrů. Každý ze dvou vzorků měl dále specifické využití. První ze vzorků byl zalisován do zalisovací hmoty a byl proveden příčný metalografický výbrus, stanovena smluvní hloubka prokalení po povrchovém ohřevu dle normy ČSN EN 10328 a následně byl podroben metalografické analýze. Povrch zakalené vrstvy druhého vzorku byl šetrně zbaven okují na strojních bruskách s ohledem na to, že do kalené vrstvy se nesmělo vnést příliš mnoho tepla, které by ovlivnilo vlastnosti kalených vrstev. Následně byl povrch leštěn diamantovými emulzemi o velikosti zrn 3 μm. Takto připravený vzorek materiálu byl dále podroben zkoušce

PIN-on-DISC a Impact testu.

Protože morfologie kalených vrstev po laserovém povrchovém kalení se liší od vrstev kalených indukčním povrchovým kalením (viz. 6.1.1), byla u těchto vrstev hodnocena pouze nejsilnější část vrstvy. Hodnotit jak se mění opotřebení se změnou tloušťky vrstvy, případně v překryvech jednotlivých laserových stop je mimo rozsah této bakalářské práce, ovšem může sloužit jako námět pro další výzkumnou činnost.

Mikrostruktury povrchově kalených materiálů spolu s hodnotami makrotvrdostí, smluvních hloubek prokalení a mikrotvrdostí jsou umístěné v části práce – kapitola 13: Struktury materiálů po povrchovém kalení laserem (Příloha č.1) a kapitola 14: Struktury materiálů po povrchovém kalení (Příloha č.2).

9.6 Tribologická zkouška PIN-on-DISC

9.6.1 Návrh parametrů zkoušky

Tribologická zkouška PIN-on-DISC byla provedena na univerzitním zařízení, tribometru, na katedře Materiálu a strojírenské metalurgie.

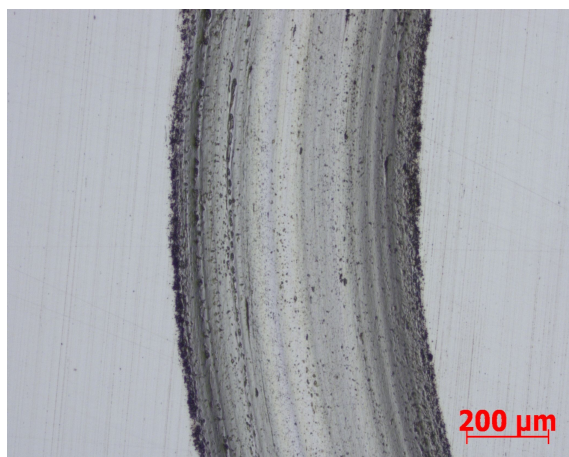
Navržené parametry tribologické zkoušky PIN-on-DISC

Zatěžující síla [N]	10
Počet cyklů [-]	20000
Poloměr tribologické stopy [mm]	2
Otáčky [min^{-1}]	254

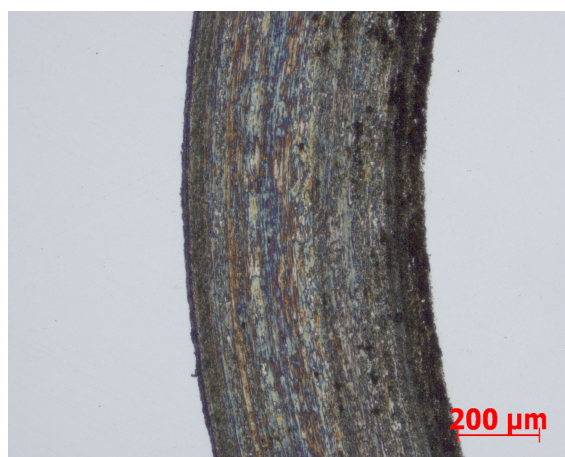
Tab. 9-8, parametry tribologické zkoušky PIN-on-DISC

9.6.2 Měření a vyhodnocení tribologických stop

Měření tribologických stop proběhlo na světelném mikroskopu Carl Zeiss Z1M vybaveným softwarem AxioVision, který obsahoval modul Topography pro vyhodnocování profilu povrchu materiálu. Tímto modulem byla nasnímána tribologická stopa. Výsledkem snímání byla reciproká křivka popisující profil stopy. Výpočtem plochy pod křivkou byl vypočten odebraný materiál (ve 2D) při tribologické zkoušce v daném místě tribologické stopy. Měření bylo opakováno na více místech tribologické stopy a z jednotlivých ploch byl vypočten aritmetický průměr. Takto vypočtená plocha potom charakterizovala velikost opotřeбенí materiálu.

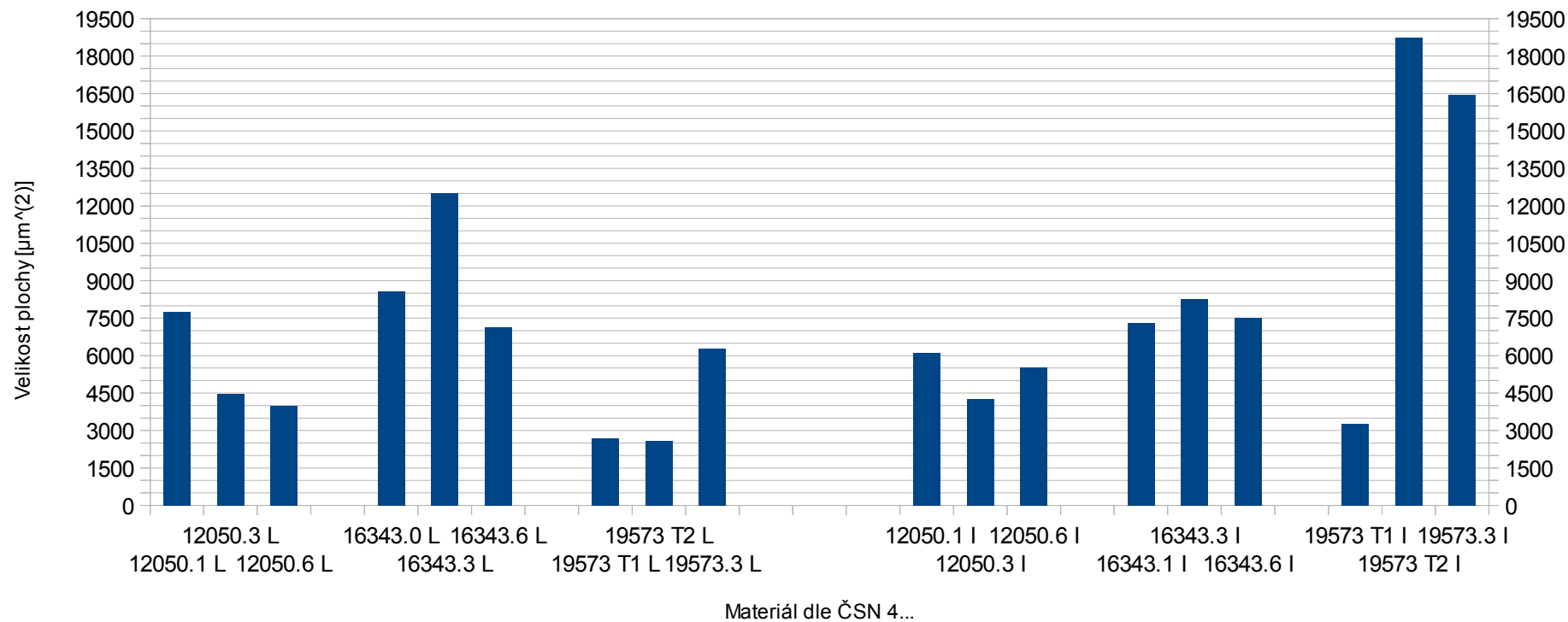


Obr. 9-13, tribologická stopa, materiál ČSN 41 2050.3 ,indukčně povrchově kaleno, zvětšeno 50x



Obr. 9-14, tribologická stopa, materiál ČSN 41 9573 T1 ,laserově povrchově kaleno, zvětšeno 50x

Velikost opotřebení materiálu po zkoušce PIN-on-DISC



Obr. 9-15, Graf opotřebení povrchu materiálu po tribologické zkoušce PIN-on-DISC

9.6.3 Diskuze výsledků tribologické zkoušky

Z předcházejícího grafu (obr. 9-15) je vidět několikanásobně vyšší opotřebení indukčně kalených materiálů ČSN 41 9573 T2 a ČSN 41 9573.3. Toto vysoké opotřebení bylo velmi překvapivé a proto bylo nutné prověřit okolnosti, které mohly k těmto výsledkům vést.

Byla provedena nová tribologická zkouška na obou materiálech. U materiálu ČSN 41 9573 T2 nové měření potvrdilo, že skutečně k takto vysokému opotřebení došlo a nejednalo se o chybu měření. U druhého zkoumaného materiálu (ČSN 41 9573.3), vyšla druhá zkouška výrazně odlišně než při prvním měření. Kvůli zpřesnění výsledků a vyvrácení chyby měření byla provedena na indukčně kaleném materiálu ČSN 41 9573.3 třetí tribologická zkouška. Ta neprokázala správnost prvního nebo druhého výsledku. To vedlo k hledání hlubších příčin vzniku tohoto opotřebení.

První navrženou metodou, která by mohla napovědět řešení tohoto problému, bylo měření povrchové tvrdosti materiálů. Při měření indukčně povrchově kalených materiálů ČSN 41 9573 T2 a ČSN 41 9573.3 byl objeven trend snižující se tvrdosti vždy v určitém směru měření. Indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 9573 T2 vykazoval podobnou míru opotřebení v obou tribologických testech z toho důvodu, že tribologické stopy ležely na spojnici, která měla přibližně konstantní tvrdost. Tedy se dá usuzovat na podobné podmínky při kterých opotřebení vzniklo. Oproti tomu indukčně kalený materiál ČSN 41 9573.3 u druhého a třetího měření tribologické stopy vykazovaly zcela jiný výsledek (nižší opotřebení).

Do souvislosti s opotřebením indukčně kaleného materiálu ČSN 41 9573 T2 je třeba zařadit několik dalších poznatků z předchozích měření. Jde především o měření mikrotvrdosti zakalené vrstvy, které jednak naměřenými hodnotami a jednak průběhem tvrdosti (Obr. 9-16) naznačují, že povrchová vrstva materiálu byla místo zakalení popuštěna. Tento závěr potvrzuje i tvrdost materiálu měřená před a po indukčním povrchovým kalením. Tvrdost základního materiálu po tepelném zpracování byla vyšší (780 HV10) než po indukčním povrchovém kalení (630 HV10). Zde se nabízejí tři možnosti, které mohli vést k této situaci. První jsou nesprávné parametry ohřevu při indukčním povrchovém kalení, druhou je použití nesprávného induktoru, který nepokryl celou plochu vzorku a tedy nedošlo k rovnoměrnému zakalení povrchu. Nakonec třetí možností by mohlo být nesprávné tepelné zpracování, kdy obsluha pece vzorek po kalení nepoustila.

U indukčně povrchově kaleného materiálu ČSN 41 9573.3 nelze hovořit o popuštění kalené vrstvy, protože všechna měření tvrdosti povrchové vrstvy byly vyšší než u materiálu před povrchovým kalením. Zde je pravděpodobnou příčinnou proměnného opotřebení nerovnoměrná tvrdost povrchu indukčně kaleného materiálu ČSN 41 9573.3. K takto velké nerovnoměrnosti zakalení mohlo dojít použitím nevhodně tvarovaného induktoru, dále pak například nevhodným chlazením povrchu materiálu, kde nemuselo dojít k překročení kritické rychlosti ochlazování.

Dalším materiálem, který dosáhl vysokého opotřebení je laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 6343.3. V mikrostruktuře povrchově kalené vrstvy byla zjištěna přítomnost

Widmanstattenovi struktury. Tato struktura snižuje houževnatost materiálu a je možné v ní hledat přímou souvislost s vysokým opotřebením povrchové vrstvy. Výskyt Widmanstattenovi struktury ukazuje na nesprávnou rychlost ochlazování.

Z grafu (obr. 9-15) vyplývá, že nejmenšího opotřebení dosáhly laserem povrchově kalené materiály ČSN 41 9573 T2 a ČSN 41 9573 T1. Dalším v pořadí je indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 9573 T1.

V zájmu nezkreslení výsledků z celkového hodnocení budou vynechány indukčně povrchově kalené materiály ČSN 41 9573 T2 a ČSN 41 9573.3. Potom ocel ČSN 41 9573 je ocelí s nejmenším celkovým opotřebením jak při povrchovém kalení laserem tak indukci. Následuje ocel ČSN 41 2050 a nakonec ocel ČSN 41 6343.

