

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Bronislav Neduchal
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Slévárenská technologie
Vedoucí práce:	doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Povrchové kalení litiny s kuličkovým grafitem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Litina s kuličkovým grafitem je zajímavým konstrukčním materiálem s výhodným poměrem mezi pevností a tažností a současně mezi technologickými a fyzikálními vlastnostmi. Kromě vysokých mechanických vlastností má litina s kuličkovým grafitem též dobrou slévateľnost nebo dobrou tepelnou vodivost či útlum mechanických vibrací. Tvrdost litiny s kuličkovým grafitem se v závislosti na struktuře litiny pohybuje v rozmezí cca 160 až 280 HB. Pro některé aplikace je nezbytné tvrdost materiálu místně zvýšit. Používány jsou metody povrchového kalení. Při kalení je v současnosti často používáno jako zdroje tepla indukčního ohřevu nebo laseru. Podmínky ohřevu materiálu, struktura materiálu i hloubka prohřátí ovlivňují i tvrdost a tloušťku tepelně ovlivněné – zakalené vrstvy.

Cíle diplomové práce:

Provést teoretický rozbor struktury a vlastností litin s kuličkovým grafitem a provést rozbor a popis metod vhodných pro povrchové kalení litiny. Na vybraných jakostech litiny s kuličkovým grafitem provést povrchové kalení zkušebních vzorků. Posoudit vliv použité technologie povrchového kalení na strukturu a vlastnosti litiny a tloušťku zakalené vrstvy.

Seznam doporučené literatury:

LI, Y., S. DONG, S. YAN, P. HE, B. XU. Phase evolution of ductile iron during laser cladding processing. Surface and Coatings Technology. Volume 339, 15 April 2018, pp. 37 - 47. ISSN 0257-8972.

UKAR, E., A. LAMIKIZ, S. MARTINEZ, F. ESTALAYO, I. TABERNERO. Laser polishing of GGG70L cast iron with 2D scan-head. Procedia Engineering, Volume 63, 2013, pp. 53 - 59. Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2013, Zaragoza, Spain; 26 - 28 June 2013. ISSN 1877-7058.

FAN, X.F., B. HE, Y.M. LUO. Laser hardening of nodular cast iron. Jinshu Rechuli/ Heat Treatment of Metals, Volume 31, Issue 11, November 2006, pp. 29 - 31. ISBN 0254-6051.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na povrchové kalení litin s kuličkovým grafitem. V práci je popsán teoretický rozbor struktur a vlastností litin a jednotlivé metody vhodné pro povrchové kalení. V praktické části je popsána výroba odlitků z litiny s kuličkovým grafitem, na kterých je povrchové kalení prováděno, tahová zkouška, kalení vyrobených odlitků metodou indukčního a laserového povrchového kalení, chystání vzorků pro měření mikrotvrdomosti a metalografický rozbor kovových struktur.

Klíčová slova

Litina s kuličkovým grafitem, povrchové indukční kalení, povrchové laserové kalení, tahová zkouška, příprava metalografického vzorku, měření mikrotvrdomosti

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on the surface hardening of cast irons with spheroidal graphite. The work describes a theoretical analysis of the structure and properties of cast irons and individual methods suitable for surface hardening. The practical part describes the production of cast iron castings with spheroidal graphite, on which the surface hardening is performed, tensile test, hardening of produced castings by induction and laser surface hardening, preparation of samples for measuring microhardness and metallographic analysis of metal structures.

Keywords

Spherical graphite cast iron, surface induction hardening, surface laser hardening, tensile test, preparation of metallographic sample, microhardness measurement

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NEDUCHAL, Bronislav. *Povrchové kalení litiny s kuličkovým grafitem* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-22]. 61s. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124281>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Antonín Záděra.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Povrchové kalení litiny s kuličkovým grafitem“ vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů.

V dne 26.6.2020

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za čas, trpělivost, cenné rady a připomínky při vypracování diplomové práce. Dále děkuji společnosti Slévárna Kuřim, a.s. a společnosti KSK Precise Motion, a.s. za dodané materiály, provedené zkoušky, vynaložené finanční náklady a čas svých zaměstnanců, které s projektem byly spojené. Konkrétně bych chtěl dále poděkovat Ing. Karlovi Neterderovi za nápady a čas, které diplomové práci věnoval. Děkuji také svým rodičům a své ženě za podporu při studiích.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

1	Úvod	9
2	Litina	10
2.1	Dělení litin	10
2.2	Struktura litin	11
3	Grafitické litiny	13
3.1	Litina s lupínkovým grafitem – LLG	13
3.2	Litina s kuličkovým grafitem – LKG	14
3.3	Litina vermikulární – LVG	16
3.4	Litina temperovaná – GJM	17
3.4.1	Temperovaná litina s bílým lomem	17
3.4.2	Temperovaná litina s černým lomem	18
4	Povrchové kalení litiny	19
4.1	Povrchové indukční kalení	21
4.1.1	Princip indukčního ohřevu	23
4.2	Laser	25
4.2.1	Průmyslové lasery	26
4.2.2	Povrchové laserové kalení	29
5	Praktická část	30
5.1	Výroba zkušebních vzorků	30
5.2	Příprava modelu, forma a odlévání	30
5.3	Chemické složení odlitých vzorků	32
5.4	Výsledky tahových zkoušek z YII bloku	33
5.4.1	Metalografie výchozí struktury materiálů	34
5.5	Povrchové kalení	37
5.5.1	Příprava vzorků	37
5.5.2	Indukční kalení	37
5.5.3	Laserové kalení	39
5.6	Příprava metalografického vzorku	41
5.7	Výsledné naměřené mikrotvrlosti	42
5.7.1	Výsledné mikrotvrlosti zakalených materiálů	43
6	ZÁVĚR	56
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	57
	SEZNAM TABULEK	60
	SEZNAM OBRÁZKŮ	60
	SEZNAM GRAFŮ	61

1 Úvod

Litina s kuličkovým grafitem byla oficiálně patentována v r. 1946, kdy britští badatelé Morough a Williams vynalezli způsob výroby LKG už v litém stavu přísadou céru. V roce 1949 byla na základě výzkumu Millisa a Gagnebina patentována v USA výroba LKG přísadou hořčíku, která byla z technických i ekonomických důvodů mnohem výhodnější. To však byl jen počátek moderní historie tohoto materiálu a jeho průmyslové výroby. Trvalo to ještě dalších 15 let, než byla LKG průmyslově akceptována [2].

Tento materiál je díky výhodnému poměru mezi pevností a tažností dobrým konstrukčním materiálem. Jeho další výhody spočívají např. v tepelné vodivosti, slévárenských vlastnostech a útlumu mechanických vibrací. Tvrdost litiny s kuličkovým grafitem závisí nejčastěji na rychlosti ochlazování, poměru feritu a perlitu v kovové matici a tvorbě karbidů. Běžně se tvrdost pohybuje v rozmezí 160 až 280 HB [1]. Pro specifické použití litin s kuličkovým grafitem však běžně dosahovaná tvrdost nestačí. Jedná se především o cyklicky namáhané materiály, které potřebují mít na povrchu tvrdou ošetrnou vrstvu a houževnaté jádro. Jsou to například čepy, vačky, ozubená kola apod. Ke zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy se používá povrchové kalení.

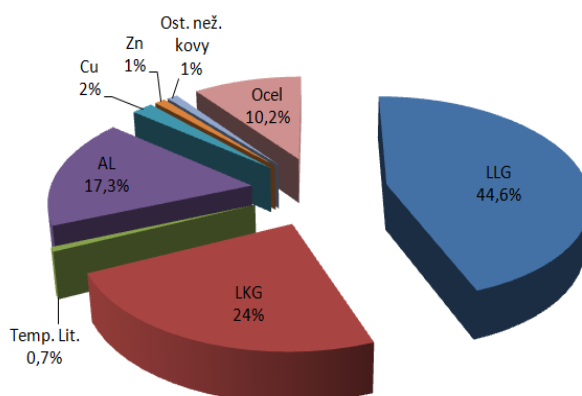
Povrchové kalení je proces, při kterém se ohřeje materiál na austenitizační teplotu a následně se prudce zchladí. Díky prudkému ochlazení vzniká na povrchu materiálu tvrdá martenzitická struktura. Mezi nejpoužívanější metody ohřevu materiálu během povrchového kalení patří ohřev plamenem, laserem, el. odporem a ohřev indukcí [2].

Diplomová práce porovnává metody povrchového kalení u LKG pomocí indukčního a laserového ohřevu materiálu. Hodnotí možnosti použití obou metod, jednotlivé výhody, dosahované tvrdosti a výslednou strukturu materiálu.

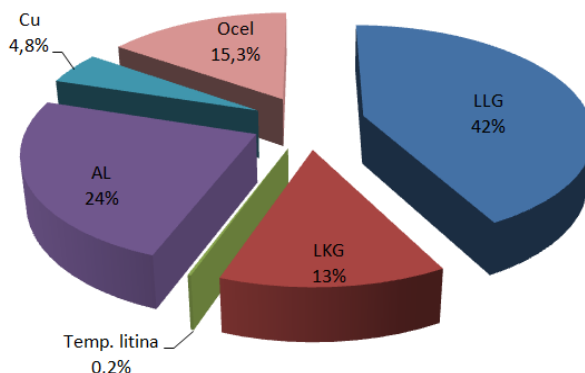
2 Litina

Litina je slitina železa, uhlíku a dalších prvků. Uhlík se vylučuje buď formou grafitu, nebo se váže jako karbid železa, popřípadě karbid jiného prvku. Minimální obsah uhlíku obsažený v litinách je vyšší, než je maximální rozpustnost uhlíku v austenitu [1]. Tavení probíhá v kuplovně, elektrické indukční peci nebo elektrické obloukové peci.

Podle údajů světových slévárenských organizací z roku 2017 litina s lupínkovým a kuličkovým grafitem zaujímá téměř 70% z celkových 109 863 577 tun odlitků. V ČR bylo k roku 2017 okolo 176 sléváren, z nichž se litinovým odlitkům věnovala zhruba polovina. Celkově se u nás za rok 2017 vyrobilo 176 000 tun litiny, což je 0,22 % světové produkce [2].



Graf 1 Světová výroba odlitků za rok 2017 [2]



Graf 2 Výroba odlitků v ČR v roce 2017 [2]

2.1 Dělení litin

Litina může tuhnout podle metastabilního diagramu Fe-Fe₃C, stabilního diagramu Fe-C nebo také podle obou současně. Z hlediska struktury se u litin může vyskytovat eutektikum a primární fáze. Pokud litina tuhne metastabilně, pak v eutektiku vzniká ledeburit, který je tvořen převážně austenitem a karbidem železa. Tyto litiny se označují jako karbidické. Pokud litina tuhne stabilně, pak vzniká grafitické eutektikum, které tvoří austenit a grafit. Tyto litiny se označují jako grafitické. Dále se litiny dělí podle toho, jestli jsou legované či nelegované [1].

2.2 *Struktura litin*

Grafit se v litinách může vylučovat jako eutektický a to různého tvaru (lupínkový, kuličkový, vermikulární atd.) dále se pak může u nadeutektických litin vylučovat jako primární, přičemž při následném tuhnutí dochází k vylučování i eutektického grafitu. U nadeutektických litin se od sebe primární grafit od eutektického rozlišuje zpravidla podle velikosti.

Jednotlivé mechanické, technologické, případně jiné vlastnosti litiny získávají podle typu výsledné kovové matrice.

Uhlík: je základním prvkem, se kterým tvoří Fe slitinu. Ve slitně s Fe se vyskytuje jako čistý C, jako chem. sloučenina Fe_3C nebo jako intersticiální sloučenina.

Jedná se o nekovový prvek, který rozhodujícím způsobem působí na vlastnosti litin. [4]

Ferit: jedná se o intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe- α , který má kubickou prostorově středěnou strukturu BCC. Z hlediska mechanických vlastností je ferit měkký, houževnatý, má nízkou pevnost a mez kluzu, ale naopak vysokou tažnost, tvárnost, svařitelnost, kontrakci a vysoký modul pružnosti [4]. Vzniká při pomalém ochlazení rozpadem austenitu. $R_m=220$ Mpa, $A=70\%$, $HB=50$ [2].

Cementit: jedná se o chemickou sloučeninu Fe_3C (karbid železa). Z hlediska mechanických vlastností je cementit tvrdý, velmi křehký, nemá žádnou tažnost ani houževnatost. Samotný je tak technicky nepoužitelný. Pokud je součástí perlitu, dokáže navyšovat jeho pevnost, zároveň však snižuje jeho tažnost a houževnatost. Vzniká při krystalizaci eutektických a nadeutektických bílých litin, dále pak při eutektické a eutektoidní přeměně u všech bílých litin a segregací jako sekundární a terciální forma [4].

Perlit: jedná se o eutektoidní směs feritu a cementitu. V důsledku obsahu 12,5 % cementitu, má oproti feritu vyšší tvrdost a pevnost. Naopak má ale nižší tažnost a houževnatost [4]. Vzniká při rychlém ochlazení rozpadem austenitu, popřípadě za přítomnosti prvků, které stabilizují perlit (Mn, Cu, aj.). $R_m=800$ MPa, $HB=280$ [2].