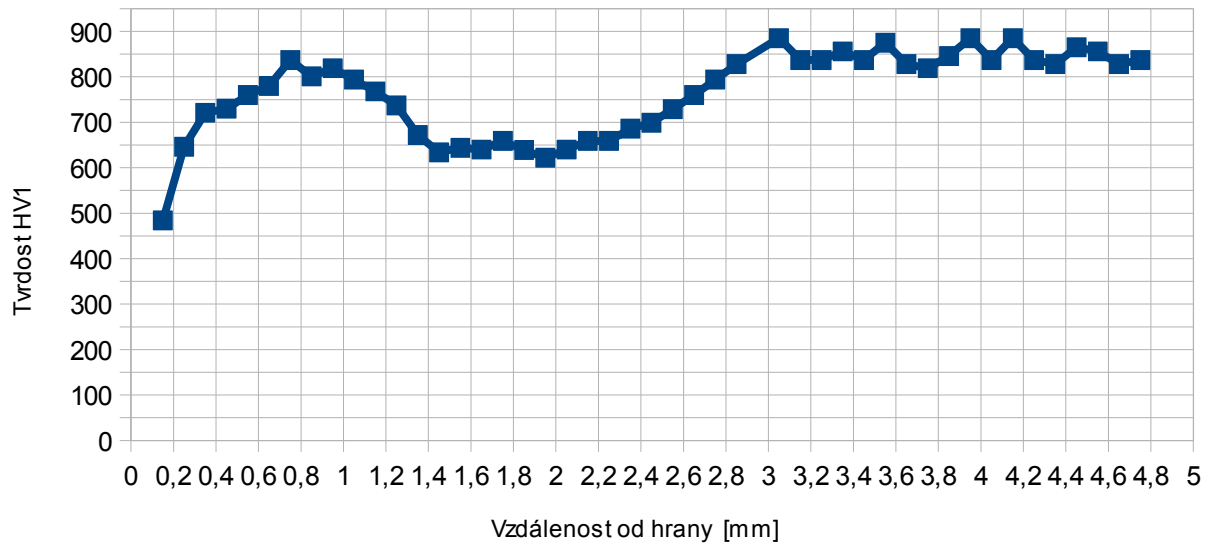
Celkovým porovnáním velikosti opotřebení v závislosti na technologii dosahuje laserové povrchové kalení nižšího opotřebení než indukční povrchové kalení.

U oceli ČSN 41 2050 dosáhl nejnižšího opotřebení laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 2050.6. U obou technologií povrchového kalení aplikovaných na materiálu ČSN 41 2050 dosáhla výchozí struktura po žihání na měkko (ČSN 41 2050.3) nejmenšího opotřebení. Naopak nejvyššího dosáhla výchozí struktura po normalizačním žihání (ČSN 41 2050.1).

Materiál ČSN 41 6343 dosáhl nejnižšího opotřebení laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 6343.6 a tato výchozí struktura dosáhla i průměrného nejnižšího opotřebení při aplikaci obou technologií. Nejvyššího opotřebení dosáhla výchozí struktura ČSN 41 6343.3 u obou technologií povrchového kalení. Celkově materiál ČSN 41 6343 vykazoval ze všech materiálů a obou použitých technologií povrchového kalení nejvyšší míru opotřebení.

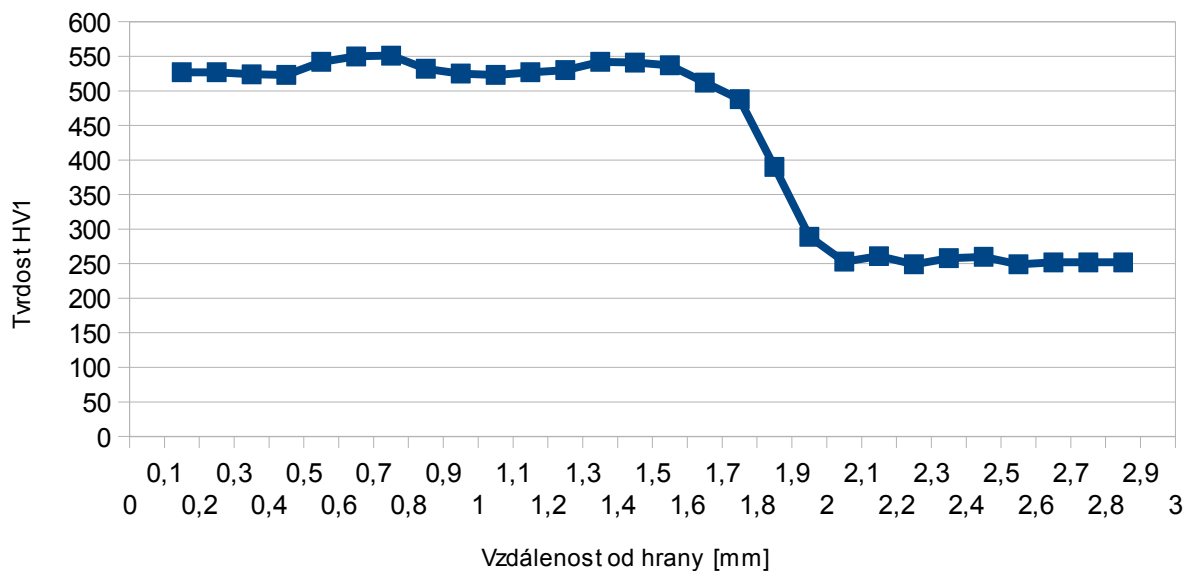
Při porovnání materiálů ČSN 41 9573 dosáhl nejnižšího opotřebení indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 9573 T1. Materiály po indukčním povrchovém kalení ČSN 41 9573.3 a ČSN 41 9573 T2 lze těžko zařazovat do výsledného porovnání vzhledem k nerovnoměrně zakalenému povrchu s proměnnou tvrdostí. Bez výsledků těchto dvou materiálů by materiál ČSN 41 9573 dosáhl nejnižšího opotřebení v porovnání s ostatními materiály a technologiemi.

Mikrotvrдость, materiál ČSN 41 9573 T2, indukční povrchové kalení



Obr. 9-16, Mikrotvrđost zakalené vrstvy v závislosti na hloubce od povrchu, mat. ČSN 41 9573 T2

Mikrotvrđost, materiál ČSN 41 9573.3, indukční povrchové kalení



Obr. 9-17, Mikrotvrđost zakalené vrstvy v závislosti na hloubce od povrchu, mat. ČSN 41 9573.3

9.7 Impact test

9.7.1 Návrh parametrů zkoušky

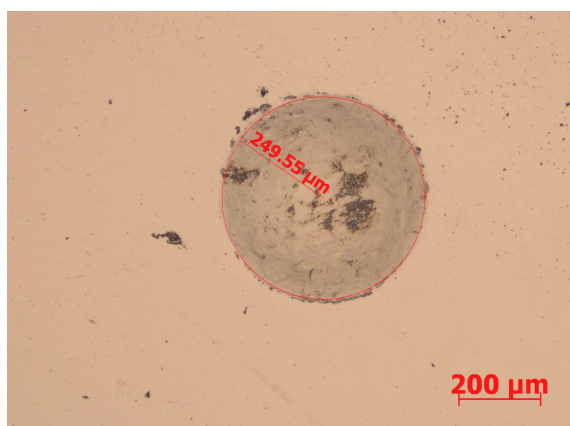
Pro zkoušku Impact test byla navržena série testů se stejnou zátěží ovšem různým počtem úderů indentoru do povrchu materiálu. Tato série měla za úkol vystihnout trend chování materiálu vzhledem k proměnnému počtu úderů. Z tohoto trendu lze vypočítat, jak dochází k zpevnování materiálu a jiným doprovodným dějům při zkoušce Impact test.

Zátěžná síla [N]	400
Počty cyklů [-]	1000; 2000; 5000; 10000

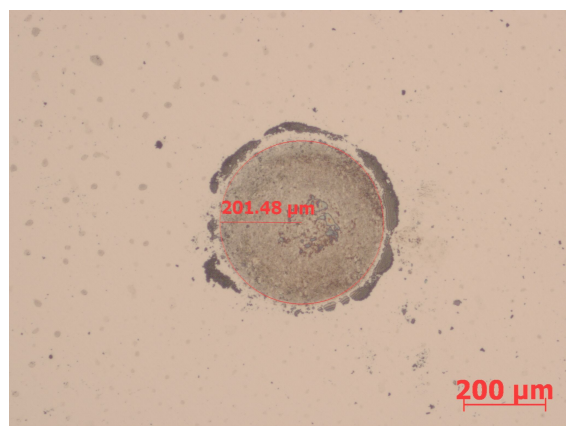
Tab. 9-9, Parametry zkoušky Impact test

9.7.2 Měření a vyhodnocení impact kráterů

Impact krátery byly vyhodnoceny na světelném mikroskopu Carl Zeiss Z1M, vybaveným softwarem AxioVison. Byly využity standardní nástroje softwaru pro měření vzdáleností a průměrů. Z naměřených poloměrů Impact kráterů, byla vypočtena plocha kráteru. Vypočtené plochy kráterů potom sloužily k porovnání opotřebení jednotlivých povrchově kalených materiálů.



Obr. 9-18, Impact kráter, materiál ČSN 41 2050.1, indukčně povrchově kaleno, zvětšeno 50x

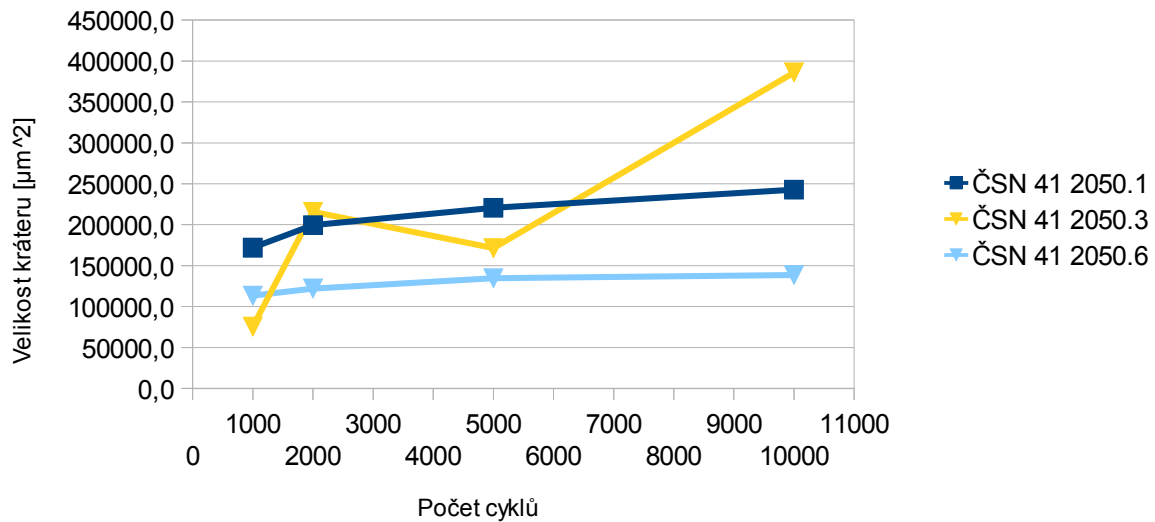


Obr. 9-19, Impact kráter, materiál ČSN 41 9573 T1, laserově povrchově kaleno, zvětšeno 50x

9.7.3 Grafické znázornění výsledků

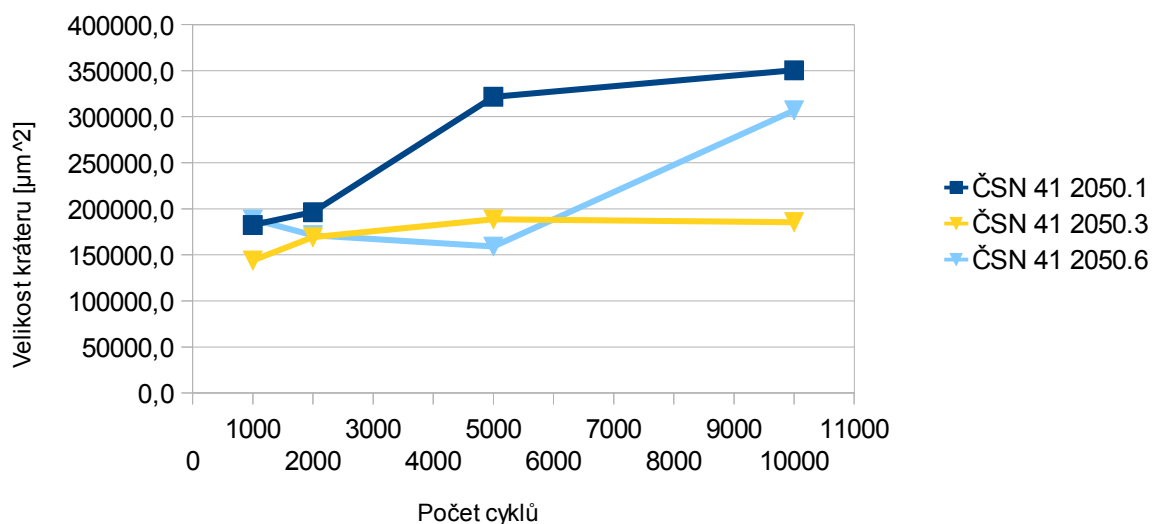
Výsledky Impact testu byly vyneseny do grafů, které znázorňují velikost opotřebení (velikost plochy impact kráteru) v závislosti na počtu vykonaných cyklů. V každém grafu jsou vyneseny hodnoty jednoho materiálu ve třech různých stavech po tepelném zpracování a jednou technologií povrchového kalení.