Austenit: jedná se o intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe γ , který má kubickou plošně středěnou strukturu FCC, díky čemuž má ve srovnání s jinými kovovými strukturami při stejné teplotě vysokou tvárnost. Oproti feritu má vyšší koeficient teplotní roztažnosti a nižší modul pružnosti. Vzniká při krystalizaci z taveniny nebo při peritektické přeměně [4]. Je měkký a v určitém podílu se může ve struktuře vyskytovat po kalení [2].

Ledeburit: jedná se o eutektickou směs cementitu a austenitu. Vyskytuje se v rozmezí mezi eutektickou a eutektoidní teplotou [4]. Pod eutektoidní teplotou se struktura mění na cementit a perlit a nazývá se ledeburit transformovaný. Má vysokou tvrdost a ořezuvzdornost. Vyskytuje se v bílých litinách popř. jako zákalka [2].

Martenzit: jedná se o přesycený tuhý roztok uhlíku v železe α . Vzniká při kalení bezdifúzní přeměnou austenitu. Pro jeho vznik je nutné dosáhnout nadkritické rychlosti ochlazování pod teplotu martenzit start. Základní struktura martenzitu je tetragonální nebo kubická. Tetragonální martenzit obsahuje tetragonální prostorově středěnou mřížku, která je vysoce tvrdá, pevná, netvárná a pro vysoké vnitřní pnutí také křehká. Kubický martenzit obsahuje kubickou prostorově středěnou mřížku, která vzniká následným tepelným zpracováním (popouštěním) tetragonálního martenzitu. Sníží se tak vnitřní pnutí při zachování vysoké tvrdosti [4].

Bainit: jedná se o kalící strukturu přesyceného tuhého roztoku uhlíku v železe α , která vzniká nedokonalou difúzní přeměnou během rychlého ochlazení austenitu. Z hlediska struktury se jedná o směs feritu a jemně rozptýlených částic karbidů Fe_3C , $\text{Fe}_{2,4}\text{C}$ (tzv. ϵ -karbid). Z mechanických vlastností má vysokou pevnost při poměrně vysoké houževnatosti. Vnitřní pnutí bainitu je malé, není tedy potřeba dalšího tepelného zpracování k jeho snížení. Má tvar jehlic nebo desek [4].

3 Grafitické litiny

Grafitické litiny vylučují při tuhnutí uhlík různého tvaru. Při eutektoidní transformaci může být struktura čistě feritická nebo je uhlík rozpuštěn v perlitické matici, kde je uhlík ve formě cementitu.

Na jednotlivé vlastnosti litin má vliv velikost, tvar, rozložení grafitu a druh matrice.

Grafitické litiny mají oproti ocelím následující výhody: o cca 8 % nižší měrnou hmotnost, lepší třecí vlastnosti, lepší obrobiteľnosť, väčší schopnosť tlumení a menší citlivosť na vruby. U litin, ktoré majú kuličkový a vločkový tvar grafitu, lze dosáhnout srovnatelných mechanických vlastností s nelegovanou ocelí a přitom lze využívat jejich specifických vlastností. Struktury a specifické mechanické vlastnosti lze u grafitických litin, stejně jako u oceli, ovlivňovat volbou vhodného tepelného zpracování.

Značení jednotlivých druhů litin vychází z normy ČSN EN 1560. Jednotlivé dělení probíhá dle tvaru vyloučeného grafitu [5].

Je nutno uvést, že se pro litinu s kuličkovým grafitem používalo v letech 1945 až 1993 v bývalém Československu označení tvárná litina. Tento název zahrnovaly i normy ČSN používané v ČR. Název se natolik vžil do podvědomí, že se běžně používá dodnes. V zahraničí byl však z důvodů špatného překladu tento výraz příčinou problémů. Výraz tvárná litina byl zrušen vydáním normy ČSN EN 1563, kde se zavedlo označení litina s kuličkovým grafitem (zkratka LKG) a v případě litiny s lupínkovým grafitem zkratka LLG. V zahraničí se litiny z LKG označují zkratkou GJS a odlitky z LLG zkratkou GJL [9].

3.1 Litina s lupínkovým grafitem – LLG

Ve struktuře je obsažen grafit ve formě lupínků (**obr.1**). Základní kovovou maticí tvoří různý podíl feritu a perlitu. Výsledné pevnosti se pohybují od 100 MPa při tvrdostech 150 HB u feritických litin po 350 MPa a 180 – 260 HB u perlitických litin. Tažnosti jsou většinou pod 1 % a proto se ani nevyhodnocují. Mezi vlastnosti LLG patří výborná tepelná vodivost, dobré slévárenské vlastnosti, vysoká mez únavy a tlumení vibrací a pevnost v tlaku, která je 2,5 – 4 krát vyšší než je pevnost v tahu. [2].

LLG jsou převážně podeutektické slitiny jejichž chemické složení je podle [5] v **tab. 1**, s možným výskytem dalších legujících prvků jako Cr, Cu, Mo, Ni, Sn aj. "



Obr. 1 Struktura litiny s lupínkovým grafitem [15]

Tab. 1 Základní chemické složení LLG [5]

Prvek	C	Si	Mn	P	S
hmot. %	2,80-3,60	1,70-2,40	0,50-1,00	0,20-0,50	max. 0,15

Příklad mechanických vlastností LLG popisuje **tab. 2**

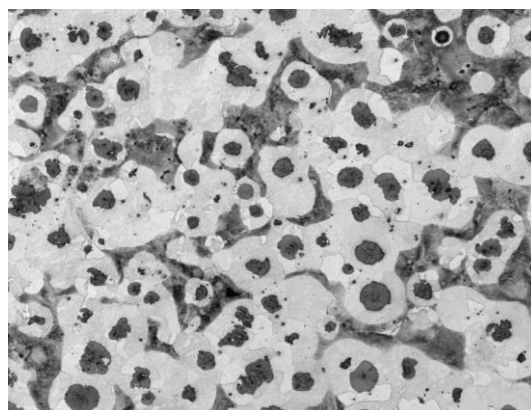
Tab. 2 Mechanické vlastnosti LLG [2]

Označení materiálu	Pevnost v tahu (min.) Rm [MPa]	Mez kluzu (min) Re [MPa]	Tvrдость HB max.	Struktura matrice
EN-GJL-100	100-200	-	180	ferit + stopy perlit
EN-GJL-150	150-250	98-165	200	ferit + perlit
EN-GJL-200	200-300	130-195	220	ferit + perlit
EN-GJL-250	250-350	165-228	240	perlit + ferit
EN-GJL-300	300-400	195-260	260	perlit
EN-GJL-350	350-450	228-285	270	perlit

3.2 Litina s kuličkovým grafitem - LKG

Litina s kuličkovým grafitem má ve struktuře grafit, který je přítomen převážně ve tvaru kuliček (**obr. 2**). Ve srovnání s LLG má výrazně lepší mech. vlastnosti, jelikož tvar grafitu podstatně méně narušuje kovovou matici. Při vysokých pevnostech zároveň dosahuje vysoké tažnosti a houževnatosti. Základní kovová matrice je feritická, feriticko-perlitická a perlitická [3].

LKG jsou převážně eutektické, příp. nadeutektické slitiny jejichž chemické složení je podle [5] v **tab. 3**.



Obr. 2 Struktura litiny s kuličkovým grafitem [16]

Tab. 3 Základní chemické složení LKG [5]

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Mg
hmot. %	3,20-4,00	1,80-3,00	0,20-0,80	max 0,10	max. 0,05	0,04-0,08

K hodnocení chemického složení se využívá stupeň eutektičnosti S_e , který určuje vliv jednotlivých průvodních prvků na polohu eutektického bodu. Jedná se především o uhlík, křemík a fosfor. Podle polohy eutektického bodu se určuje, jestli se jedná o litinu podeutektickou, eutektickou nebo nadeutektickou [5].

Stupeň eutektičnosti lze určit ze vztahu [1]:

$$S_e = \frac{C}{4,25 - 0,3(Si + P)} \quad (1.1)$$

Pokud je:

$S_e < 1$ výsledná litina je podeutektická

$S_e = 1$ výsledná litina je eutektická

$S_e > 1$ výsledná litina je nadeutektická

Z chem. složení v **tab. 2** je patrné, že oproti LLG může mít LKG vyšší obsahy uhlíku a křemíku a obsahuje navíc také hořčík, který je potřebný pro modifikaci tvaru vyloučeného grafitu.

Modifikace LKG probíhá přidáním čistého hořčíku nebo předslitinami typu Ni-Mg, Cu-Mg, Fe-Si-Mg, Cu-Mg-Ce v pánvi, popř. ve formě. Pro dobrý průběh modifikace a tím tvorby kuličkového grafitu je nutné, aby byl v litině obsah síry 0,015 - 020 hmot. %.

Po modifikaci následuje grafitizační očkování, které ruší karbidotvorný účinek hořčíku v litině a potlačuje vznik cementitu [5]. Jedná se o metodu vnášení ferosilicia (Fe-Si), které obsahuje další prvky typu zirkonium a stroncium. Tyto prvky vytvářejí oxidy a sulfidy s hexagonální mřížkou, na nichž může růst grafit.

Očkováná litina obsahuje jemnější grafit, který může být rovnoměrně rozložený v celém odlitku. Litina s jemnozrnnou strukturou má lepší mech. vlastnosti, než kdyby měla strukturu hrubozrnnou.

Očkování litiny se dále používá ve chvíli, kdy jsou nepříznivé podmínky pro samotnou grafitizaci litiny, např. velká rychlost ochlazování odlitku (tenké stěny odlitku), nízký uhlíkový ekvivalent, malý výskyt grafitizačních prvků (Si, Cu, Ni, Al) a naopak velký obsah karbidotvorných prvků (Mg, Cr, B, V, Mo) [1].

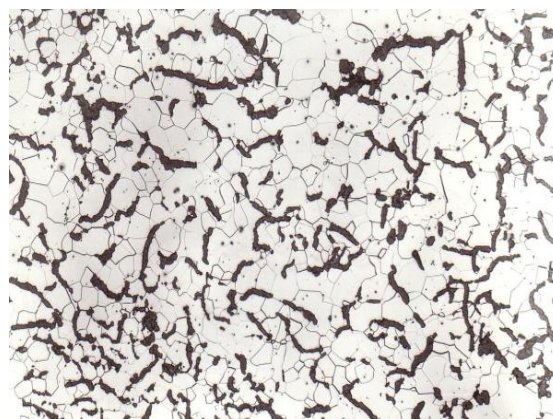
LKG, která obsahuje feritickou matici, se vyznačuje vysokou tažností, houževnatostí, dobrou obrobitelností a nižší pevností v tahu. Feritická matrice se dosahuje zvýšením obsahu křemíku a současně snížením obsahu manganu (pod 0,4 hmot. %). Mez pevnosti se pohybuje od 350 MPa s tažností 22 % do 400 MPa s tažností 18 %. LKG, která obsahuje perlitickou matici, se vyznačuje vyšším obsahem manganu (nad 0,4 hmot. %) a také obsahem přidané mědi (1 hmot. %). Dosahuje vysoké pevnosti v tahu, se kterou klesá tažnost a vysokou mez kluzu. Mez pevnosti se pohybuje od 700 MPa s tažností 2 % do 900 MPa s tažností 2 % [5]. Příklad mechanických vlastností LKG dle normy ČSN EN 1563 popisuje **tab. 4**.

Tab. 4 Mechanické vlastnosti LKG [5]

Označení materiálu	Pevnost v tahu (min.) R_m [MPa]	Mez kluzu (min.) $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost A (min.) [%]	Struktura matrice
EN-GJS-350-22	350	220	22	ferit
EN-GJS-400-15	400	250	18	ferit
EN-GJS-500-7	500	320	7	ferit+perlit
EN-GJS-600-3	600	370	3	perlit+ferit
EN-GJS-700-2	700	420	2	převážně perlit
EN-GJS-800-2	800	480	2	perlit

3.3 Litina vermikulární - LVG

Mechanické vlastnosti vermikulární litiny leží mezi LLG a LKG. Struktura je tvořena červíkovitým grafitem (**obr. 3**) a základní kovová hmota je nejčastěji feriticko-perlitická. V objemu celého odlitku nemusí být tvar vyloučeného grafitu pouze červíkový. Běžně bývá povoleno cca 20 % kuličkového grafitu [2]. Výskyt lupínkového grafitu se považuje za nežádoucí. Výroba vermikulární litiny vychází z principu modifikace grafitu podobně jako u LKG, přičemž je sníženo množství modifikační přísady popř. se může využívat prvků bránících dokonalé globularizaci grafitu (titan) [2]. LVG doposud není normalizována evropskou normou, v současnosti je však cíleně vyráběným materiálem. Litiny s červíkovitým grafitem jsou vhodné pro tepelně namáhané odlitky, především ocelářské kokily, hlavy a bloky válců a části brzd vozidel [5].