Materiál ČSN 41 2050, Indukční povrchové kalení



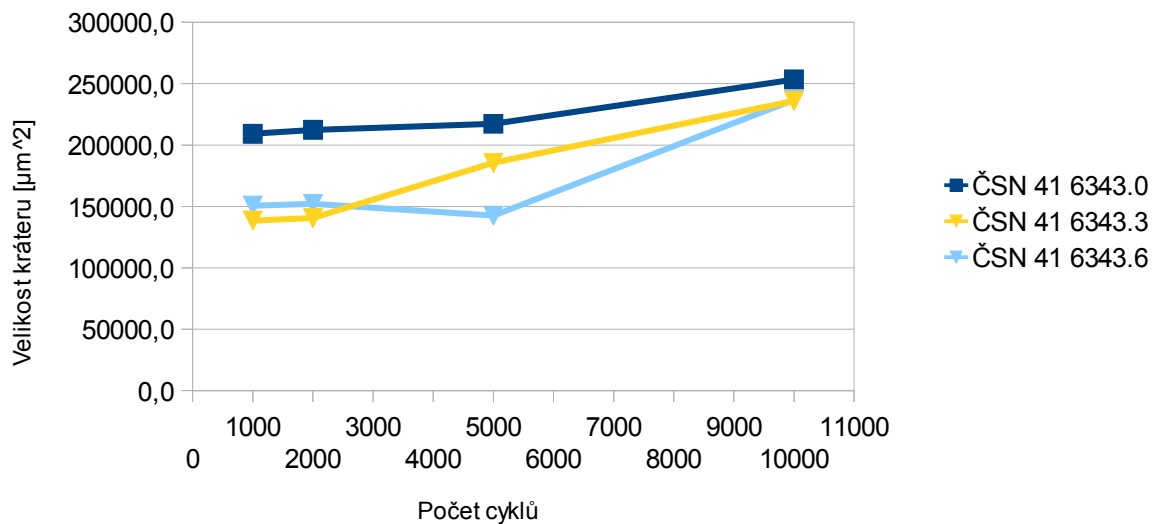
Obr. 9-20, Graf opotřebenění materiálu ČSN 41 2050 po Impact testu, indukční povrchové kalení

Materiál ČSN 41 2050, Laserové povrchové kalení



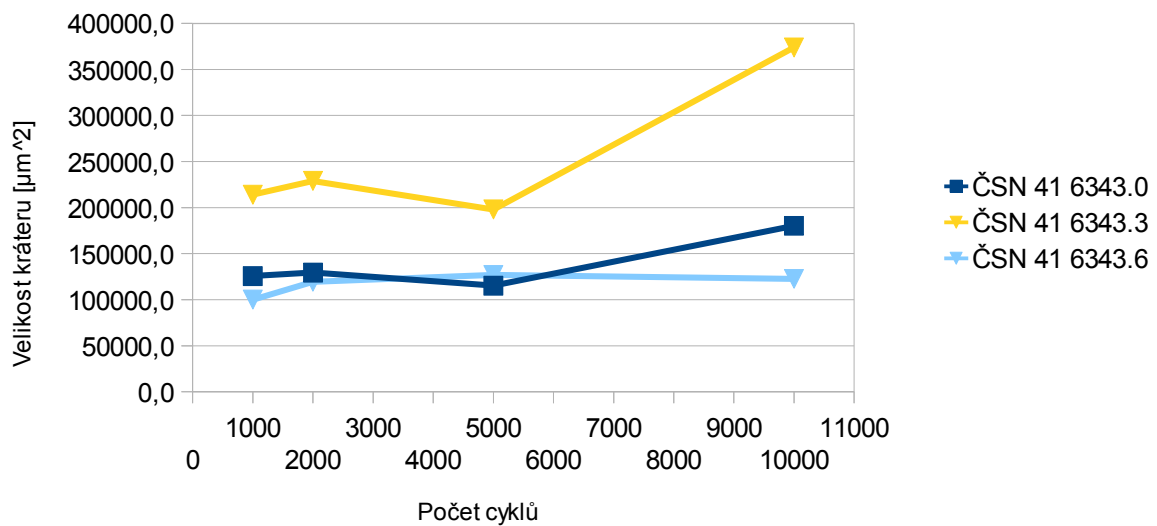
Obr. 9-21, Graf opotřebenění materiálu ČSN 41 2050 po Impact testu, laserové povrchové kalení

Materiál ČSN 41 6343, Indukční povrchové kalení



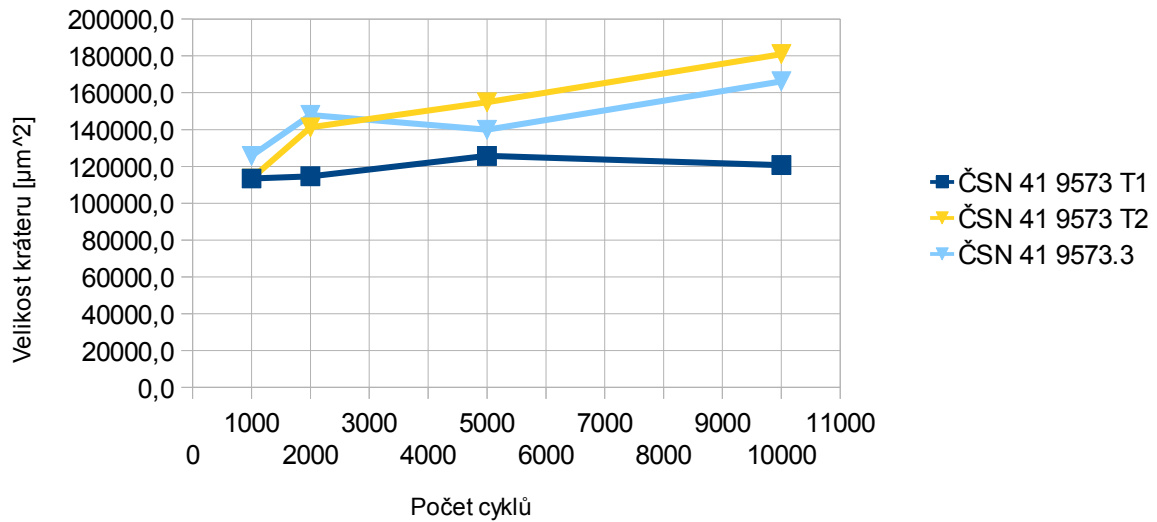
Obr. 9-22, Graf opotřebení materiálu ČSN 41 2050 po Impact testu, indukční povrchové kalení

Materiál ČSN 41 6343, Laserové povrchové kalení



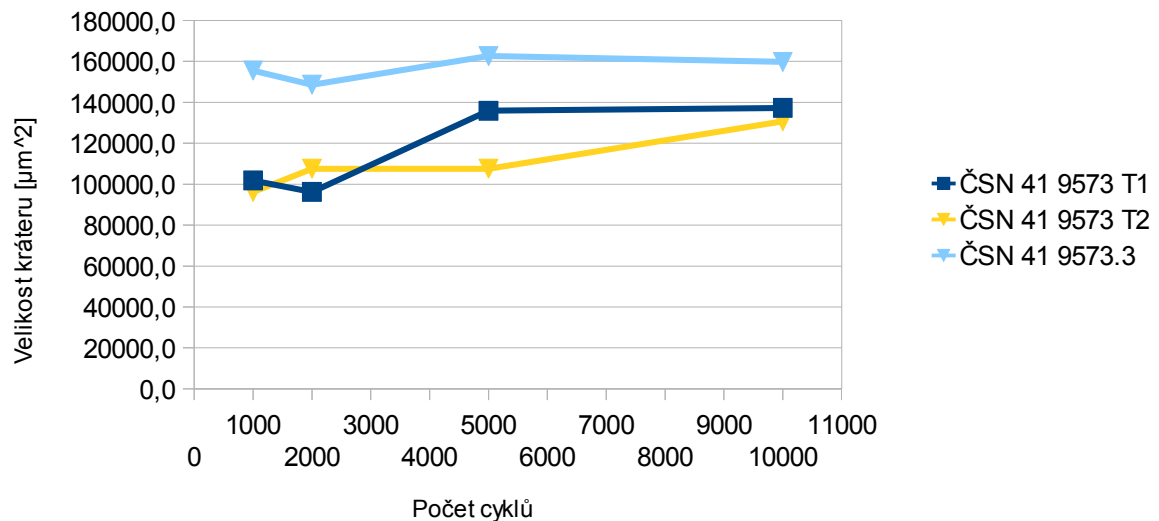
Obr. 9-23, Graf opotřebení materiálu ČSN 41 2050 po Impact testu, laserové povrchové kalení

Materiál ČSN 41 9573, Indukční povrchové kalení



Obr. 9-24, Graf opotřebení materiálu ČSN 41 2050 po Impact testu, indukční povrchové kalení

Materiál ČSN 41 9573, Laserové povrchové kalení



Obr. 9-25, Graf opotřebení materiálu ČSN 41 2050 po Impact testu, laserové povrchové kalení

9.7.4 Tabulkové porovnání

V tabulkách jsou vypočteny poměry průměrného opotřebení mezi jednotlivými materiály. (viz. Diskuze výsledků impact testu)

Materiály, Laserové povrchové kalení	ČSN 412050.1 Laser	ČSN 412050.3 Laser	ČSN 412050.6 Laser	ČSN 416343.0 Laser	ČSN 416343.3 Laser	ČSN 416343.6 Laser	ČSN 419573 T1 Laser	ČSN 419573 T2 Laser	ČSN 419573.3 Laser	Poměr průměrného opotřebení	Pořadí nejmenšího opotřebení
ČSN 41 2050.1 Laser	1,000	1,273	1,530	1,909	1,036	2,241	2,231	2,378	1,678	1,70	9
ČSN 41 2050.3 Laser	0,786	1,000	1,202	1,500	0,814	1,760	1,753	1,868	1,318	1,33	7
ČSN 41 2050.6 Laser	0,654	0,832	1,000	1,248	0,677	1,465	1,458	1,554	1,097	1,11	6
ČSN 41 6343.0 Laser	0,524	0,667	0,801	1,000	0,542	1,174	1,169	1,246	0,879	0,89	4
ČSN 41 6343.3 Laser	0,966	1,229	1,477	1,843	1,000	2,164	2,154	2,296	1,620	1,64	8
ČSN 41 6343.6 Laser	0,446	0,568	0,683	0,852	0,462	1,000	0,995	1,061	0,749	0,76	2
ČSN 41 9573 T1 Laser	0,448	0,571	0,686	0,856	0,464	1,005	1,000	1,066	0,752	0,76	3
ČSN 41 9573 T2 Laser	0,421	0,535	0,643	0,803	0,436	0,942	0,938	1,000	0,706	0,71	1
ČSN 41 9573.3 Laser	0,596	0,759	0,912	1,138	0,617	1,336	1,330	1,417	1,000	1,01	5

Tab. 9-10, Poměry opotřebení povrchu laserově kalených materiálů po Impact testu; Pořadí materiálů dle nejmenšího opotřebení

Materiály, Indukční povrchové kalení	ČSN 412050.1 Indukce	ČSN 412050.3 Indukce	ČSN 412050.6 Indukce	ČSN 416343.0 Indukce	ČSN 416343.3 Indukce	ČSN 416343.6 Indukce	ČSN 419573 T1 Indukce	ČSN 419573 T2 Indukce	ČSN 419573.3 Indukce	Poměr průměrného opotřebení	Pořadí nejmenšího opotřebení
ČSN 41 2050.1 Indukce	1,000	0,984	1,642	0,936	1,192	1,224	1,760	1,414	1,440	1,29	7
ČSN 41 2050.3 Indukce	1,016	1,000	1,668	0,951	1,211	1,244	1,788	1,437	1,464	1,31	8
ČSN 41 2050.6 Indukce	0,609	0,599	1,000	0,570	0,726	0,746	1,072	0,861	0,877	0,78	2
ČSN 41 6343.0 Indukce	1,069	1,052	1,755	1,000	1,274	1,308	1,881	1,511	1,539	1,38	9
ČSN 41 6343.3 Indukce	0,839	0,826	1,377	0,785	1,000	1,027	1,477	1,186	1,208	1,08	6
ČSN 41 6343.6 Indukce	0,817	0,804	1,341	0,764	0,974	1,000	1,438	1,155	1,177	1,05	5
ČSN 41 9573 T1 Indukce	0,568	0,559	0,933	0,532	0,677	0,696	1,000	0,803	0,818	0,73	1
ČSN 41 9573 T2 Indukce	0,707	0,696	1,161	0,662	0,843	0,866	1,245	1,000	1,019	0,91	4
ČSN 41 9573.3 Indukce	0,694	0,683	1,140	0,650	0,828	0,850	1,222	0,982	1,000	0,89	3

Tab. 9-11, Poměry opotřebení povrchu indukčně kalených materiálů po Impact testu; Pořadí materiálů dle nejmenšího opotřebení

Materiály, Indukční a laserové povrchové kalení	ČSN 416343.0 Laser	ČSN 416343.6 Laser	ČSN 419573 T1 Laser	ČSN 419573 T2 Laser	ČSN 412050.6 Indukce	ČSN 419573 T1 Indukce	ČSN 419573 T2 Indukce	ČSN 419573.3 Indukce	Poměr průměrného opotřebení	Pořadí nejmenšího opotřebení
ČSN 41 6343.0 Laser	1,000	1,174	1,169	1,246	1,083	1,161	0,932	0,950	1,09	6
ČSN 41 6343.6 Laser	0,852	1,000	0,995	1,061	0,922	0,989	0,794	0,809	0,93	2
ČSN 41 9573 T1 Laser	0,856	1,005	1,000	1,066	0,927	0,993	0,798	0,813	0,93	3
ČSN 41 9573 T2 Laser	0,803	0,942	0,938	1,000	0,869	0,932	0,749	0,763	0,87	1
ČSN 41 2050.6 Indukce	0,924	1,084	1,079	1,150	1,000	1,072	0,861	0,877	1,01	5
ČSN 41 9573 T1 Indukce	0,862	1,011	1,007	1,073	0,933	1,000	0,803	0,818	0,94	4
ČSN 41 9573 T2 Indukce	1,072	1,259	1,253	1,336	1,161	1,245	1,000	1,019	1,17	8
ČSN 41 9573.3 Indukce	1,053	1,236	1,230	1,311	1,140	1,222	0,982	1,000	1,15	7

Tab. 9-12, Poměry opotřebení povrchu indukčně a laserově kalených vybraných materiálů po Impact testu; Pořadí materiálů dle nejmenšího opotřebení

9.7.5 Diskuze výsledků Impact testu

Spolu s grafy výsledků měření opotřebení při Impact testu jsou uvedeny tabulky, ve kterých jsou vypočteny poměry opotřebení mezi jednotlivými materiály. Tyto tabulky porovnávají opotřebení mezi materiály systémem „každý s každým“. V tabulce se čte následujícím způsobem. Materiál v určitém řádku je porovnáván s materiály v jednotlivých sloupcích. Číslo v tabulce udává kolikrát byl materiál v řádku opotřeben víc (záleží na hodnotě v tabulce) než materiál ve sloupci. Na základě těchto poměrů byly aritmetickým průměrem vypočteny jednotlivé výsledné poměry opotřebení mezi všemi materiály. Nejnižší číslo pak označuje nejméně opotřebený materiál v porovnání s ostatními ve skupině. Nakonec bylo určeno inverzní pořadí. Z toho plyne, že materiál s nejmenším opotřebením je v pořadí označen jako číslo 1. Tabulky byly uvedeny v celém rozsahu, aby bylo možno porovnat jednotlivé opotřebenění materiálů mezi sebou.

Tabulky byly dále rozděleny na tabulky s materiály povrchově kalenými laserem (Tab. 9-10) a indukcí (Tab. 9-11). Čtyři materiály z každé tabulky, které měli nejlepší umístění v dané tabulce, pak byly porovnány mezi sebou (Tab. 9-12). Došlo tedy na porovnání materiálů povrchově kalených laserem a indukcí.

V tabulce s materiály, které byly povrchově kaleny laserem (Tab. 9-10) byl nejméně opotřeben, dle měření, materiál ČSN 41 9573 T2. Je zajímavé si povšimnout, že tento materiál nedosahoval v dané skupině materiálů nejvyšší povrchové tvrdosti. Stejně tak ani druhý nejméně opotřebený materiál, materiál ČSN 41 6373.6, nedosahuje nejvyšší tvrdosti povrchové tvrdosti po laserovém povrchovém kalení. Nicméně patřily do 4 materiálů ze skupiny s nejvyšší naměřenou tvrdostí. Nejnižší odolnost proti opotřebenění vykazovaly materiály ČSN 41 2050.1 a ČSN 41 6343.3.

V tabulce (Tab. 9-11) je uvedena skupina indukčně povrchově kalených materiálů. Z této skupiny bylo naměřeno nejnižší opotřebenění na materiálech ČSN 41 9573 T1 a ČSN 41 2050.6. Nejvyššího opotřebenění bylo naopak dosaženo na materiálech ČSN 41 6343.0 a ČSN 41 2050.3.

Poslední tabulka (Tab. 9-12) z trojice porovnává materiály s nejmenším opotřebením z obou předcházejících tabulek. Z každé z těchto tabulek byly vybrány čtyři materiály s nejnižším opotřebením. Celkově nejnižšího opotřebenění dosáhl ze všech testovaných vzorků materiál ČSN 41 9573 T2 laserově povrchově kalený. Z pořadí materiálů v tabulce (Tab. 9-12) jasně plyne, že nižšího opotřebenění (dle hodnocení touto metodou) dosáhli v celkovém výsledku laserově kalené materiály.

10 Diskuze výsledků

10.1 Metalografie

Metalografické zkoumání se zaměřilo především na struktury zakalených vrstev těsně pod povrchem materiálu. Cílovou strukturou po povrchovém kalení byl martenzit. Předmětem metalografického zkoumání byly odchylky od požadované martenzitické struktury.

Většina vzorků dosáhla požadované martenzitické struktury. V některých případech se vyskytoval ve strukturách martenzit a bainit, který je v základních strukturách přípustný. Bainit snižuje tvrdost, ale zvyšuje houževnatost základní struktury. Není ho třeba hodnotit jako nežádoucí strukturu.

Ve strukturách povrchově kalených materiálů se vyskytly také struktury, které jsou nežádoucí. Shodně se všechny objevily u laserově povrchově kalených vzorků. Jednalo se o materiály ČSN 41 2050.1, ČSN 41 2050.3, ČSN 41 2050.6, ČSN 41 6343.3 a ČSN 41 9573.3.

U materiálů ČSN 41 2050.1, ČSN 41 2050.3 a ČSN 41 2050.6 po povrchovém kalení laserem byla pod povrchem nerovnoměrná martenzitická struktura s feritem po hranicích zrn.

Materiál ČSN 41 6343.3 po povrchovém kalení laserem měl ve struktuře Widmanstattenovi struktury. Widmanstattenova struktura je křehká tvrdá fáze, která je ve struktuře nepřijatelná.

Laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 9573.3 vykazoval ve struktuře karbidické síťový po hranicích zrn. Tento nepříznivý jev snižuje houževnatost povrchové vrstvy a je tak nepřijatelný. Důvodem pro vznik této struktury jsou pravděpodobně nevhodně zvolené parametry laserového povrchového kalení a to přesněji pomalá posuvná rychlost a vysoká teplota kalení.

10.1.1 Mikrotvrdość

U všech povrchově kalených vzorků byla určována smluvní hloubka prokalení pomocí měření mikrotvrdości. Většina materiálů splnila podmínky stanovené normou ČSN EN 10328 a byly u nich stanovena smluvní hloubka prokalení, některé materiály však podmínku nespĺnili a to jmenovitě materiály ČSN 41 9573 T1 a ČSN 41 9573 T2. Shodně nešla hloubka prokalení určit jak u vzorků po laserovém povrchovém kalení tak po indukčním povrchovém kalení. Pro stanovení smluvní hloubky prokalení u materiálu ČSN 41 9573 T1 je nutné určit zvláštní dohodu, podle které by se hloubka prokalení vyhodnotila. Oproti tomu materiál ČSN 41 9573 T2 dosahoval v kalené vrstvě nižší hodnoty tvrdosti než v základním materiálu. Zde by hloubka prokalení stanovit nešla, protože materiál nebyl zakalen, ale popuštěn.

10.2 Tribologická zkouška PIN-on-DISC

Výsledky tribologické zkoušky PIN-on-DISC jasně ukazují, který tepelně zpracovaný materiál s jakým povrchovým kalením dosáhl nejnižšího opotřebení. V širších souvislostech je ale možné nalézt závislost tepelného zpracování materiálu před povrchovým kalením na míře opotřebení povrchu materiálu po povrchovém kalení.

V průměru nejvyššího opotřebení dosáhly materiály, které byly před povrchovým kalením žihány na měkko, respektive jejichž výchozí struktura byla ferit a globulární perlit. Lze to vysvětlit delší dobou austenitizace materiálu a nedokonalou homogenizací. Globulární perlit ve formě globulí zaujímá ve struktuře co nejmenší povrch. Tím je nepříznivě ovlivněn poměr rozhraní feritu a cementitu, který je klíčový pro rychlou austenitizaci.

Naopak nejnižšího opotřebení dosáhly materiály které prošly před povrchovým kalením zušlechťením. Martenzitická nebo sorbitická struktura dobře a rychle přechází v austenit díky velkému rozhraní feritu a cementitu. Dosáhne se tak rychlé austenitizace a získá se čas pro lepší homogenizaci austenitu. Ten pak po zakalení dosahuje rovnoměrnější struktury a vyšších tvrdostí

Z pohledu použité technologie povrchového kalení, dosáhly laserem povrchově kalené materiály lepších výsledků než indukčně povrchově kalené materiály.

V diskuzi výsledků nejsou zcela zohledňovány výsledky indukčně povrchově kalených materiálů ČSN 41 9573.3 a ČSN 41 9573 T2. Především z důvodu pravděpodobné a nevylučitelné chyby při zpracování materiálu. Tato chyba by mohla zkreslit celý výsledek práce. Přesto naměřené hodnoty jsou v bakalářské práci uvedeny, protože jsou zajímavým zdrojem a možná i podmětem pro další zkoumání.

10.3 Impact test

Výsledky opotřeben^í materiálů zkouškou Impact test přibližně kopírují výsledky tribologické zkoušky PIN-on-DISC. Vzhledem k různým principům zkoušek jsou částečně rozdílné výsledky pochopitelné.

Nejvyšší míry odolnosti proti opotřeben^í dosáhly povrchově kalené vrstvy na zušlechtn^ěných materiálech. Tedy se znovu martenzitická nebo případně sorbitická struktura prokázala jako nejvýhodnější výchozí strukturou před povrchovým kalení.

Další pořadí vlivu výchozích struktur na opotřeben^í povrchově kalených materiálů nelze u zkoušky Impact test jednoznačně určit.

Porovnáním opotřeben^í laserově povrchově kalených materiálů a indukčně povrchově kalených materiálů vychází nižší míra opotřeben^í ve prospěch laserového povrchového kalení.

11 Závěr

Jak již bylo uvedeno v úvodu, problematika zkoumání opotřebení povrchu materiálů je velmi složitá a široká vědní disciplína. Tato práce se zaměřila na velmi úzkou oblast povrchových úprav materiálu a to jmenovitě na laserové povrchové kalení a indukční povrchové kalení. Výsledkem bakalářské práce jsou data z experimentální části práce, které mohou konstruktérům nebo jiným strojním inženýrům napomoci ve výběru materiálů vhodných k povrchovému kalení, případně k výběru vhodného tepelného zpracování před finálním povrchovým kalení. V neposlední řadě experimentální část bakalářské práce porovnává výsledky dvou odlišných technologií povrchového kalení.

Tato bakalářská práce zcela jistě nevyčerpává celou problematiku povrchového kalení. Proto by se mohla stát dobrým zdrojem počátečních informací pro badatele, kteří by chtěli zkoumat další závislosti vlivu stavu materiálu na výslednou zakalenou vrstvu nebo se věnovat problematice jednotlivých technologií povrchového kalení hlouběji. Dalšími zajímavými možnostmi navázání na práci je volba jiných zkoušek povrchového opotřebení materiálu. Bylo by jistě velmi zajímavé a poučné sledovat chování povrchu materiálu i při jiných formách zatížení.

Experimentální část se skládala z tepelného zpracování materiálů ČSN 41 2050, ČSN 41 6343 a ČSN 41 9573 do tří různých stavů po tepelném zpracování. Na vzorcích materiálů po tepelném zpracování bylo provedeno indukční a laserové povrchové kalení. Zakalené vrstvy byly podrobeny tribologické zkoušce a Impact testu. Dále byly měřeny tvrdosti povrchových vrstev, smluvní hloubka prokalení a byly vyhodnoceny struktury materiálů před tepelným zpracováním, po tepelném zpracování a struktury zakalených vrstev.

11.1.1 Metalografie

- ve většině povrchově kalených vrstev bylo dosaženo martenzitické a martenziticko-bainitické struktury.
- ve strukturách laserově povrchově kalených materiálů ČSN 41 2050.1, ČSN 41 2050.3, ČSN 41 2050.6, ČSN 41 6343.3 a ČSN 41 9573.3 se vyskytly nežádoucí struktury.