Obr. 3 Struktura litiny s vermikulárním grafitem [17]

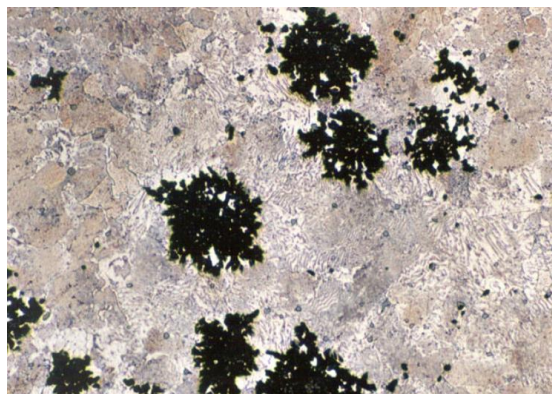
Příklad mechanických vlastností LVG dle normy ČSN EN 1563 popisuje **tab. 5**

Tab. 5: Mechanické vlastnosti LVG [2]

Označení materiálu	Pevnost v tahu (min.) R_m [MPa]	Mez kluzu (min.) $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost A (min.) [%]	Struktura matrice
LVG - 300	300	240	2,00	ferit
LVG - 400	400	280	1,00	ferit + perlit
LVG - 500	500	340	0,50	perlit

3.4 Litina temperovaná – GJM

Temperovaná litina je technická slitina železa, uhlíku, křemíku, manganu a dalších prvků, ve které je uhlík vyloučen částečně anebo úplně jako vločkový grafit (**obr. 4**). Vzniká tepelným zpracováním tzv. temperováním odlitků z bílé litiny. Výchozí tavenina musí tedy ztuhnout podle metastabilní soustavy Fe-Fe₃C. Strukturu bílé litiny určené k temperování tvoří perlit a ledeburitický cementit.



Obr. 4 Struktura litiny s vločkovým grafitem [18]

Výrobní proces temperované litiny spočívá v tepelném zpracování. Účelem tepelného zpracování je úplný rozpad ledeburitického cementitu (Fe₃C – 3 Fe + C) a částečný, případně úplný rozpad perlitu. Temperovaný uhlík se přitom vylučuje ve tvaru vloček. Tvar vločkového grafitu už tak nepůsobí vrubovým účinkem na kovovou matici jak je tomu u LLG. V odlitcích se tak zvyšuje pevnost, mez kluzu a výrazně tažnost. V porovnání s LKG je však kvalita mech. vlastností temperované litiny nižší a používala se hlavně před objevením LKG jako konkurenční materiál k odlitkům z oceli. Temperované litiny se dělí na 2 základní skupiny:

- oduhličená temperovaná litina s bílým lomem
- neoduhličená temperovaná litina s černým lomem

Od poměrně malých rozdílů v chemickém složení určuje materiálovou skupinu (s bílým nebo černým lomem) hlavně atmosféra v žíhací peci [3].

3.4.1 Temperovaná litina s bílým lomem

Temperovací proces probíhá v peci, uvnitř které je oduhličující oxidační atmosféra. Skládá se z vodních par a z plynů oxidu uhličitého, oxidu uhelnatého a vodíku. Takto vytvořená směs vodní páry a plynů odebírá odlitkům uhlík, který oxiduje, aniž by vznikaly na povrchu odlitku okuje. Teplota žíhání je 1050 °C. Zároveň s oduhličením probíhá rozpad ledeburických karbidů na austenit a temperovaný grafit. Oduhličením povrchu se sníží obsah uhlíku v austenitu a vznikne tak nerovnováha na rozhraní austenit – cementit. Díky tomu se při obnovení rovnováhy určitá část uhlíku z cementitu v austenitu rozpustí. U tenkostěnných odlitků lze dlouhodobým žíháním dosáhnout čistě feritické struktury, kdežto u odlitků s větší tloušťkou mají povrchovou vrstvu feritickou, dále se pak směrem do středu odlitku vyskytuje ferit a perlit a v úplném středu je perlit s temperovaným grafitem.

Orientační chemické složení temperované litiny s bílým lomem je ukázáno v **tab. 6** [5].

Tab. 6 Orientační chemické složení temperované litiny s bílým lomem [5]

Prvek	C	Si	Mn	P	S
hmot. %	3,00-3,40	0,40-0,80	0,40-0,60	max 0,10	0,12-0,25

Příklad mechanických vlastností temperované litiny s bílým lomem dle normy ČSN EN 1563 popisuje **tab. 7**

Tab. 7 Mechanické vlastnosti temperované litiny s bílým lomem [5]

Označení materiálu	Pevnost v tahu (min.) Rm [MPa]	Mez kluzu (min.) Rp0,2 [MPa]	Tvrдость HB	Tažnost A (min.) [%]
EN-GJMW-350-4	350	-	230	4
EN-GJMW-360-12	360	190	200	12
EN-GJMW-400-5	400	220	220	5
EN-GJMW-450-7	450	260	220	7
EN-GJMW-550-4	550	250	250	4

3.4.2 Temperovaná litina s černým lomem

U temperované litiny s černým lomem je veškerý uhlík vyloučen ve tvaru vločkového grafitu. Při procesu žhání nedochází k oduhlíkování litiny, proto se volí průměrný obsah uhlíku 2,5 %. Tepelné zpracování probíhá ve dvou stupních. V prvním grafitizačním stupni se v neutrální atmosféře při 950 °C rozpadá ledeburitický cementit podle $Fe_3C - 3 Fe + C_{graf}$ a přitom se vylučuje temperovaný grafit. Ve druhém stupni se žháním získává požadovaná struktura základní kovové hmoty a vzniká tak požadovaný druh litiny. Orientační chemické složení temperované litiny s bílým lomem je ukázáno v **tab. 8**.

Tab. 8 Orientační chemické složení temperované litiny s černým lomem [5]

Prvek	C	Si	Mn	P	S
hmot. %	2,30-3,60	1,20-1,50	0,40-0,50	max 0,10	0,10-0,15

Příklad mechanických vlastností temperované litiny s černým lomem dle normy ČSN EN 1563 popisuje **tab. 9** [5]

Tab. 9 Mechanické vlastnosti temperované litiny s černým lomem

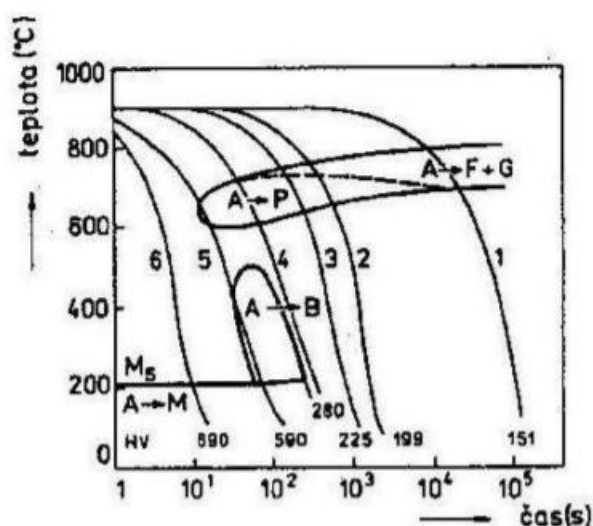
Označení materiálu	Pevnost v tahu (min.) Rm [MPa]	Mez kluzu (min.) Rp0,2 [MPa]	Tvrдость HB	Tažnost A [%]
EN-GJMW-300-6	300	-	max 150	6
EN-GJMW-450-6	450	270	max 150	6
EN-GJMW-550-4	550	340	180-230	4
EN-GJMW-600-3	600	390	195-245	3
EN-GJMW-800-1	800	600	270-320	1

4 Povrchové kalení litiny

Cílem povrchového kalení je zvýšení tvrdosti v povrchové vrstvě materiálu, přičemž jádro zůstává v původním stavu s původními vlastnostmi. Jedná se tak především o odlitky, které jsou z velké části namáhané kluzným třením [6]. Kalení je založeno na principu rychlého ohřevu materiálu na kalící teplotu a jeho následného prudkého ochlazení vodní sprchou, příp. ponoření do ochlazovací lázně [14].

V závislosti na rychlosti ochlazování může být ve struktuře:

- při malé rychlosti ochlazování perlit
- při vyšší rychlosti ochlazování bainit
- při nadkritické rychlosti ochlazování martenzit



Obr. 5 Diagram ARA neleg. LKG (3,61 % C, 2,83 % Si, 0,20 % Mn) [5]

Na **obr. 5** je schematicky znázorněn ARA diagram nelegované litiny s kuličkovým grafitem, který zobrazuje výslednou strukturu materiálu v závislosti na rychlosti ochlazování. **Křivka 1** má nejnižší rychlost ochlazování a prochází přes oblast, kde se austenitu mění na ferit + grafit. **Křivky 2 a 3** mají vyšší rychlost ochlazování a ve výsledné struktuře se nachází feriticko-perlitická matrice. Se zvyšující rychlostí ochlazování je patrné, že struktura u **křivky 4** je plně perlitická. **Křivka 5** protíná oblast perlitu, bainitu a martenzitu. Výsledná struktura tedy obsahuje všechny tři složky. **Křivka 6** míjí jak oblast perlitu, tak i oblast bainitu a končí ve struktuře martenzit start. Zde se austenit mění přímo na martenzit a rychlost ochlazování se nazývá jako nadkritická.

Martenzitickým zakalením se dosahuje zpevnění povrchu, zvýšení ořezavzdornosti materiálu a zvýšení tvrdosti [15]. Výsledná tvrdost litin po martenzitickém kalení se pohybuje okolo 50 až 55 HRC [7].

K ohřevu litiny se mohou volit různé způsoby [3]:

- ohřev indukční
- ohřev elektrickým odporem
- ohřev přímým plamenem
- ohřev laserem

Tato diplomová práce se věnuje ohřevu LKG pomocí indukčního ohřevu a laseru.

Při ohřevu materiálu by se měly dodržovat následující podmínky [7]:

- minimální spotřeba energie
- zamezení vzniku trhlin
- minimální oxidace povrchu

Tloušťka zakalené vrstvy dosahuje 0,5 až 5 mm [14] v závislosti na použité technologii ohřevu příp. legujících prvcích (Mo, Ni) [6].

Obecně se uvádí, že aby byl povrch dobře kalitelný, měl by být zaručen ve struktuře co největší obsah perlitu a co nejnižší obsah feritu (15 hm. %) [7]. Minimální obsah uhlíku by měl být 0,35 % [6], což platí hlavně pro ocel. U nižšího obsahu hrozí menší výsledné tvrdosti, vzhledem k menšímu přesycení austenitu.

Doba potřebná k nasycení austenitu uhlíkem je poměrně krátká. Proto se klade důraz, aby struktura materiálu byla co nejvíce perlitická. V perlitické struktuře se může počítat s rovnoměrně rozloženým karbidem železa (Fe_3C), ze kterého se následně v celém objemu materiálu může nauhlíčit nově vzniklý austenit. V opačném případě, kdy ve struktuře převládá ferit, se vzniklý austenit může nauhlíčit pouze z vyloučeného grafitu, na to však při rychlém povrchovém kalení nezbyvá dost času. Austenit se tak nestihne nasytit uhlíkem a výsledkem je pak nízká výsledná tvrdost zakalené vrstvy materiálu.

Aby došlo k prohrátí pouze povrchové vrstvy, je nutné, aby byla rychlost ohřevu velmi vysoká (cca 500 °C/s [14]) a naopak doba ohřevu co nejkratší. Díky vysoké rychlosti ohřátí materiálu na požadovanou teplotu je zaručeno zjemnění austenitického zrna a tím i výsledné martenzitické struktury. Materiál tak dosahuje vyšších hodnot tvrdosti [6].

Na **obr. 6** jsou ukázány povrchově zakalené válečky. Z obrázku je patrné, že každý povrch válečku má jiný barevný vzhled. Jedná se o různé tloušťky povrchového zakalení, které závisí na použití konkrétní technologie kalení a nastavení technických parametrů.