11.1.2 Tribologická zkouška PIN-on-DISC

- byla zjištěna chyba v procesu zpracování indukčně povrchově kalených materiálů ČSN 41 9573.3 a ČSN 41 9573 T2.
- nejmenšího opotřebení z hlediska tepelného zpracování před povrchovým kalením dosáhly zušlechtné materiály s martenzitickou a sorbitickou strukturou.
- nejmenšího opotřebení z hlediska technologie povrchového kalení dosáhly laserově povrchově kalené materiály.

- největšího opotřebení z hlediska tepelného zpracování před povrchovým kalením dosáhly materiály žíhané na měkko
- největšího opotřebení z hlediska technologie povrchového kalení dosáhly indukčně povrchově kalené materiály.

11.1.3 Impact test

- nejmenšího opotřebení z hlediska tepelného zpracování před povrchovým kalením dosáhly zušlechtěné materiály s martenzitickou a sorbitickou strukturou.
- nejmenšího opotřebení z hlediska technologie povrchového kalení dosáhly laserově povrchově kalené materiály.

12 Seznam použité literatury

[1] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999, 274 s. ISBN 80-708-2582-0.

[2] JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: Metalografická příručka*. 4. přepracované. Praha: SNTL, 1983, 392 s.

[3] KLUFOVÁ, Pavla. *Návrh technologie laserového povrchového zpracování konstrukčních ocelí*. Plzeň, 2009. Diplomová práce. Západočeská univerzita, Fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Antonín Kříž.

[4] DAVIS, J. *Surface hardening of steels: understanding the basics*. Materials Park, OH: ASM International, c2002, 364 s. ISBN 08-717-0764-0.

[5] Indukční ohřev - technologie | RAJMONT s.r.o. [online]. [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: www.rajmont.cz/technologie-indukcni-ohrev/

[6] ČERNÝ, Václav. Elektro :: Indukční ohřev (1). [online]. [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25206

[7] ČERNÝ, Václav. Elektro :: Indukční ohřev (2). [online]. [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el110255.pdf>

[8] *Induktory* [online]. [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: <http://www.martenzit.cz/Induktory-vyroba-opravy-konstrukce-vyvoj.php>

[9] Diodový laser Lintech. In: *Průmyslové značení výrobků a dílu, automatizace Lintech* [online]. [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/diodovy-laser>

[10] Graf. In: *Industrial Laser Systems, LLC* [online]. [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://www.laser-industrial.com/Diodegraph/biggraph.jpg>

[11] Tribologie. In: *Katedra strojírenské technologie, FS, TU v Liberci* [online]. [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf

[12] HÁJEK, Jiří, KŘÍŽ, Antonín. *Tribologická analýza PIN-on-DISC*, Metal 2005, Hradec nad Moravicí 2005

[13] KŘÍŽ, Antonín. Tribologická analýza PIN-on-DISC. In: [online]. Hradec nad Moravicí, 2004 [cit. 2012-06-30]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/TRIBOLOGICKA_ANALYZA_PIN-ON-DISC.pdf

[14] KŘÍŽ, Antonín, Petr BENEŠ a Jiří ŠIMEČEK. IMPACT TESTER - KONTAKTNÍ CYKlickÉ TESTOVÁNÍ. [online]. Metal 2009, Hradec nad Moravicí, 2009 [cit. 2012-06-30]. Dostupné z: http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_09/Lists/Papers/128.pdf

[15] Materiálový list ČSN 41 2050

[16] Materiálový list ČSN 41 6343

[17] Materiálový list ČSN 41 9573

PŘÍLOHA č.1

13 Struktury materiálů po povrchovém kalení laserem

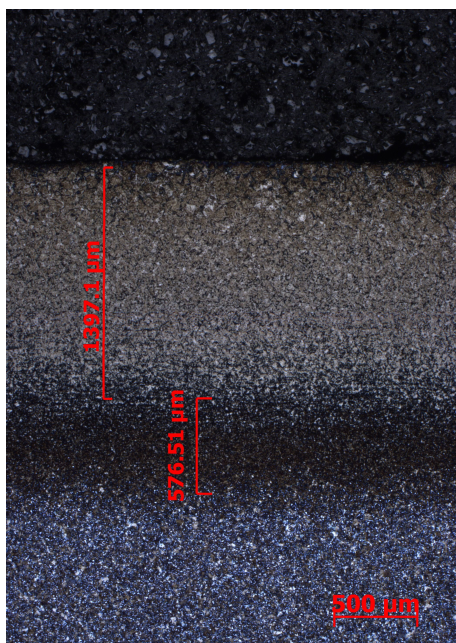
Laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 2050.1

Materiál ČSN 41 2050.1, Laserové povrchové kalení		
Tvrdość na povrchu HV10	Tvrdość 0,15 mm pod povrchem HV1	Hloubka prokalení [mm]
448 ± 5	457	1,25

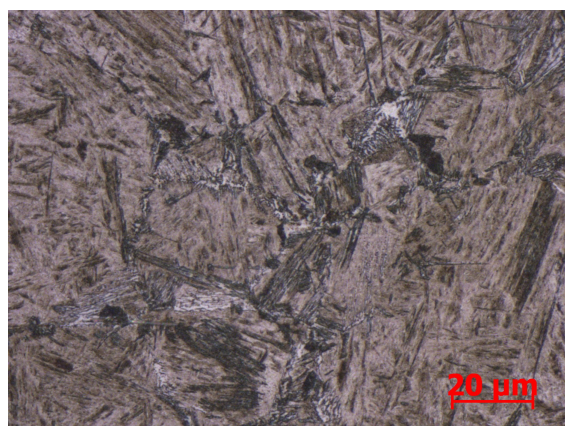
Tab. 13-1, Naměřené hodnoty materiálu ČSN 41 2050.1 po laserovém povrchovém kalení

Na obr. 13-1 lze pozorovat hloubku laserového zakalení materiálu ČSN 41 2050.1

Na obr. 13-2 lze pozorovat martenzitickou mikrostrukturu s feritem po hranicích zrn v povrchově kalené vrstvě materiálu ČSN 41 2050.1. Ferit po hranicích zrn je nežádoucí strukturou, která snižuje tvrdost kalené vrstvy



Obr. 13-1, Materiál ČSN 41 2050.1, hloubka zakalené vrstvy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 25x



Obr. 13-2, laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 2050.1, mikrostruktura pod povrchem, martenzitická struktura s feritem po hranicích zrn, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

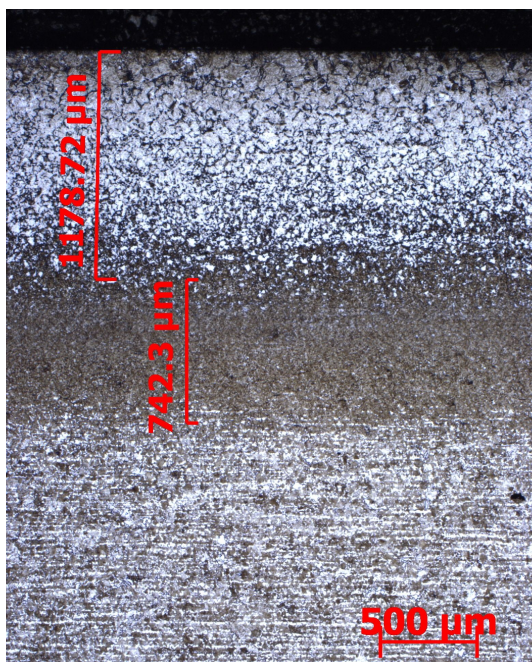
Laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 2050.3

Materiál ČSN 41 2050.3, Laserové povrchové kalení		
Tvrдость na povrchu HV10	Tvrдость 0,15 mm pod povrchem HV1	Hloubka prokalení [mm]
400 ± 15	457	1,15

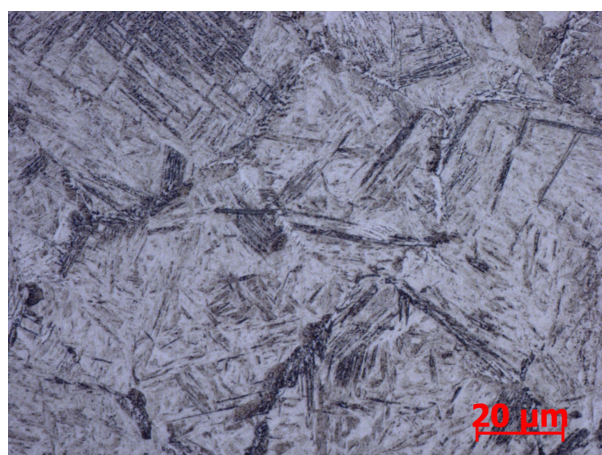
Tab. 13-2, Naměřené hodnoty materiálu ČSN 41 2050.3 po laserovém povrchovém kalení

Na obr. 13-3 lze pozorovat hloubku laserového zakalení materiálu ČSN 41 2050.3

Na obr. 13-4 lze pozorovat martenzitickou mikrostrukturu zakalené vrstvy materiálu ČSN 41 2050.3 s feritem po hranicích zrn. Stejně jako u předchozí struktury i zde je nežádoucí ferit po hranicích zrn.



Obr. 13-3, Materiál ČSN 41 2050.3 ,
hloubka zakalené vrstvy, leptáno Nital
3%, zvětšeno 25x



Obr. 13-4, laserově povrchově kalený
materiál ČSN 41 2050.3, mikrostruktura
pod povrchem, martenzitická struktura s
výskytem feritu po hranicích zrn, leptáno
Nital 3%, zvětšeno 500x

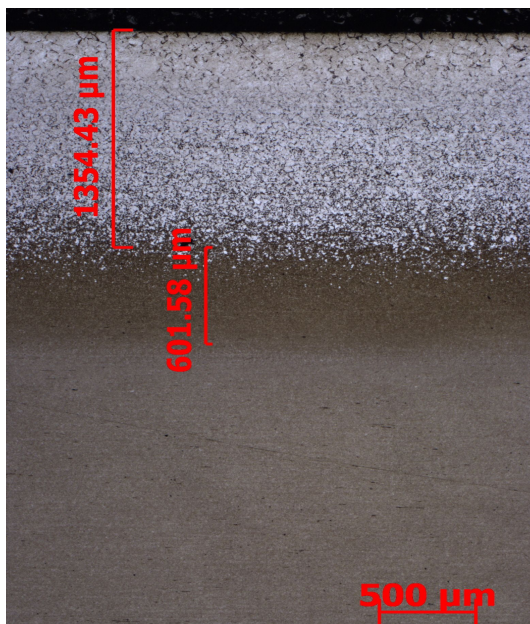
Laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 2050.6

Materiál ČSN 41 2050.6, Laserové povrchové kalení		
Tvrдость na povrchu HV10	Tvrдость 0,15 mm pod povrchem HV1	Hĺoubka prokalení [mm]
569 ± 6	551	1,05

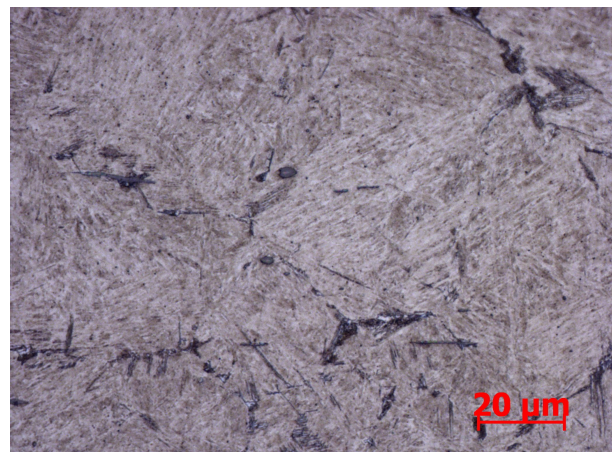
Tab. 13-3, Naměřené hodnoty materiálu ČSN 41 2050.6 po laserovém povrchovém kalení

Na obr. 13-5 lze pozorovat hloubku laserového zakalení materiálu ČSN 41 2050.6

Na obr. 13-6 lze pozorovat martenzitickou mikrostrukturu zakalené vrstvy materiálu ČSN 41 2050.6. Laserově zakalená vrstva na výchozím materiálu ČSN 41 2050.6 vykazovala ve své mikrostruktuře také ferit po hranicích zrn. Nicméně ve velmi omezené míře.