Obr. 6 Povrchově zakalené válečky s různou tloušťkou zakalené vrstvy [19]

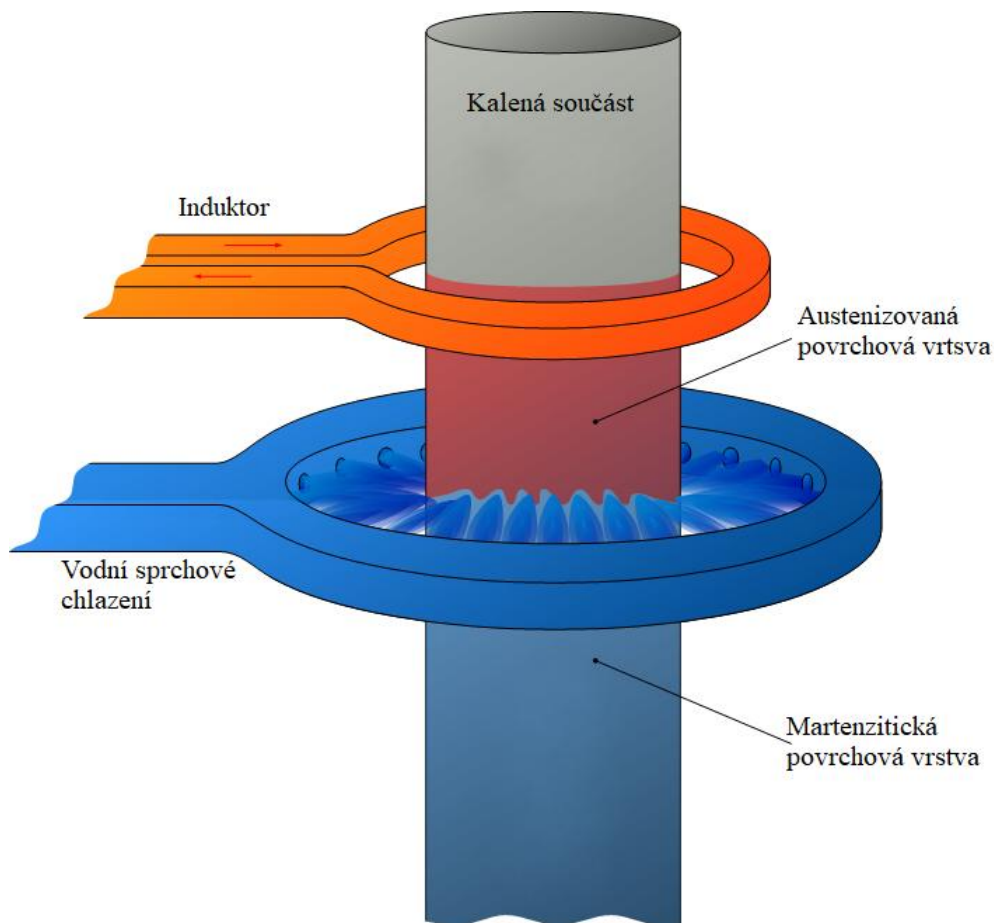
4.1 Povrchové indukční kalení

Princip indukčního ohřevu se ve výrobních procesech používá od 20. let 20. století.

Indukční ohřev probíhá v elektricky vodivém materiálu, který je umístěn v měnícím se magnetickém poli. Magnetické pole vzniká pomocí indukční cívky, která je připojena k výkonnému indukčnímu napájecímu zdroji. Indukční napájecí zdroj dokáže přesně řídit ohřev materiálu, vytvářet opakovatelné výsledky ohřevu specifické pro požadovanou aplikaci a reagovat na změny vlastností materiálu během ohřívacího cyklu [10].

Indukční ohřev je zvláště užitečný tam, kde jsou prováděny opakující se operace. Jakmile je indukční zařízení správně nastaveno, materiál se může povrchově kalit ve zcela automatickém provozu, kde jsou obrobky mechanicky zakládány. Po zahřátí materiálu na požadovanou teplotu následuje ihned ochlazení vodní sprchou [6], což zaručuje nadkritickou rychlost ochlazování a spěje tak k martenzitické struktuře v materiálu. Je nutno ohřívát velmi pozorně, aby nedošlo k natavení povrchových oblastí odlitku.

Obr. 7 znázorňuje kalenou válcovitou součást. Induktor, který kopíruje tvar kalené součásti, nahřeje povrch materiálu do austenitizačních teplot. V zápětí následuje vodní sprchové ochlazení a povrch součásti získává martenzitickou strukturu.



Obr. 7 Schéma indukčního kalení [20]

Výhodou uvedené technologie je vysoká rychlost ohřevu, jeho regulovatelnost a čistota. Nedochozí zde ke styku induktoru s ohřivanou částí, a proto nedochází k žádné nežádoucí změně chemického složení povrchu materiálu. Díky bezkontaktnímu způsobu zahřívání, může být materiál ponořen v kapalině, umístěn v plynném prostředí příp. ve vakuu [10]. Induktor lze navrhovat na mnohem nižší teplotu, než na jakou ohříváme materiál [8]. Indukční cívky jsou obvykle vodou chlazené měděné vodiče. V praxi se používají různé tvary cívek. Nejčastěji se používá spirálová cívka s více závitů. Pro tuto cívku je šířka topného vzoru definována počtem závitů. Jednozávitové cívky jsou užitečné pro aplikace, kde je vyžadováno zahřívání úzkého pásu součásti nebo špičky materiálu [11].

Další žádoucí charakteristikou indukčního ohřevu je jeho schopnost ohřívát pouze malou část materiálu, což nabízí výhody tam, kde není nutné zahřívát materiál celý. Mohou tak být místně zakaleny levnější materiály, oproti použití kvalitnějších a dražších, aby se dosáhlo požadované trvanlivosti.

U povrchově kalených odlitků z LKG se běžně udává maximálně přípustný obsah feritu 30%, podle zdroje [6] se však doporučuje pouze 15% feritu ve struktuře. Ze tříd LKG tomuto požadavku vyhovují EN- GJS- 600- 3 a EN- GJS-700-2. Ze tříd LLG by měla být struktura čistě perlitická, nebo obsah feritu naprosto minimální. To platí pro EN- GJL-250 a EN- GJL-300 [6].

Pro návržení indukčního topného systému je třeba vzít v úvahu následující faktory [10]

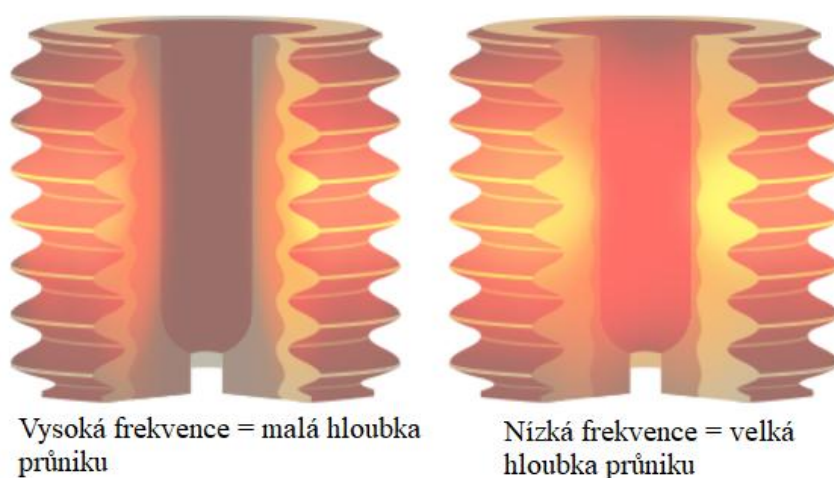
- Proces indukčního ohřevu se obvykle používá pro kovy a vodivé materiály
- Při aplikaci na magnetické materiály je teplo generováno jak vířivým proudem, tak hysterezním účinkem magnetických materiálů.
- Malé a tenké materiály se rychleji ohřívají ve srovnání s velkými a silnými materiály
- S rostoucí frekvencí střídavého proudu klesá hloubka prohrátého materiálu
- Materiály s vyšším odporem se rychle zahřívají
- Induktor, do kterého má být zahříván materiál umístěn, by měl umožňovat snadné vložení a vyjmutí materiálu
- Při nastavování induktoru je třeba vzít v úvahu počáteční teplotu materiálu, jeho hmotnost a požadované zvýšení teploty. Je také nutno započítat ztráty tepla způsobené vedením, prouděním a sáláním.

4.1.1 Princip indukčního ohřevu



Obr. 8 Detail měděné, vodou chlazené, cívky [11]

Indukční ohřev je založen na indukování elektrického proudu v ohřívaném materiálu pomocí proměnného magnetického pole. **Obr. 8** znázorňuje cívku, která je chlazená vodou a připojena k el. proudu. Teplo se vytváří na povrchu materiálu [10]. Hloubka, do které se teplo generuje přímo pomocí indukovaného proudu, závisí na tzv. elektrické referenční hloubce, která do značné míry závisí na použité frekvenci střídavého proudu protékající cívku. Vyšší frekvence má za následek nižší elektrickou referenční hloubku a naopak nižší frekvence má za následek vyšší elektrickou referenční hloubku, tento jev se nazývá jako skin efekt. Příklad je uveden na **obr. 9**. Dále tato hloubka závisí na elektrických a magnetických vlastnostech ohřívaného materiálu. Jakmile se povrch zahřeje, teplo se dál vede materiálem tepelným vedením [12].



Obr. 9 Příklad závislosti použité frekvence na hloubce průniku [12]

Pro určení hloubky vrstvy průniku vířivých proudů do materiálu platí vztah [10]:

$$D = 5000 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad (2.2)$$

D = hloubka průniku vířivých proudů do materiálu [cm]

μ = relativní magnetická permeabilita materiálu [-]

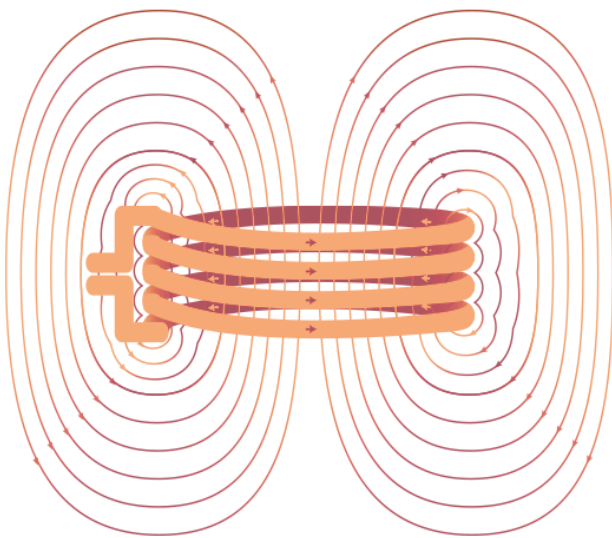
ρ = měrný elektrický odpor materiálu [Ωm]

f = použitá frekvence střídavého proudu [Hz]

Samotné teplo v materiálu vzniká hysterezí a vznikem vířivých proudů.

Hystereze se vyskytuje pouze u magnetických materiálů. Jedná se o tření mezi atomy, když je materiál nejprve magnetizován v jednom směru a poté ve druhém. Na atomy lze pohlízet jako na malé magnety, které se otáčejí pokaždé, když magnetické pole změni směr. K převrácení je zapotřebí práce (energie). Energie se mění v teplo. Míra spotřeby energie se zvyšuje s rostoucí rychlostí reverze (frekvence) [13]. Směr magnetického pole závisí na směru toku proudu. Střídavý proud vedený cívkou bude mít za následek změnu magnetického pole stejnou rychlostí jako je frekvence střídavého proudu. 60 Hz střídavý proud způsobí, že magnetické pole změni směr 60krát za sekundu. 400 kHz střídavý proud způsobí přepínání magnetického pole 400 000krát za sekundu [11]. Středně frekvenční generátory pracují s frekvencí okolo 5000 Hz, vysokofrekvenční generátory pracují s frekvencí až 2 MHz [14].

Vířivé proudy vycházejí z Faradayova zákona o elektromagnetické indukci a vyskytují se v každém vodivém materiálu v měnícím se magnetickém poli. To platí, i když materiály nemají žádné z magnetických vlastností. Příklady jsou měď, mosaz, hliník, zirkonium, korozivzdorná ocel a uran. Vířivé proudy jsou indukovány v materiálu. Jak název napovídá, proudí ve vírech. Teplo vzniklé díky vířivým proudům je při indukčním zahřívání mnohem důležitější než teplo vzniklé hysterezí. Na indukční cívku je přivedeno vysokofrekvenční napájení a materiál, který má být zahříván, je umístěn uvnitř cívky. Střídavý proud prochází cívkou a generuje se kolem něj střídavé magnetické pole. Když materiál umístěný uvnitř induktoru spadá do rozsahu tohoto střídavého magnetického pole, generuje se v materiálu vířivý proud. Vířivý proud prochází materiálem a tím se v materiálu vytváří teplo. To vysvětluje proces bezkontaktního indukčního ohřevu [13].



Obr. 10 Tok proudu v indukční cívce a vznik vířivých proudů [13]

Obzvláště důležité je, že indukční cívku je přivedeno vysokofrekvenční napájení a materiál, který má být zahříván, je umístěn uvnitř cívky. Střídavý proud prochází cívkou a generuje se kolem něj střídavé magnetické pole. Když materiál umístěný uvnitř induktoru spadá do rozsahu tohoto střídavého magnetického pole, generuje se v materiálu vířivý proud. Vířivý proud prochází materiálem a tím se v materiálu vytváří teplo. To vysvětluje proces bezkontaktního indukčního ohřevu [13].

Obr. 10 znázorňuje tok proudu v indukční cívce a vznik vířivých proudů okolo ní [13].

4.2 Laser

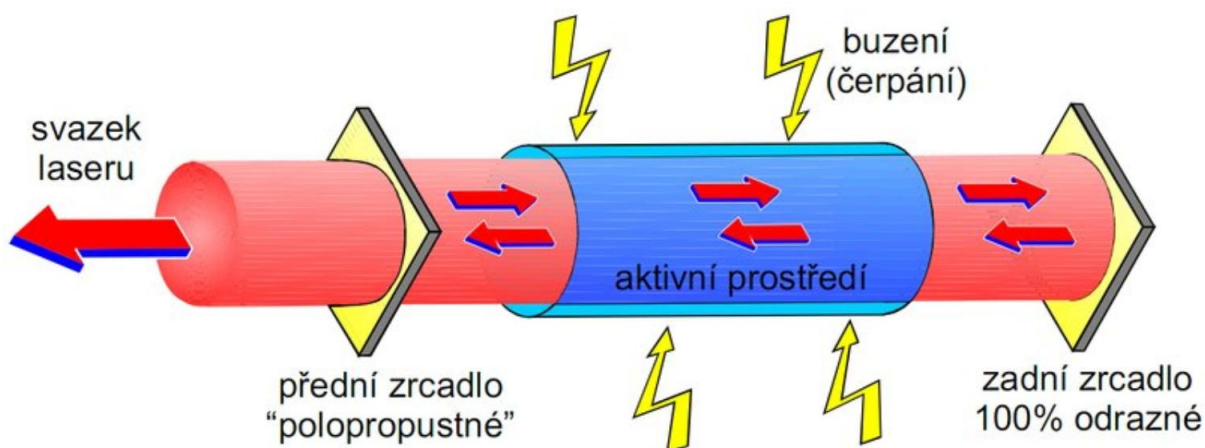
Začátkem roku 2020 oslavil laser 60 let své existence. Za tu dobu se laser stal součástí všech možných odvětví lidské činnosti. Hlavní využití laseru se nachází v průmyslu, medicíně, vědě a výzkumu a elektrotechnice.

Zkratka laser vychází z anglického Light Amplification by Stimulated of Radiation, což v překladu znamená „zesilování světla stimulovanou emisí záření“. Jedná se o optický zesilovač, který vytváří elektromagnetické záření díky procesu stimulované emise fotonů.

Laser se skládá z aktivního prostředí, které je opticky, elektricky případně jinými způsoby buzeno. Právě buzením získává laser svoji energii, kterou pomocí procesu stimulované emise vyzáří v podobě laserového svazku. Dále laser využívá tzv. optický rezonátor, který bývá tvořen odraznými zrcadly.

Aktivní prostředí obsahuje elementy, které se mohou nacházet ve stavu s nižší energií nebo ve stavu vybuzeném (excitovaném) s vyšší energií. Elementy jsou nejčastěji atomy, chemické vazby, vibrační stavy molekul apod. Při přechodu z vybuzeného stavu do nižšího energetického stavu vyzáří element foton. Vyzářený foton dále dopadá na další element, který se nachází ve vybuzeném stavu a způsobí jeho přechod z horní a dolní energetickou hladinu. Přitom dojde k emisi dalšího fotonu. Vyzářené fotony se odráží mezi jednotlivými zrcadly, jejich počet rapidně narůstá a vytváří se lavinový efekt. Výsledkem je uvolnění energie jako proud fotonů, což se nazývá laserový svazek [21].

Obr. 11 zobrazuje schéma laseru, kde je znázorněno buzení aktivního prostředí, které rozkmitává jednotlivé fotony. Fotony se následně odráží mezi zadním odrazným a předním polopropustným zrcadlem. Mezi zrcadly se odráží do chvíle, než jako svazek projdou přes přední polopropustné zrcadlo.



Obr. 11 Schéma laseru [21]

4.2.1 Průmyslové lasery

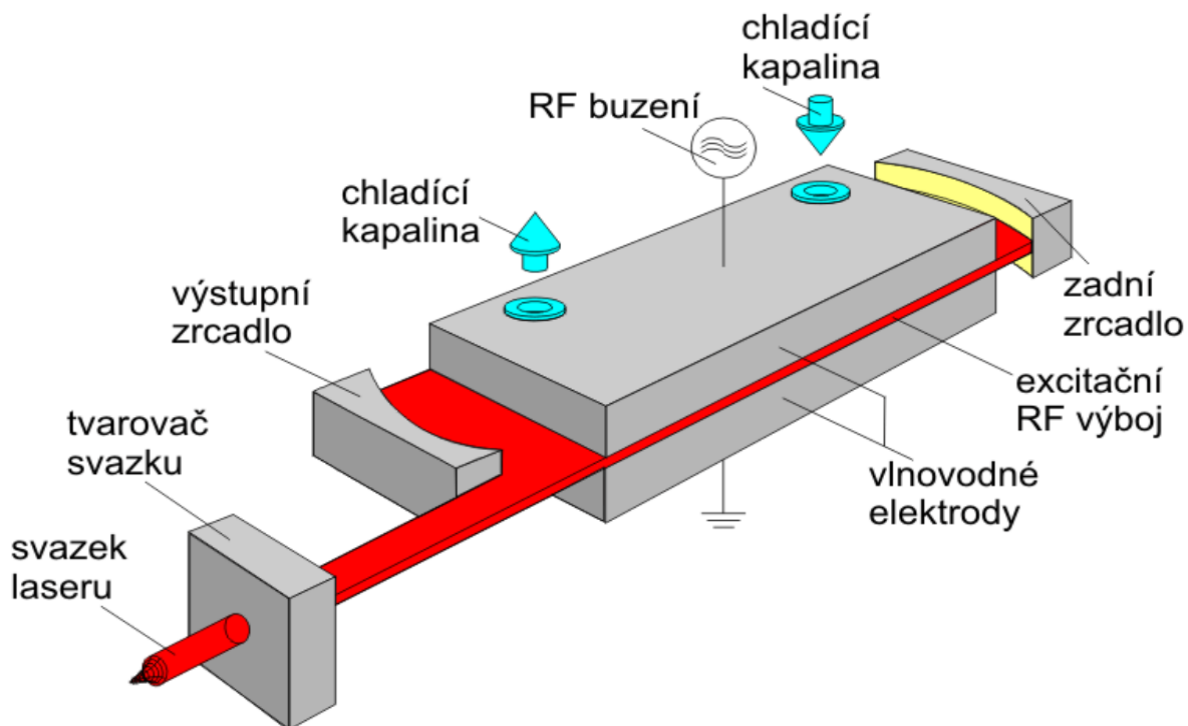
Plynové CO₂ lasery

Patří k nejstarším typům laserů. Aktivní prostředí zde tvoří plyn nebo směs plynů. Pro průmyslové využití se uplatňují lasery s oxidem uhličitým CO₂, které patří k vůbec nejvýkonnějším typům laserů [24]. Buzení probíhá buď radio-frekvenčně (RF) nebo elektrickým výbojem (DC – direct current). Dále se dělí podle uzavřenosti rezonátoru na tzv. sealed off lasery, které mají hermeticky uzavřený rezonátor a na tzv. průtočné lasery, kdy rezonátorem plyn proudí, což se využívá u vyšších výkonů okolo 10 kW [25].

Střední výkon (od 500 W do 6000 W) CO₂ laserů se využívá většinou pro řezání ocelových plechů tl. 25 - 40 mm, trubek a profilů. Jsou flexibilní a snadno programovatelné, proto se hodí i pro malé série. Při výkonech nad 6000 W se CO₂ lasery používají pro svařování u automatizovaných velkosériových výrob. Hloubka svaru může dosahovat až 20 mm [24]. Při výkonech do 1500 W se CO₂ lasery využívají pro značení, gravírování a řezání nekovů jako jsou skla, papír, plasty, kůže atd.)

CO₂ lasery mají vlnovou délku 10,6 μm a kvůli tomu nelze jejich záření vést optickým vláknem. Pro vedení jejich svazku se používají zrcadla, což je nevýhodné zejména kvůli složitosti optické dráhy, nutnosti pravidelné kalibrace, nárocích na čistotu a údržbě zrcadel [25].

Obr. 12 zobrazuje schéma CO₂ laseru s výkonem okolo 5000 kW. Buzení plynu probíhá radio-frekvenčním vlněním, které probíhá mezi elektrodami. Elektrody současně díky velké ploše zajišťují difúzní chlazení plynu v rezonátoru.



Obr. 12 Schéma difúzně chlazeného, RF buzeného CO₂ laseru s výkonem okolo 5000 W [25]

Nd:YAG, vláknový a diskový laser

Všechny 3 typy laserů patří do třídy pevnolátkových laserů. Pevnolátkové lasery patří k neužívanějším typům laserů v průmyslu. Jejich rozsah výkonů je do 10 kW [24]. Aktivní prostředí je tvořeno pomocí matrice umělého YAG krystalu (ytrium aluminium granát) dopovaného ionty yterbia (Yb) a neodymu (Nd).

Výhoda těchto laserů je oproti plynovým laserům možnost vedení jejich záření flexibilním optickým vláknem a to díky malé vlnové délce (cca 1 μm). Je tak usnadněn přenos záření laseru do konkrétního místa v materiálu [25], což dává dobré možnosti pro aplikace u robotizovaných a automatizovaných pracovišť. Pevnolátkové lasery, které mají výkon nad 2000 W, se používají především ke svařování např. dílů karosérií, dílů z různých materiálů a různých tloušťek. Jejich dobrá kvalita paprsku je využívána pro postupy laserového skenování. Lasery s výkonem od 200 W do 2000 W se používají k řezání, svařování a poslední době stále častěji k natavování a spékání materiálů v pocesech Laser Prototyping a navařování materiálů. Zdroj [29] uvádí příklad navařování ochranné vrstvy na litinu s kuličkovým grafitem. Ochranná vrstva je tvořena práškem ze slitiny Ni-Cu. Pro navařování zde byl zvolen YAG laser o výkonu 1200 W. Lasery využívající nižší výkony se využívají pro práci v elektronice a jemné mechanice, mikroopracování a popisování

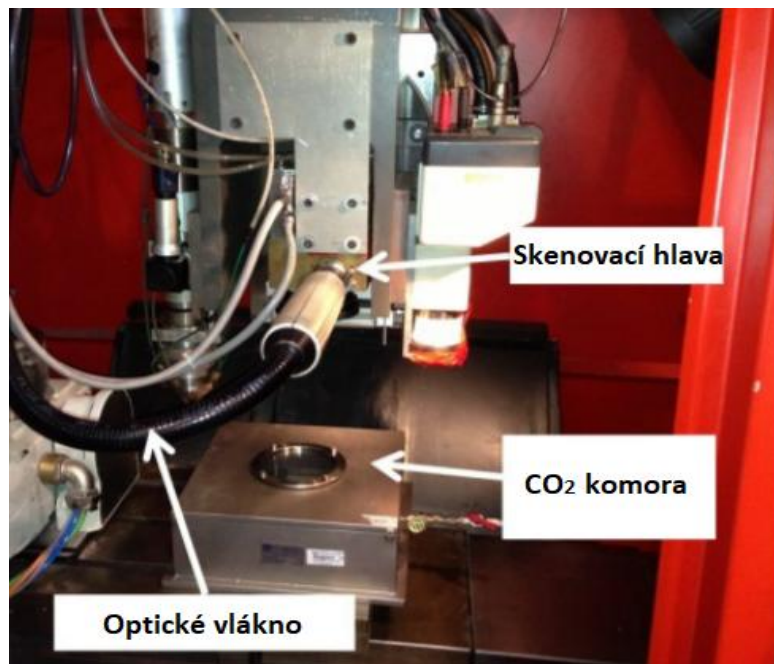
Diskové a vláknové lasery se řadí mezi novinky pevnolátkových laserů. U diskových laserů je aktivní krystal na rozdíl od běžného uspořádání ve válečkové formě ve tvaru tenkého disku, který má tloušťku pouze desítky milimetrů. Jejich rychlý vývoj přešel z výkonu 1 kW na 8 kW, přičemž se počítá s dalším navyšováním výkonů. Po krátké době od uvedení na trh si diskové lasery oblíbily řady předních automobilek (Audi, DaimlerChrysler), kde je jejich využití při robotickém svařování skeletů karosérií a dalších dílů.

Rychlý vývoj zažívají také vláknové lasery. Ty se od ostatních pevnolátkových laserů odlišují ve funkci optického vlákna. Optické vlákno zde neslouží pouze k přenosu dříve generovaného paprsku od jeho zdroje, ale dochází zde ke generování záření přímo v jádru optického vlákna. U těchto laserů se dosahuje zatím nejvíce účinného chlazení po celé délce vlákna a vynikající kvality paprsku [24].

Konkrétní zajímavý příklad použití vláknového laseru uvádí literatura [27], která popisuje laserové leštění tvárné litiny řízeným tavením materiálu. Při leštění litiny pomocí laseru dochází k problému, kdy se okolní kov nataví, ale grafit se svou teplotou tání okolo 3500 K zůstává laserem nedotčen. Následně dochází k vylamování kuliček grafitu z povrchu a tím ke zhoršení výsledné drsnosti materiálu. Studie uvedená ve zdroji popisuje postup, kdy se povrch materiálu během laserového leštění oduhličí pomocí plynné atmosféry CO_2 .