Obr. 13-5, Materiál ČSN 41 2050.6
,hloubka zakalené vrstvy, leptáno Nital
3%, zvětšeno 25x



Obr. 13-6, laserově povrchově kalený
materiál ČSN 41 2050.6, mikrostruktura
pod povrchem, martenzitická struktura s
feritem po hranicích zrn, leptáno Nital
3%, zvětšeno 500x

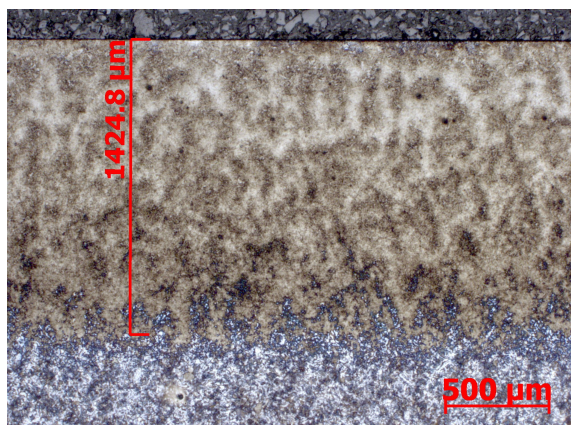
Laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 6343.0

Materiál ČSN 41 6343.0, Laserové povrchové kalení		
Tvrдость na povrchu HV10	Tvrдость 0,15 mm pod povrchem HV1	Hloubka prokalení [mm]
485 ± 25	457	1,25

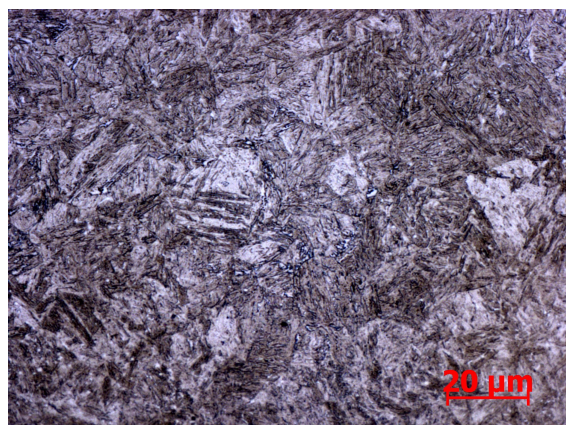
Tab. 13-4, Naměřené hodnoty materiálu ČSN 41 6343.0 po laserovém povrchovém kalení

Na obr. 13-7 lze pozorovat hloubku laserového zakalení materiálu ČSN 41 6343.0

Na obr. 13-8 lze pozorovat martenzitickou mikrostrukturu povrchově kalené vrstvy materiálu ČSN 41 6343.0.



Obr. 13-7, Materiál ČSN 41 6343.0 ,
hloubka zakalené vrstvy, leptáno Nital
3%, zvětšeno 25x



Obr. 13-8, laserově povrchově kalený
materiál ČSN 41 6343.0, mikrostruktura
pod povrchem, martenzitická struktura,
leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

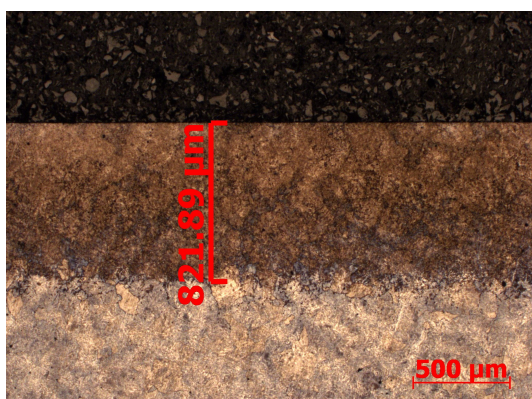
Laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 6343.3

Materiál ČSN 41 6343.3, Laserové povrchové kalení		
Tvrдость na povrchu HV10	Tvrдость 0,15 mm pod povrchem HV1	Hloubka prokalení [mm]
415 ± 14	505	0,55

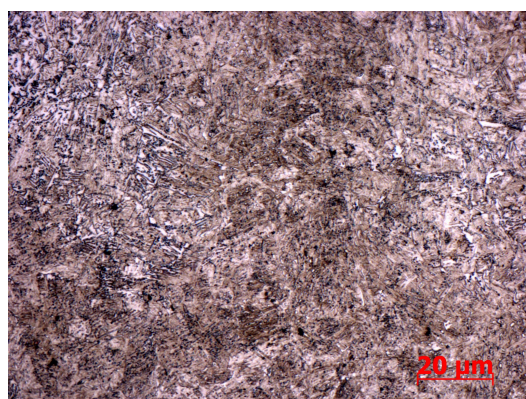
Tab. 13-5, Naměřené hodnoty materiálu ČSN 41 6343.3 po laserovém povrchovém kalení

Na obr. 13-9 lze pozorovat hloubku laserového zakalení materiálu ČSN 41 6343.3

Na obr. 13-10 lze pozorovat martenzitickou mikrostrukturu povrchově kalené vrstvy materiálu ČSN 41 6343.3 s výskytem nežádoucí Widmanstattenovi struktury



Obr. 13-9, Materiál ČSN 41 6343.3, hloubka zakalené vrstvy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 25x



Obr. 13-10, laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 6343.3, mikrostruktura pod povrchem, martenzitická struktura s karbidy a výskytem Widmanstattenovi struktury, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

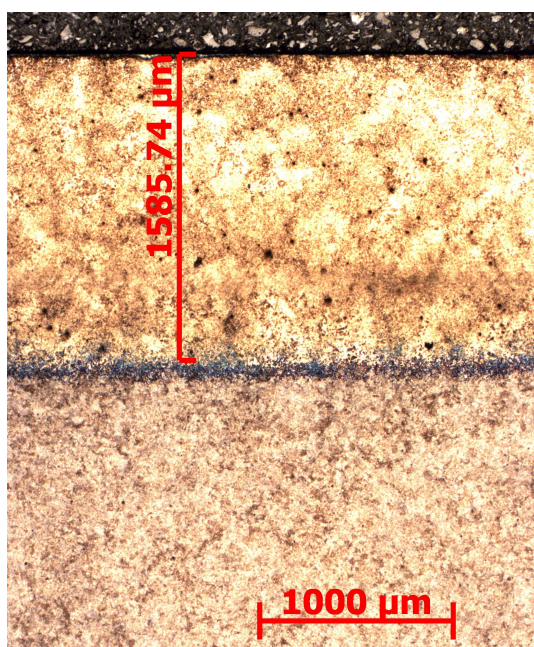
Laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 6343.6

Materiál ČSN 41 6343.6, Laserové povrchové kalení		
Tvrдость na povrchu HV10	Tvrдость 0,15 mm pod povrchem HV1	Hĺoubka prokalení [mm]
618 ± 9	542	1,35

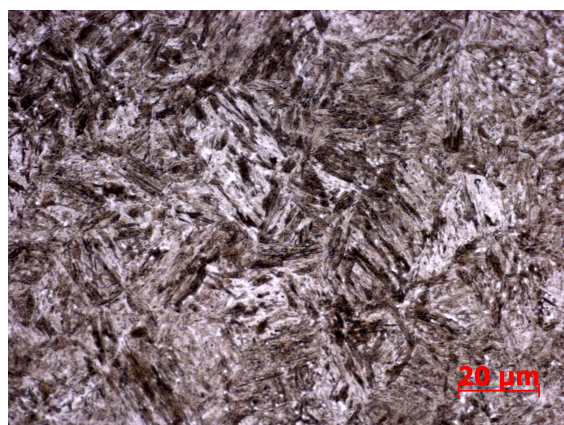
Tab. 13-6, Naměřené hodnoty materiálu ČSN 41 6343.6 po laserovém povrchovém kalení

Na obr. 13-11 lze pozorovat hĺoubku laserového zakalení materiálu ČSN 41 6343.6

Na obr. 13-12 lze pozorovat martenzitickou mikrostrukturu povrchově kalené vrstvy materiálu ČSN 41 6343.6



Obr. 13-11, Materiál ČSN 41 6343.6, hĺoubka zakalené vrstvy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 25x



Obr. 13-12, laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 6343.6, mikrostruktura pod povrchem, martenzitická struktura, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

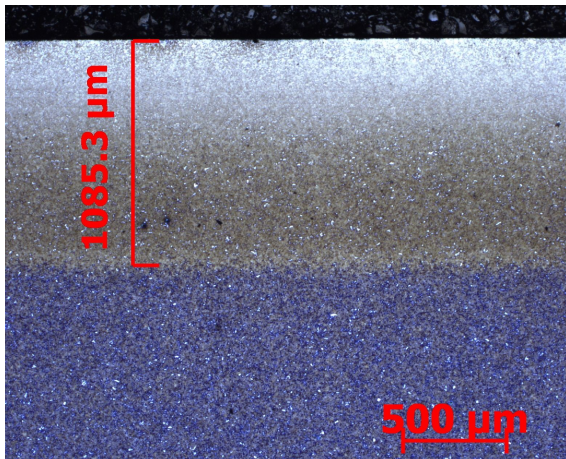
Laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 9573.3

Materiál ČSN 41 9573.3, Laserové povrchové kalení		
Tvrдость na povrchu HV10	Tvrдость 0,15 mm pod povrchem HV1	Hĺoubka prokalení [mm]
502 ± 11	551	0,85

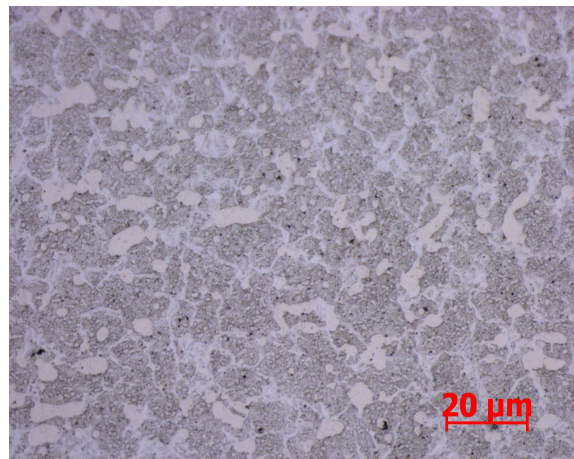
Tab. 13-7, Naměřené hodnoty materiálu ČSN 41 9573.3 po laserovém povrchovém kalení

Na obr. 13-13 lze pozorovat hloubku laserového zakalení materiálu ČSN 41 9573.3

Na obr. 13-14 lze pozorovat martenzitickou mikrostrukturu s karbidickým síťovým po hranicích zrn materiálu ČSN 41 9573.3. Příčinou precipitace karbidů na hranicích zrn, může být například příliš vysoká teplota austenitizace. Tento jev je značně nežádoucí.



Obr. 13-13, Materiál ČSN 41 9573.3 ,hloubka zakalené vrstvy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 25x



Obr. 13-14, laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 9573.3, mikrostruktura pod povrchem, martenzitická struktura s karbidickým síťovým po hranicích zrn, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

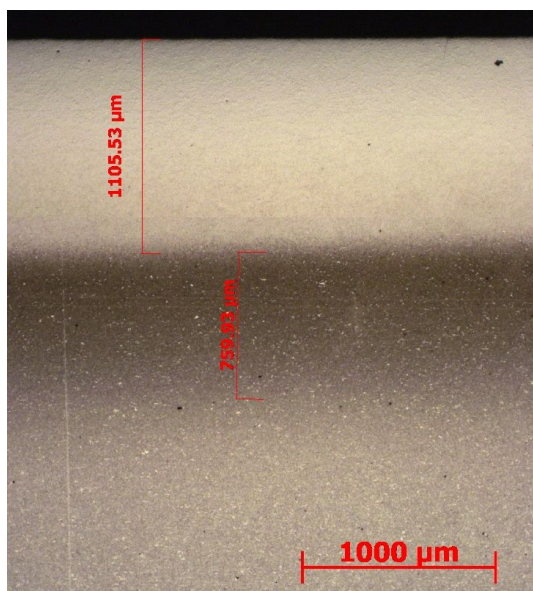
Laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 9573 T1

Materiál ČSN 41 9573 T1, Laserové povrchové kalení		
Tvrdość na povrchu HV10	Tvrdość 0,15 mm pod povrchem HV1	Hloubka prokalení [mm]
693 ± 12	714	Nelze stanovit

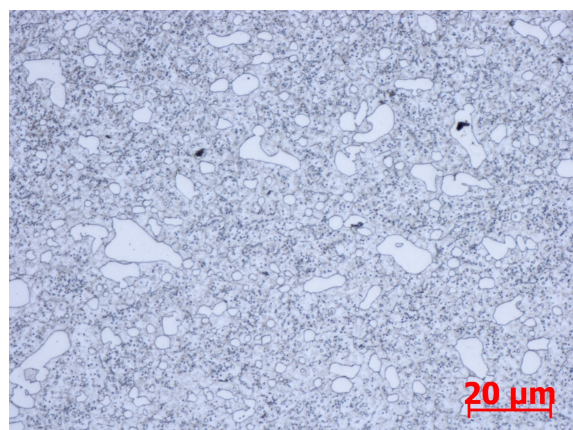
Tab. 13-8, Naměřené hodnoty materiálu ČSN 41 9573 T1 po laserovém povrchovém kalení

Na obr. 13-15 lze pozorovat hloubku laserového zakalení materiálu ČSN 41 9573 T1

Na obr. 13-16 lze pozorovat martenzitickou mikrostrukturu povrchově kalené vrstvy materiálu ČSN 41 9573 T1 obsahující velké bílé primární karbidy a drobné globulitické karbidy.