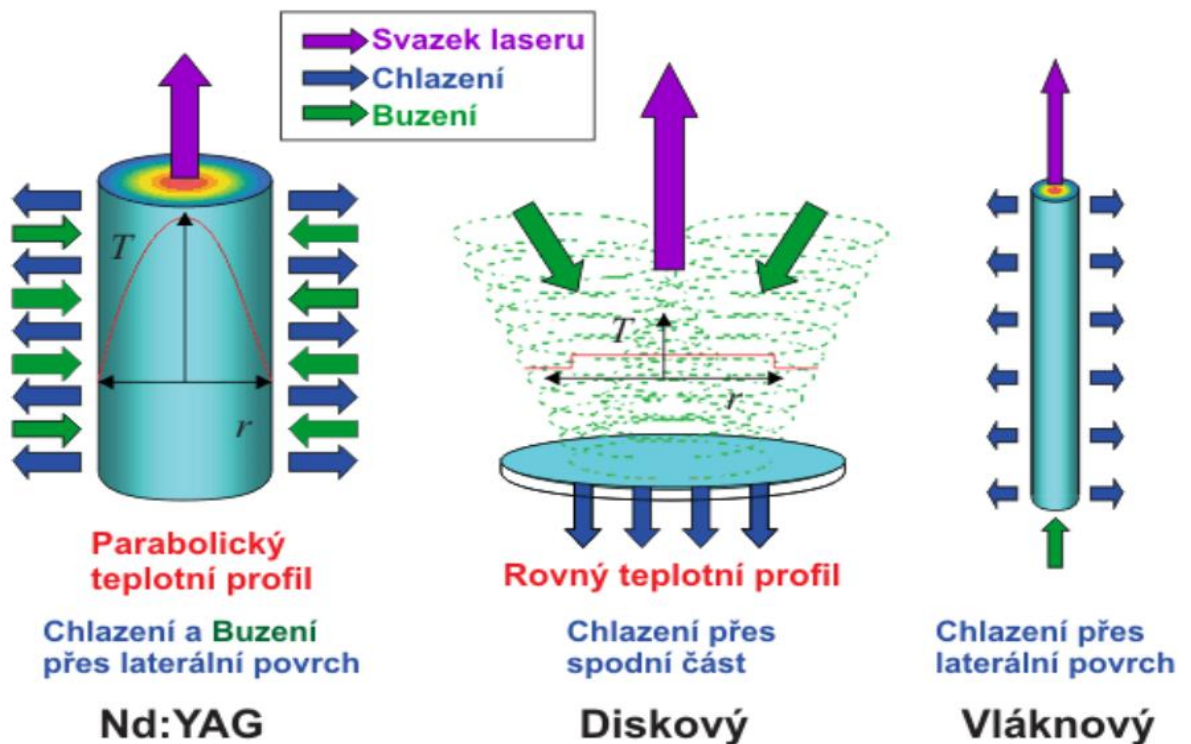
Obr. 13 zobrazuje 1 kW vláknový laser FL010 ROFIN vedený optickým vláknem jehož pohyb je zajištěn pomocí 2D skenovací hlavy HurryScan 25. K oduhličení povrchu materiálu dochází podle rovnice (3.3) :





Obr. 13 Příklad vláknového laseru určeného k leštění povrchu LKG [27]

Obr. 14. Zobrazuje základní rozdíl mezi jednotlivými typy laserů. Aktivní prostředí u Nd:YAG laseru je tyčinka (délka 15–20 cm, průměr je řádově v mm), u diskového laseru tenký disk (průměr 10 mm, tloušťka 0,25 mm) a u vláknového laseru dlouhé optické vlákno (délka řádově v metrech, průměr 50–300 μm).



Obr. 14 Geometrie aktivního prostředí u jednotlivých typů laserů [25]

4.2.2 Povrchové laserové kalení

Při povrchovém kalení pomocí laserového paprsku odpadá problematika řízení procesu, jako je odhadování teploty kovu podle jeho barvy a kvalita zakalení závislá na zkušenostech pracovníka. Výsledkem toho často bývá nerovnoměrná tvrdost a velké tepelné ovlivnění kalěného kusu.

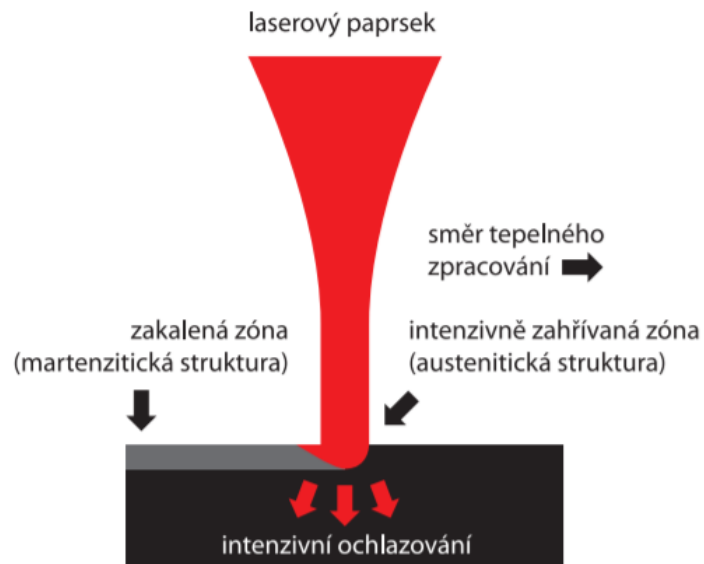
Proces kalení laserovým paprskem je řízen pyrometrem. Pro zachování konstantní teploty a tím i výsledné tvrdosti materiálu umí pyrometr automaticky přizpůsobovat výkon laseru a zabraňuje tak přehřátí či natavení povrchu. Velikost stopy paprsku se mění jednoduchou změnou optické čočky. O celém procesu kalení je doložitelný záznam, kde jsou vedeny teploty a výkon laseru. Pohyb paprsku po dané trajektorii je zajištěn robotem. Je tak zaručen rovnoměrný pohyb paprsku po materiálu a vyloučen lidský faktor.

Výhody ohřevu oproti ostatním technologiím spočívají v rychlosti předání tepla paprskem a výslednou rychlostí kalení. Rychlost ohřevu se pohybuje cca 1000 °C/s. Díky tomu je minimální tepelné ovlivnění okolního nekaleného materiálu, v jehož důsledku jsou minimální deformace materiálu umožňující zmenšit přídavky na obrábění a eliminovat rovnání.

Důležitý rozdíl je také ve způsobu ochlazování, kdy po kalení běžně dochází ke chlazení vodní sprchou. Povrch materiálu má nejvyšší teplotu, která směrem do materiálu klesá. Vodní sprcha tedy dopadá na nejteplejší část a tím vzniká vysoký teplotní gradient, který vede k rozdílům v napětí a v konečném důsledku k možnému vzniku trhlin v materiálu.

Laser nevyžaduje externí ochlazování, protože je teplo odváděno dovnitř materiálu. Teplotní gradient a zbytkové pnutí v materiálu je tak menší. To je hlavní důvod, proč se daří bez problémů kalit i náročné součásti, které při indukčním kalení praskají.

Jelikož je odvod tepla z povrchu materiálu do jeho středu vedením intenzivnější, je dosahováno vyšších tvrdostí a menší oxidace povrchu. Výsledná struktura je velmi jemná s drobnými karbidy, krátkými martenzitickými jehlicemi a malými zrny [23]. **Obr. 15** znázorňuje laserový paprsek, který dopadá na povrch materiálu. Ve směru tepelného zpracování vzniká za paprskem tenká martenzitická struktura. Dále je v obrázku znázorněn směr ochlazování do zbytku materiálu.



Obr. 15 Schéma laserového paprsku dopadajícího na povrch materiálu [22]

5 Praktická část

Praktická část diplomové práce se zabývá povrchovým indukčním a laserovým kalením litiny s kuličkovým grafitem. Je zde popsán postup výroby odlitých vzorků EN-GJS-400-15, EN-GJS-500-7, EN-GJS-600-3 a EN-GJS-700-2 na kterých je proveden rozbor chemického složení, ze souběžně litých YII bloků tahová zkouška, metalografie výchozí struktury a povrchové kalení. Povrchové kalení je dále zkoumáno metodou měření mikrotvrdosti, díky kterému je hodnocena tloušťka a tvrdost zakalených vrstev a doplněno o metalografii zakalených struktur.

5.1 Výroba zkušebních vzorků

Zkušební vzorky byly odlity ve spolupráci se Slévárnou Kuřim, a.s., která celý projekt pojala jako výzkum povrchového kalení pro svou výrobu. Jak uvádí zdroj [7] v kapitole 4, je pro povrchové kalení vhodnější použít materiál s vyšším podílem perlitu ve struktuře. Aby však byla stanovena konkrétní hranice, při jakém podílu perlitu a feritu je tvárná litina stále ještě dobře povrchově kalitelná, provedl se pokus, který zahrnoval i moderní metodu kalení a to pomocí laseru.

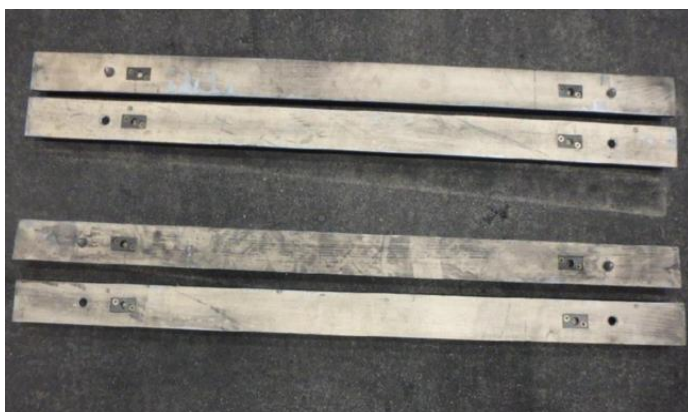
Pro posouzení vlivu výchozí struktury byly zvoleny litinové odlitky, které zahrnovaly vzorky od převážně feritické struktury s mezí pevnosti 400 MPa po převážně perlitické struktury s mezí pevnosti 700 MPa.

Konkrétně se jednalo o odlitky z tvárné litiny vycházející z normy ČSN EN 1563:

- EN-GJS-400-15
- EN-GJS-500-7
- EN-GJS-600-3
- EN-GJS-700-2

5.2 Příprava modelu, forma a odlévání

Model byl vyroben v modelárně ve Slévárně Kuřim, a.s. Návrh tvaru modelu byl konzultován se společností KSK Precise Motion, a.s. S ohledem na tvar induktoru se zvolil tvar tyče $\varnothing 60$ mm a délky 1010 mm. Model počítal se smrštěním kovu o 1%. Model byl zhotoven jako dřevěný ze dvou polovin. Obrázek modelu zobrazuje obr. 16, 17.



Obr. 16, 17 Dřevěný model odlévané tyče

Forma byla zhotovená ze samotvrdnoucí směsi furanové pryskyřice a křemenného ostřiva. Na formu se neaplikoval ochranný nátěr. V jedné formě byly vždy odlity 2 tyče, na jedné tyči se zkoušelo kalení a druhá tyč byla jako rezervní. Dále byl zaformován souběžně litý zkušební YII blok. Příklad z formování je uveden na **obr. 18**. Na obrázku lze vidět, že na společném vtoku byly umístěny zkušební tyče i zkušební YII blok. Zaústění zářezů bylo zhotoveno do čela tyčí. Pro odvod plynů byly umístěny po délce každé tyče 2 výfuky.

Odlévání probíhalo za zhruba konstantní teploty 1380 °C z ruční pánve přes hubičku. Modifikace a očkování se provádělo přes automatický podavač plněných profilů a to na základě hmotnosti tekutého kovu a jeho modifikační teploty. Doba lití byla okolo 10 s. Licí jamka byla zvolená klasická litinářská. Z každého materiálu byly odlity 2 tyče \varnothing 60 mm, délky 1000 mm a 1 YII blok a kterém byly hodnoceny mechanické vlastnosti při tahové zkoušce. Příklad odlitých odlitků včetně vtokové soustavy, výfuků, YII bloku a licí jamky je zobrazen na **obr.19**.



Obr.18 Zaformování dřevěného modelu



Obr.19 Odlitky po vytlučení a tryskání

5.3 Chemické složení odlitých vzorků

Výsledné chemické složení odlitých vzorků zobrazuje tab. 10. Chemické složení bylo stanoveno spektrálním analyzátozem.