Obr. 13-15, Materiál ČSN 41 9573 T1, hloubka zakalené vrstvy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 25x



Obr. 13-16, laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 6343 T1, mikrostruktura pod povrchem, martenzitická struktura s velkými primárními karbidy a drobnými globulitickými, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

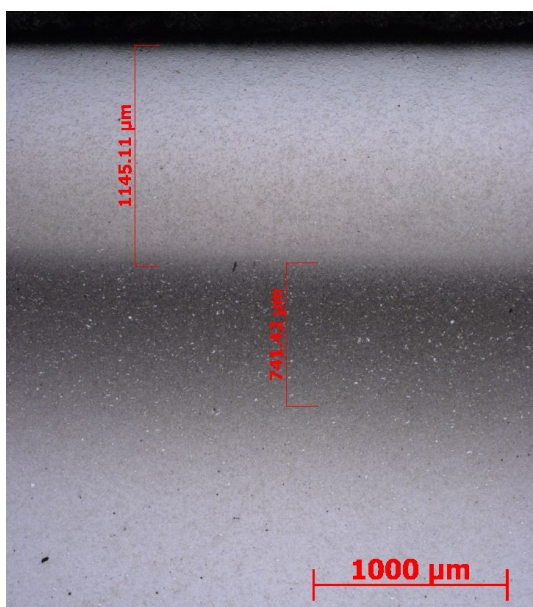
Laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 9573 T2

Materiál ČSN 41 9573 T2, Laserové povrchové kalení		
Tvrдость na povrchu HV10	Tvrдость 0,15 mm pod povrchem HV1	Hloubka prokalení [mm]
565 ± 13	686	Nelze stanovit

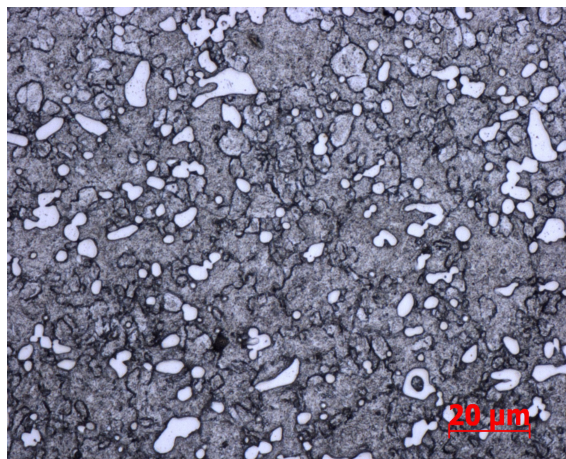
Tab.13-9, Naměřené hodnoty materiálu ČSN 41 9573 T2 po laserovém povrchovém kalení

Na obr. 13-17 lze pozorovat hloubku laserového zakalení materiálu ČSN 41 9573 T2

Na obr. 13-18 lze pozorovat martenzitickou a sorbitickou mikrostrukturu povrchově kalené vrstvy materiálu ČSN 41 9573 T2 obsahující různě rozpuštěné primární karbidy.



Obr. 13-17, Materiál ČSN 41 9573 T2, hloubka zakalené vrstvy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 25x



Obr. 13-18, laserově povrchově kalený materiál ČSN 41 6343 T2, mikrostruktura pod povrchem, martenzitická a sorbitická struktura s částečně rozpuštěnými primárními karbidy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

PŘÍLOHA č.2

14 Struktury materiálů po povrchovém kalení indukci

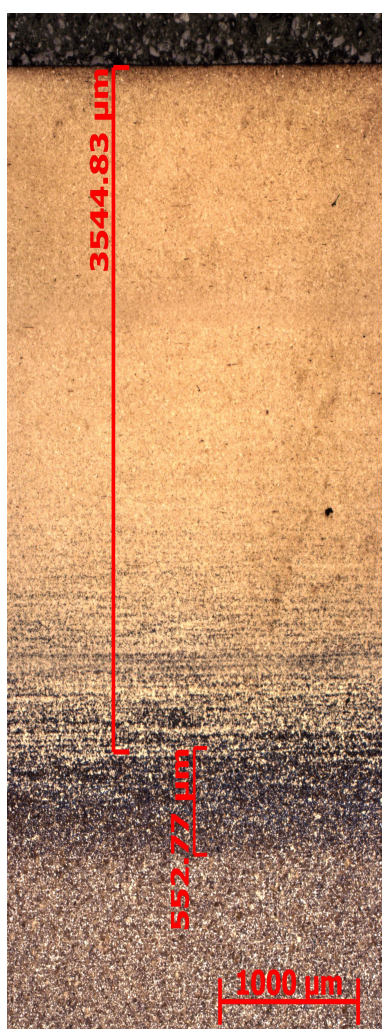
Indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 2050.1

Materiál ČSN 41 2050.1, Indukční povrchové kalení		
Tvrдость na povrchu HV10	Tvrдость 0,15 mm pod povrchem HV1	Hĺoubka prokalení [mm]
552 ± 6	640	3,75

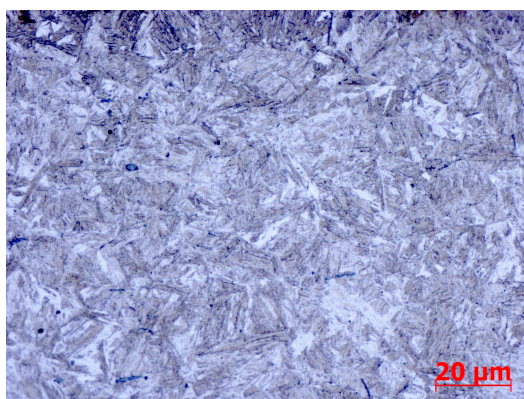
Tab. 14-1, Naměřené hodnoty materiálu ČSN 41 2050.1 po indukčním povrchovém kalení

Na obr. 14-1 lze pozorovat hĺoubku indukčního zakalení materiálu ČSN 41 2050.1

Na obr. 14-2 lze pozorovat martenzitickou mikrostrukturu povrchově kalené vrstvy materiálu ČSN 41 2050.1.



Obr. 14-1, Materiál ČSN 41 2050.1, hĺoubka zakalené vrstvy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 25x



Obr. 14-2, indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 2050.1, mikrostruktura pod povrchem, martenzitická struktura, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

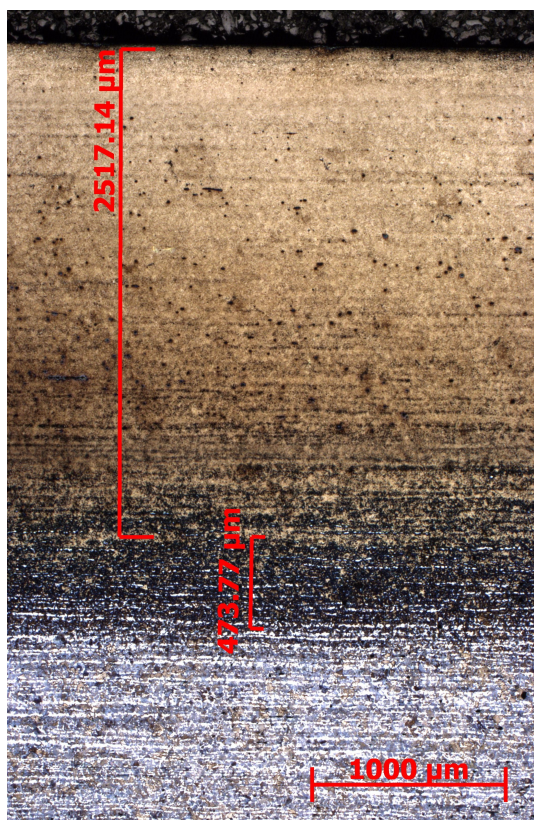
Indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 2050.3

Materiál ČSN 41 2050.3, Indukční povrchové kalení		
Tvrдость na povrchu HV10	Tvrдость 0,15 mm pod povrchem HV1	Hĺoubka prokalení [mm]
629 ± 13	659	2,55

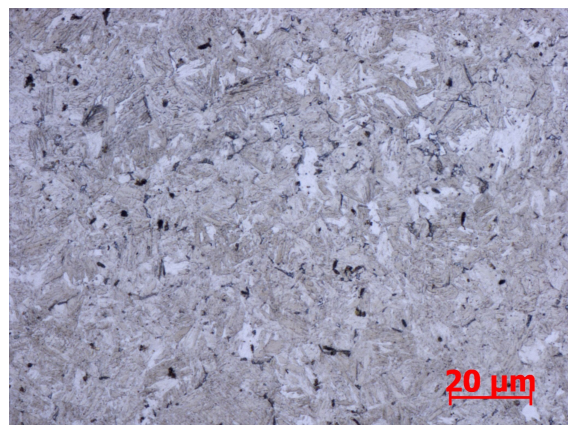
Tab. 14-2, Naměřené hodnoty materiálu ČSN 41 2050.3 po indukčním povrchovém kalení

Na obr. 14-3 lze pozorovat hĺoubku indukčního zakalení materiálu ČSN 41 2050.3

Na obr. 14-4 lze pozorovat martenzitickou mikrostrukturu indukčně povrchově kalené vrstvy materiálu ČSN 41 2050.3.



Obr. 14-3, Materiál ČSN 41 2050.3, hĺoubka zakalené vrstvy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 25x



Obr. 14-4, indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 2050.3, mikrostruktura pod povrchem, martenzitická struktura, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

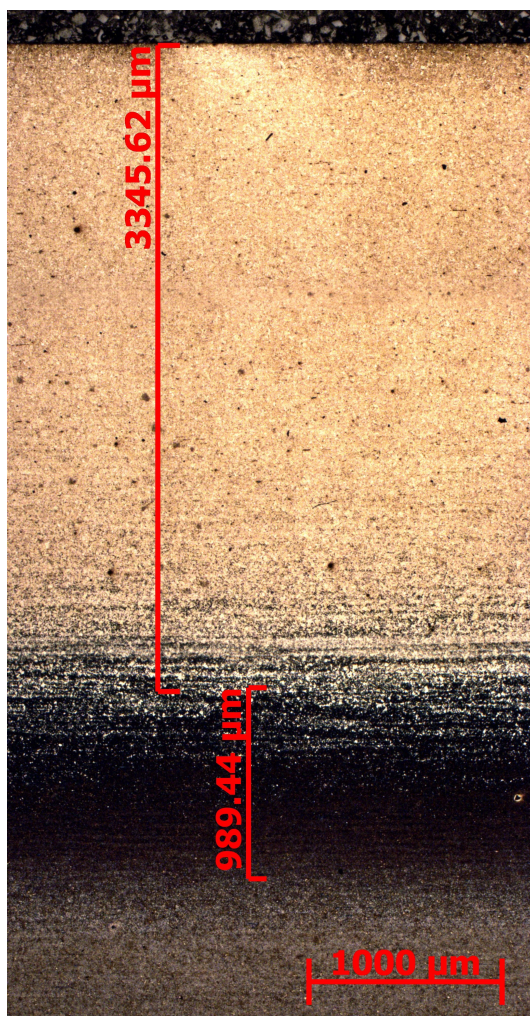
Indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 2050.6

Materiál ČSN 41 2050.6, Indukční povrchové kalení		
Tvrдость na povrchu HV10	Tvrдость 0,15 mm pod povrchem HV1	Hloubka prokalení [mm]
550 ± 19	659	2,55

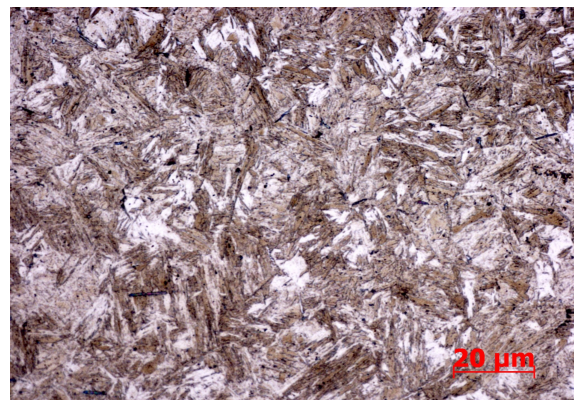
Tab. 14-3, Naměřené hodnoty materiálu ČSN 41 2050.6 po indukčním povrchovém kalení

Na obr. 14-5 lze pozorovat hloubku indukčního zakalení materiálu ČSN 41 2050.6

Na obr. 14-6 lze pozorovat martenzitickou a bainitickou mikrostrukturu indukčně povrchově kalené vrstvy materiálu ČSN 41 2050.3.