Tab. 10 Chemické složení odlitých vzorků

Označení	EN-GJS-400-15						
Prvek	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu
hmot. [%]	3,72	2,33	0,21	0,031	0,012	0,048	0,04
Označení	EN-GJS-500-7						
Prvek	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu
hmot. [%]	3,70	2,37	0,41	0,036	0,011	0,049	0,24
Označení	EN-GJS-600-3						
Prvek	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu
hmot. [%]	3,73	2,31	0,45	0,033	0,012	0,049	0,44
Označení	EN-GJS-700-2						
Prvek	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu
hmot. [%]	3,70	2,25	0,44	0,027	0,014	0,046	0,56

Z **tab. 10** vyplývá, že hodnoty C, Si a P zcela srovnatelné. Je to z důvodu vytvoření eutektické struktury v kovové matici. Pro kontrolu eutektického složení se dá aplikovat rovnice 1.1 (stupeň eutektičnosti), která je uvedena v kapitole 3.2. Z výpočtu vychází hodnoty okolo čísla 1, což značí téměř eutektické složení vzorků.

Z hlediska houževnatosti litin za normálních a vyšších teplot jsou důležité nízké hodnoty fosforu. Při obsahu nad 0,08 hmot. % dochází k tvorbě fosfidického eutektika, které je v kovové struktuře nežádoucí. Obsahy fosforu se ve všech vzorcích pohybují okolo 0,03 hmot. % koncentrace.

Výsledné obsahy hořčíku musí být takové, aby byla dobře provedena modifikace grafitu v LKG. Zrnitost grafitu je hodnocena v následující kapitole 5.4.1 „Metalografie výchozí struktury materiálů“

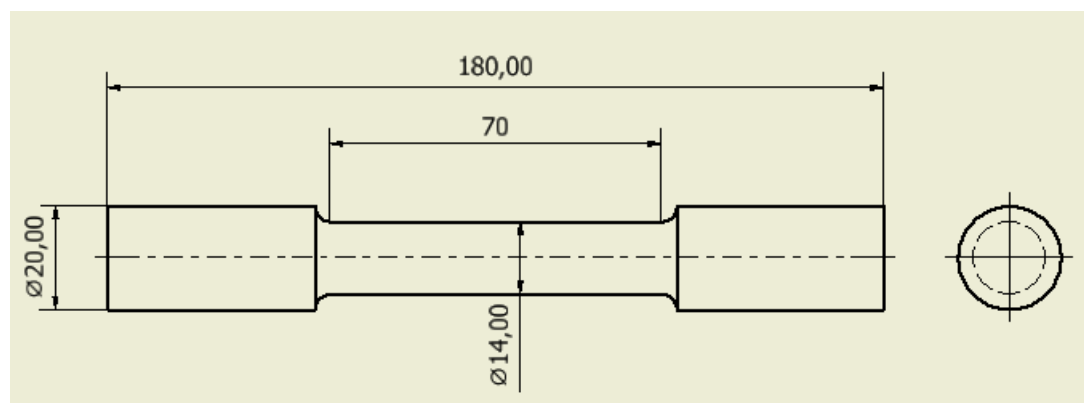
Obsah síry by se měl v LKG před modifikací pohybovat zhruba od 0,015 – 0,020 hmot. %. Síra v tavenině vytváří s hořčíkem MgS, což silně narušuje modifikační účinek Mg v litině. Výsledné obsahy síry jsou pod 0,015 hmot. %.

Výsledný obsah mědi se výrazně podílí na tvorbě perlitu v kovové struktuře. V tabulce je patrné, že se zvyšující se mezi pevnosti a obsahem perlitu roste i obsah mědi.

Obsah manganu také podporuje tvorbu perlitu v kovové struktuře. Z tabulky je patrné, že nejnižší obsah manganu, 0,21 hmot. %, je u litiny EN-GJS-400-15, kde je snaha docílit feritické struktury. V dalších vzorcích, v jejichž kovových strukturách přibývá perlit, je obsah manganu vyšší, okolo 0,4 hmot. %.

5.4 Výsledky tahových zkoušek z YII bloku

Tahová zkouška probíhala na zkušebních tyčích $\varnothing 14$ mm a délky 180 mm, které byly obroběny z odlitých YII bloků. Hlava zkušebních tyčí byla hladká, bez závitů viz obr 20.



Obr 20 Schéma zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku

Zkouška byla provedena na stroji ZWICK na VUT FSI Ústavu materiálových věd a inženýrství.

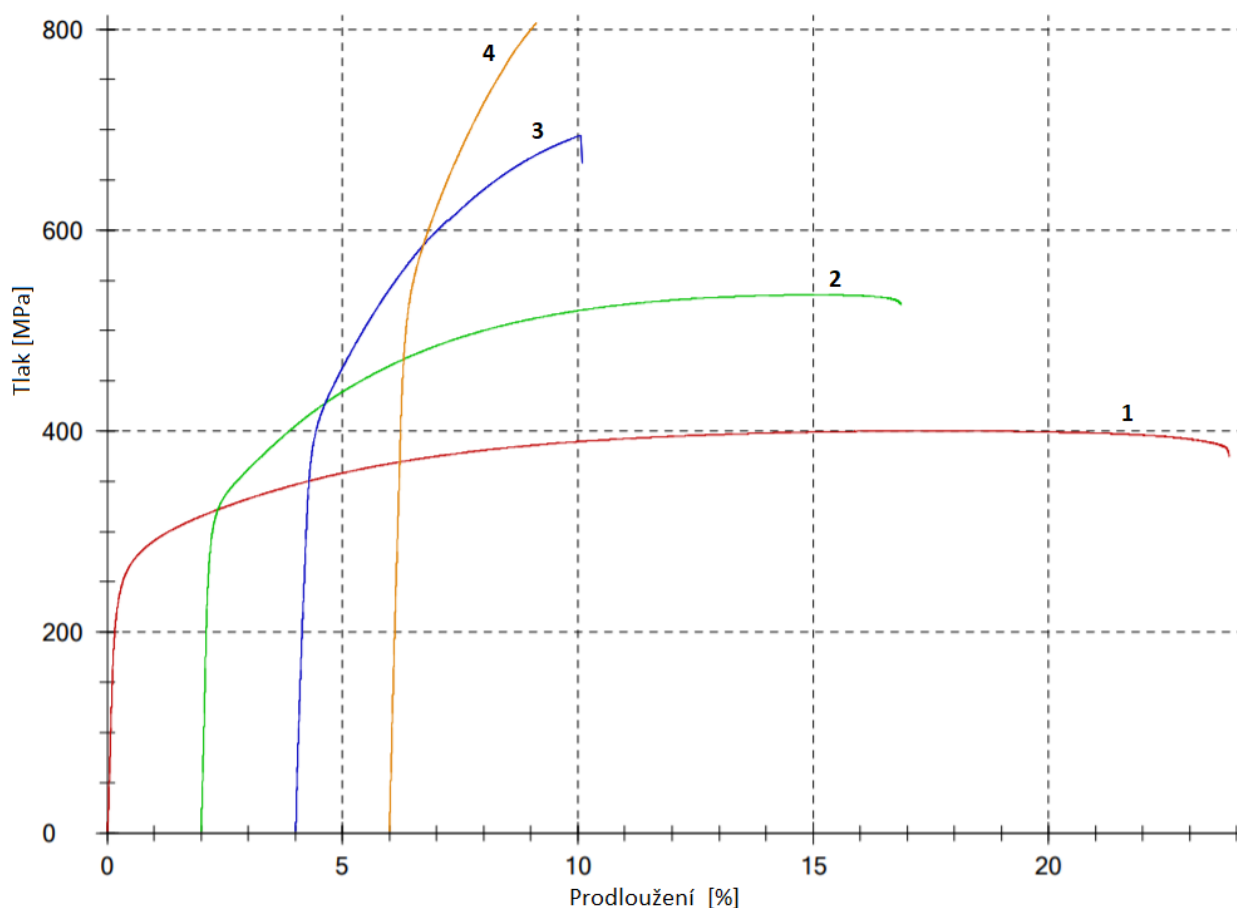
Výsledné mechanické hodnoty z tahové zkoušky v porovnání s mechanickými hodnotami uvedenými v normě ČSN EN 1563 jsou uvedeny v **tab. 11**.

Tab. 11 Mechanické hodnoty z tahové zkoušky v porovnání s ČSN EN 1563

Označení materiálu		Pevnost v tahu (min.) R_m [MPa]	Mez kluzu (min.) $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost (min.) A [%]
EN-GJS-400-15	Vzorek	400	256	17,4
	Norma	400	250	15
EN-GJS-500-7	Vzorek	536	324	12,9
	Norma	500	320	7
EN-GJS-600-3	Vzorek	695	409	5,6
	Norma	600	370	3
EN-GJS-700-2	Vzorek	806	549	2,7
	Norma	700	420	2

Materiály jsou zcela vyhovující. Všechny 4 typy mechanických vlastností R_m , $R_{p0,2}$, A jsou většinou splněny s rezervou.

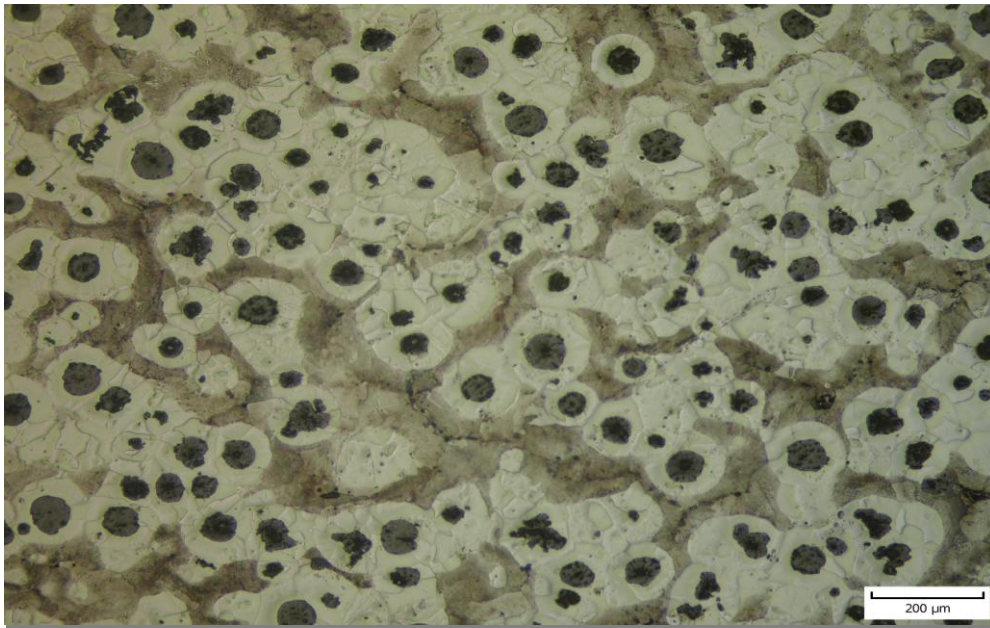
Průběh zatěžování jednotlivých vzorků zobrazuje **graf 3**. Průběh zatěžování probíhá u každého vzorku vždy od nulového počátečního tahu až do maximálního tahu, kdy dojde k přetržení vzorku. Výsledná hodnota zatížení se rovná výsledné mezi pevnosti vzorku.



Graf 3 Průběh zatěžování zkušebních tyčí v závislosti na jejich prodloužení **křivka 1** – EN-GJS-400-15, **křivka 2** – EN-GJS-500-7, **křivka 3** – EN-GJS-600-3, **křivka 4** – EN-GJS-700-2

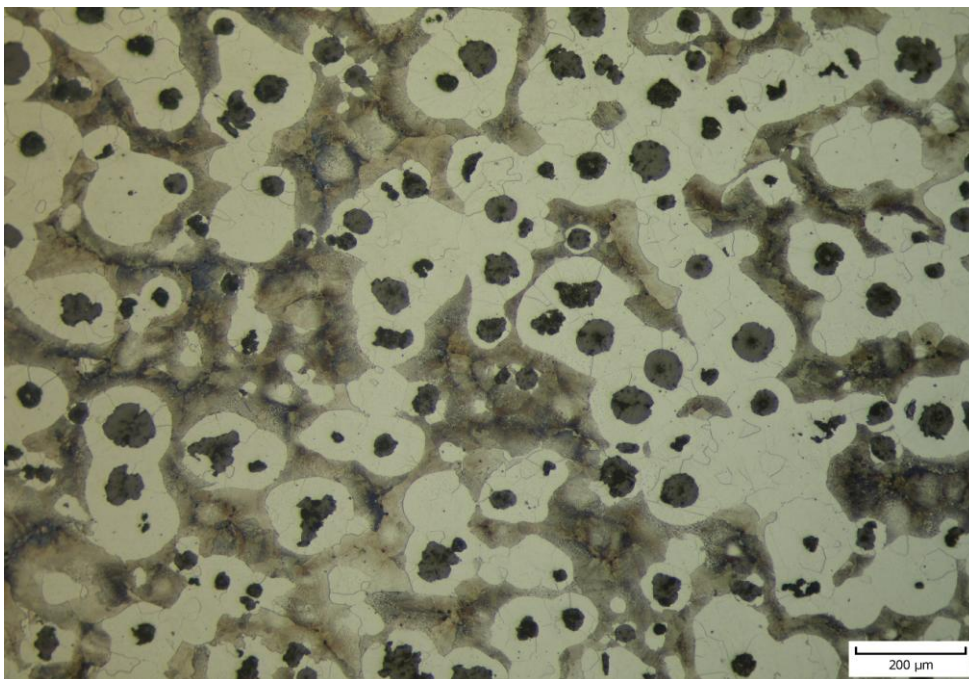
5.4.1 Metalografie výchozí struktury materiálů

Metalografie struktury materiálů byla provedena na VUT FSI oboru slévárenství. Struktura materiálů byla vyhodnocena na zalisovaných, laserem zakalených vzorcích, hluboko pod zakalenou vrstvou. Vzorky byly naleptány 3% nitalem. Přípravu těchto vzorků popisuje kapitola 5.5.