Obr. 14-5, Materiál ČSN 41 2050.6, hloubka zakalené vrstvy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 25x



Obr. 14-6, indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 2050.6, mikrostruktura pod povrchem, martenzitická a bainitická struktura, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

Indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 6343.0

Materiál ČSN 41 6343.0, Indukční povrchové kalení		
Tvrдость na povrchu HV10	Tvrдость 0,15 mm pod povrchem HV1	Hloubka prokalení [mm]
554 ± 14	634	4,95

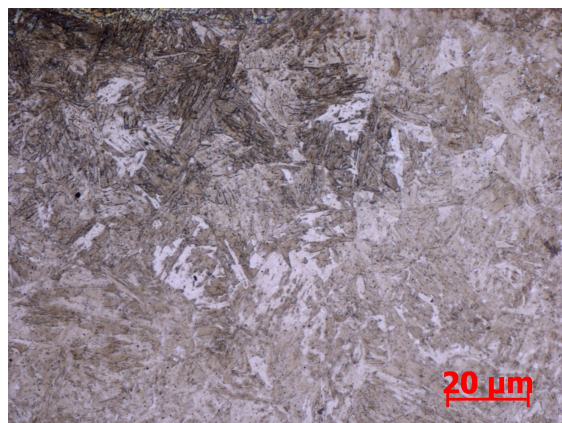
Tab. 14-4, Naměřené hodnoty materiálu ČSN 41 6343.0 po indukčním povrchovém kalení

Na obr. 14-7 lze pozorovat hloubku indukčního zakalení materiálu ČSN 41 6343.0

Na obr. 14-8 lze pozorovat martenzitickou a bainitickou mikrostrukturu indukčně povrchově kalené vrstvy materiálu ČSN 41 6343.0



Obr. 14-7, Materiál ČSN 41 6343.0, hloubka zakalené vrstvy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 25x



Obr. 14-8, indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 6343.0, mikrostruktura pod povrchem, martenzitická a bainitická struktura, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

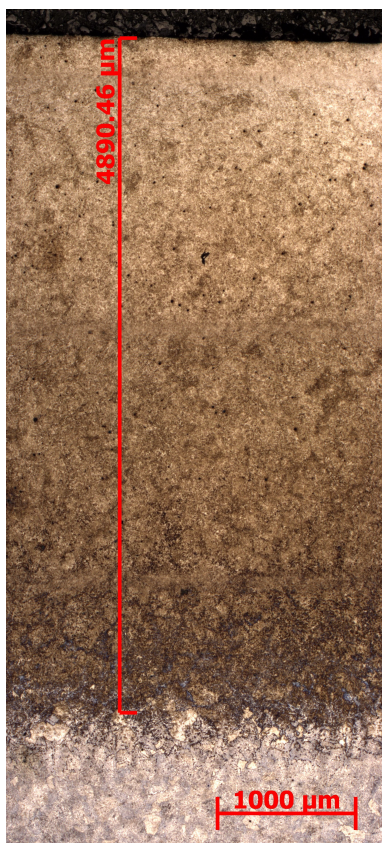
Indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 6343.3

Materiál ČSN 41 6343.3, Indukční povrchové kalení		
Tvrдость na povrchu HV10	Tvrдость 0,15 mm pod povrchem HV1	Hĺoubka prokalení [mm]
571 ± 12	577	4,05

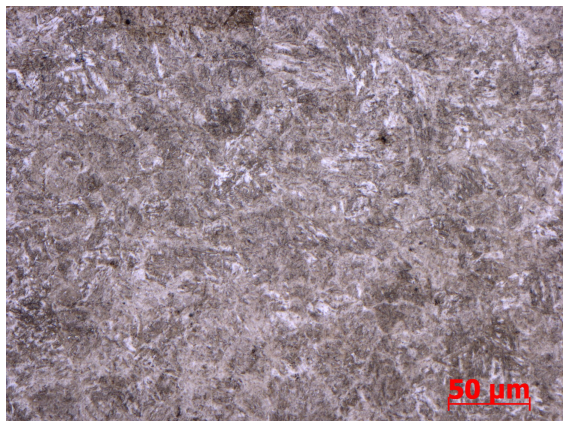
Tab.14-5, Naměřené hodnoty materiálu ČSN 41 6343.3 po indukčním povrchovém kalení

Na obr. 14-9 lze pozorovat hloubku indukčního zakalení materiálu ČSN 41 6343.3

Na obr. 14-10 lze pozorovat martenzitickou mikrostrukturu indukčně povrchově kalené vrstvy materiálu ČSN 41 6343.3



Obr. 14-9, Materiál ČSN 41 6343.3, hloubka zakalené vrstvy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 25x



Obr. 14-10, indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 6343.3, mikrostruktura pod povrchem, martenzitická struktura, leptáno Nital 3%, zvětšeno 200x

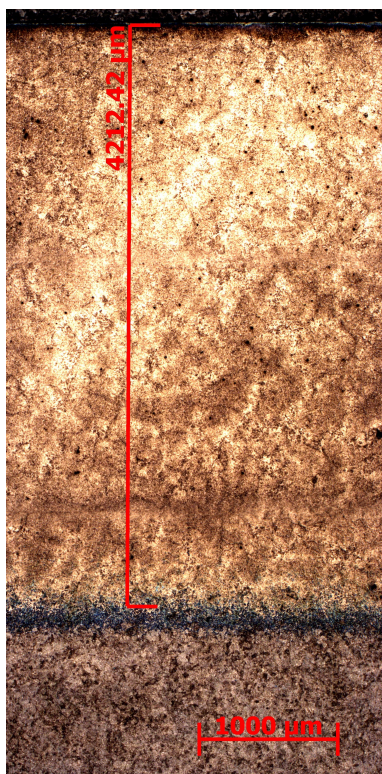
Indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 6343.6

Materiál ČSN 41 6343.6, Indukční povrchové kalení		
Tvrдость na povrchu HV10	Tvrдость 0,15 mm pod povrchem HV1	Hĺoubka prokalení [mm]
622 ± 10	604	4,15

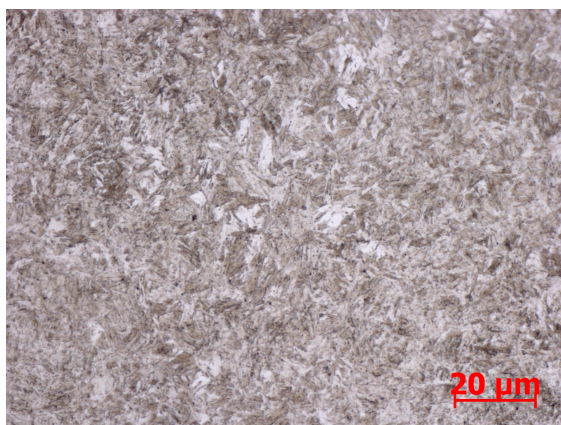
Tab. 14-6, Naměřené hodnoty materiálu ČSN 41 6343.6 po indukčním povrchovém kalení

Na obr. 14-11 lze pozorovat hĺoubku indukčního zakalení materiálu ČSN 41 6343.6

Na obr. 14-12 lze pozorovat martenzitickou a bainitickou mikrostrukturu indukčně povrchově kalené vrstvy materiálu ČSN 41 6343.6



Obr. 14-11, Materiál ČSN 41 6343.6, hĺoubka zakalené vrstvy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 25x



Obr. 14-12, indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 6343.6, mikrostruktura pod povrchem, martenzitická a bainitická struktura, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

Indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 9573.3

Materiál ČSN 41 9573.3, Indukční povrchové kalení		
Tvrдость na povrchu HV10	Tvrдость 0,15 mm pod povrchem HV1	Hĺoubka prokalení [mm]
486 ± 8	527	1,85

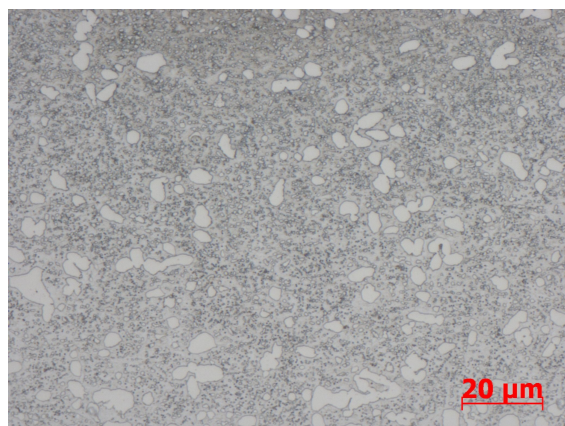
Tab.14-7, Naměřené hodnoty materiálu ČSN 41 9573.3 po indukčním povrchovém kalení

Na obr. 14-13 lze pozorovat hĺoubku indukčního zakalení materiálu ČSN 41 9573.3

Na obr. 14-14 lze pozorovat martenzitickou mikrostrukturu indukčně povrchově kalené vrstvy materiálu ČSN 41 9573.3.



Obr. 14-13, Materiál ČSN 41 9573.3, hĺoubka zakalené vrstvy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 25x



Obr. 14-14, indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 9573.3, mikrostruktura pod povrchem, martenzitická struktura, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

Indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 9573 T1

Materiál ČSN 41 9573 T1, Indukční povrchové kalení		
Tvrdość na povrchu HV10	Tvrdość 0,15 mm pod povrchem HV1	Hloubka prokalení [mm]
800 ± 2	721	Nelze stanovit

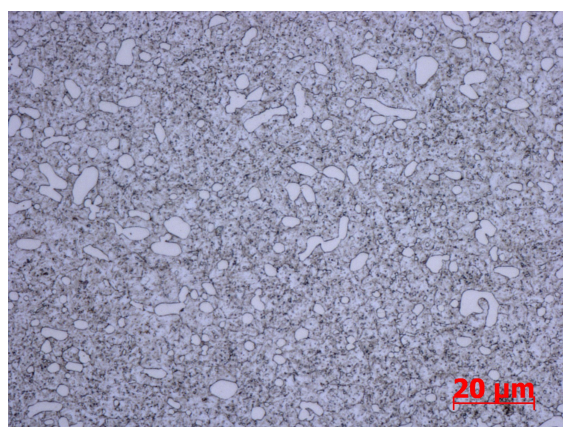
Tab. 14-8, Naměřené hodnoty materiálu ČSN 41 9573 T1 po indukčním povrchovém kalení

Na obr. 14-15 lze pozorovat hloubku indukčního zakalení materiálu ČSN 41 9573 T1

Na obr. 14-16 lze pozorovat martenzitickou mikrostrukturu indukčně povrchově kalené vrstvy materiálu ČSN 41 9573 T1 s rozpuštěnými primárními karbidy



Obr. 14-15, Materiál ČSN 41 9573 T1, hloubka zakalené vrstvy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 25x



Obr. 14-16, indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 6343 T1, mikrostruktura pod povrchem, martenzitická struktura s rozpuštěnými primárními karbidy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x

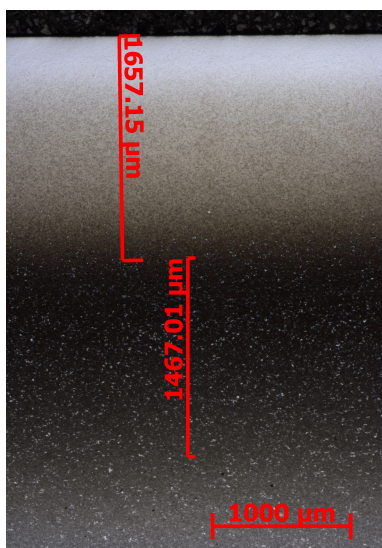
Indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 9573 T2

Materiál ČSN 41 9573 T2, Indukční povrchové kalení		
Tvrдость na povrchu HV10	Tvrдость 0,15 mm pod povrchem HV1	Hĺoubka prokalení [mm]
630 ± 15	484	Nelze stanovit

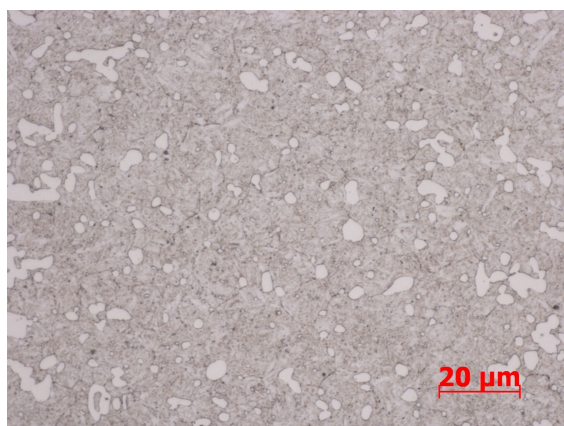
Tab. 14-9, Naměřené hodnoty materiálu ČSN 41 9573 T2 po indukčním povrchovém kalení

Na obr. 14-17 lze pozorovat hloubku indukčního zakalení materiálu ČSN 41 9573 T2

Na obr. 14-18 lze pozorovat martenzitickou mikrostrukturu indukčně povrchově kalené vrstvy materiálu ČSN 41 9573 T2 s rozpuštěnými primárními karbidy



Obr. 14-17, Materiál ČSN 41 9573 T2, hloubka zakalené vrstvy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 25x



Obr. 14-18, indukčně povrchově kalený materiál ČSN 41 6343 T2, mikrostruktura pod povrchem, martenzitická struktura s rozpuštěnými primárními karbidy, leptáno Nital 3%, zvětšeno 500x