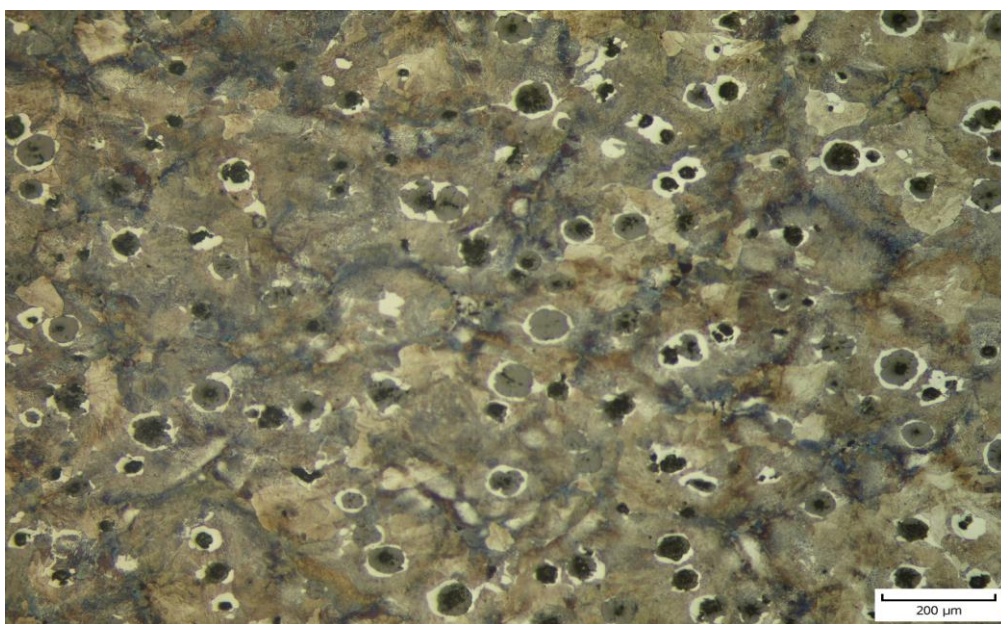
Obr. 21 Výchozí struktura EN-GJS-400-18 (100x)

Obr 21 zobrazuje 100 násobné zvětšení výchozí naleptané struktury EN-GJS-400-15. Z hodnocení podle normy ČSN ISO 945 vychází hodnocení 90% IV 5,6,7,8 + 10% V 6 P20.



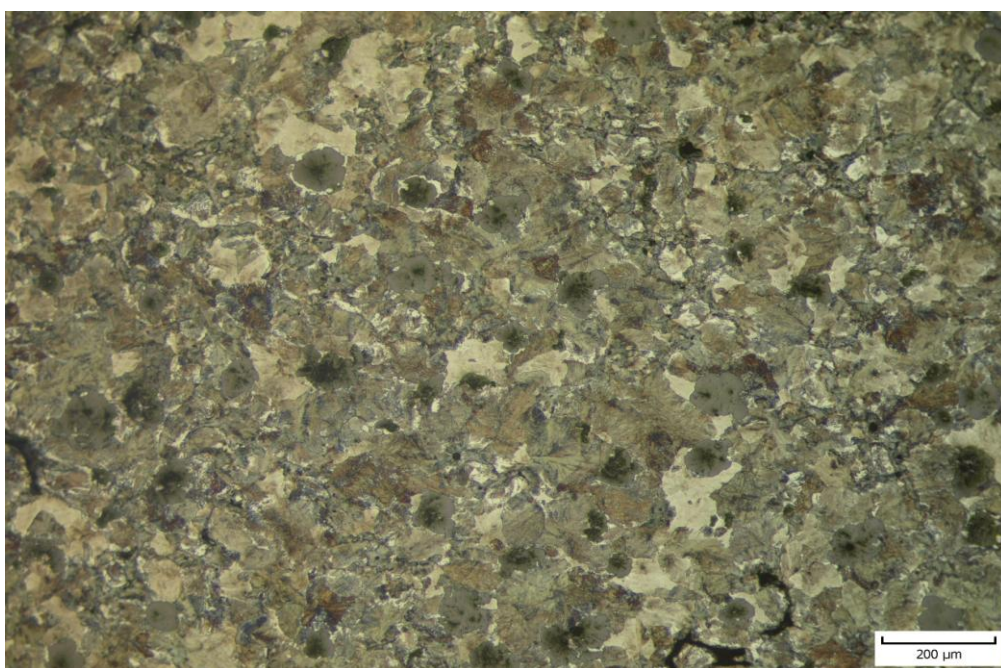
Obr. 22 Výchozí struktura EN-GJS-500-7 (100x)

Obr 22 zobrazuje 100 násobné zvětšení výchozí naleptané struktury EN-GJS-500-7. Z hodnocení podle normy ČSN ISO 945 vychází hodnocení 90% IV 5,6,7,8 + 10% V 6 P45.



Obr. 23 Výchozí struktura EN-GJS-600-3 (100x)

Obr 23 zobrazuje 100 násobné zvětšení výchozí struktury naleptané EN-GJS-600-3. Z hodnocení podle normy ČSN ISO 945 vychází hodnocení 90% IV 5,6,7,8 + 10% V 6 P92.



Obr. 24 Výchozí struktura EN-GJS-700-2 (100x)

Obr 24 zobrazuje 100 násobné zvětšení výchozí naleptané struktury EN-GJS-700-2. Z hodnocení podle normy ČSN ISO 945 vychází hodnocení 90% IV 5,6,7,8 + 10% V 6 P96

5.5 Povrchové kalení

Povrchové kalení vzorků bylo provedeno pomocí indukčního a laseru ohřevu. Z pohledu teorie jsou jednotlivé metody popsány v kapitole 4.1 a 4.2.2. Kalení tyčí probíhalo ve společnosti KSK Precise Motion, a.s

5.5.1 Příprava vzorků

Jak bylo uvedeno, tyče byly odlity v délce 1000 mm a \varnothing 60 mm. Dále byly tyče otryskány a obrobena třískovým obráběním na \varnothing 50 mm. Výsledný materiál byl zbaven licí kůry, měl po celé délce konstantní průměr a stal se tak dobrým výchozím materiálem pro povrchové kalení.

5.5.2 Indukční kalení



Obr. 25 Univerzální kalící zařízení SFR 150

Indukční kalení probíhalo na univerzálním kalícím zařízení **obr. 25**. Jedná se o typ stroje, který si automaticky upravuje nastavení výkonu generátoru, potřebnou pracovní frekvenci a rychlost posuvu materiálu induktorem. Stroj má středofrekvenční generátor s výkonem do 150 kW a s rozsahem pracovní frekvence 5-50 kHz.

Na začátku kalení se jako první zvolilo výchozí nastavení výkonu generátoru, pracovní frekvence a rychlost posuvu tyče induktorem. Toto nastavení se aplikovalo na tyč a dále se upravovalo až do bodu, kdy se povrch tyče začal natavovat. Po natavení povrchu tyče se výkon středofrekvenčního generátoru snížil. Byla tak určena hraniční teplota a rychlost posuvu, která se na tyče může aplikovat. Tím vznikly nejvýhodnější podmínky pro samotné kalení.

Tab. 12 zobrazuje nastavení induktoru, které zahrnuje výkon středofrekvenčního generátoru, pracovní frekvenci a rychlost posuvu použité pro kalené tyče.

Tab. 12 Nastavení induktoru

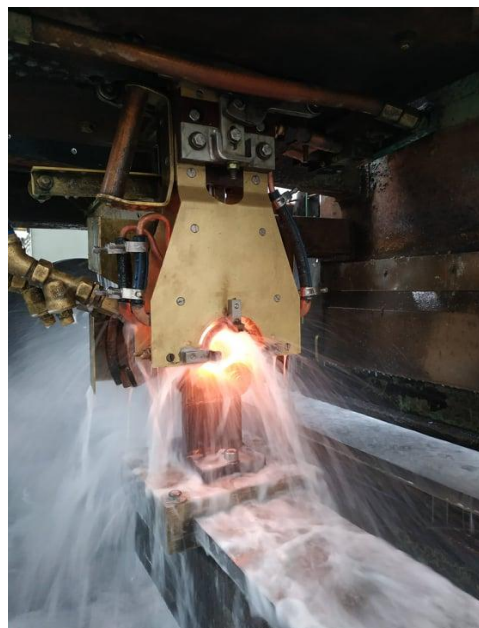
	Výkon středofrekvenčního generátoru [kW]	Pracovní frekvence [kHz]	Posuv [mm/s]
Výchozí nastavení	75	10,5	5,5
Hranice nastavení povrchu materiálu	85	10,5	5
Provozní nastavení	80	10,5	5

Pracovní frekvence se na základě zkušeností v KSK zvolila 10,5 kHz. Stejným způsobem byly povrchově kaleny i zbylé tyče.

Průběh kalení je zachycen na obr. 26 a 27. Na **obr. 26** je zachycen počátek kalení. Tyč se v okolí cívky vysokou rychlostí ohřívá. Posuv stroje táhne tyč dál skrz induktor až k vodní sprše. Na **obr. 27** je zachycen konec kalené tyče ve sprše chladicí kapaliny.

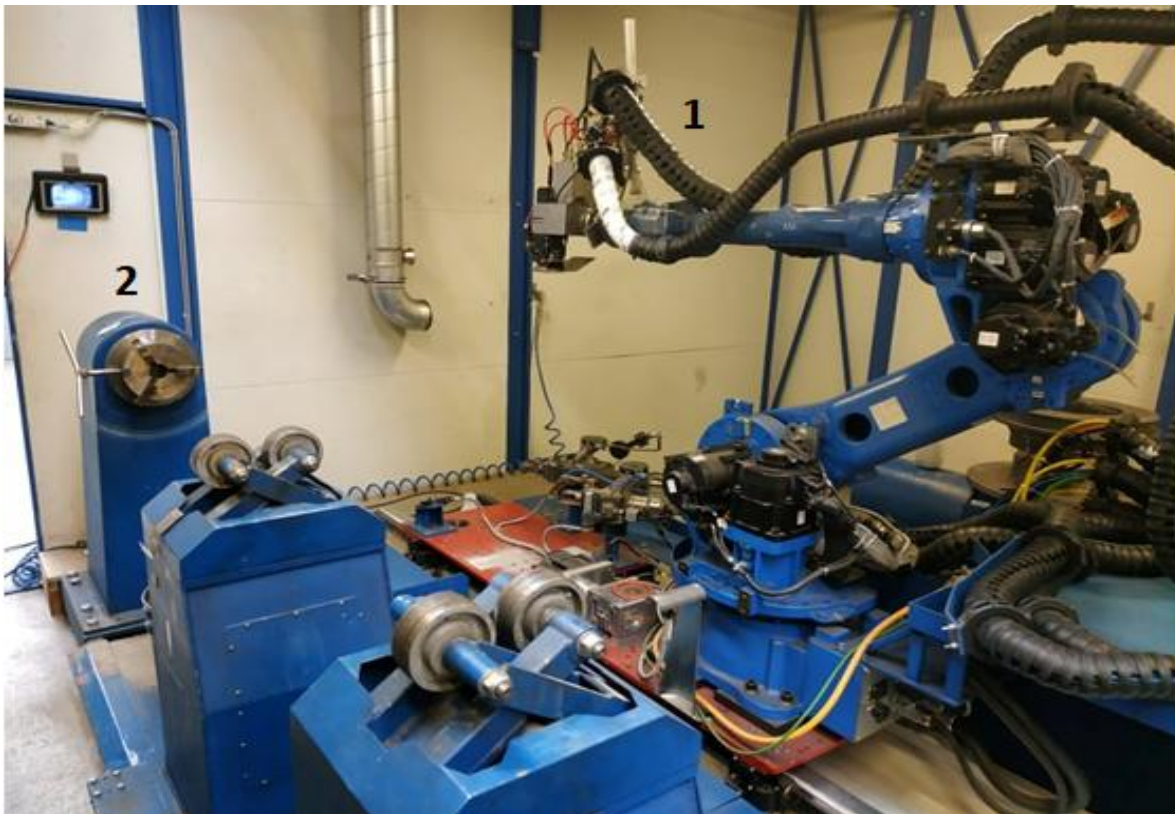


Obr. 26 Začátek indukčního kalení



Obr. 27 Konec indukčního kalení

5.5.3 Laserové kalení



Obr. 28 Vysokovýkonné laserové robotizované pracoviště

Laserové kalení probíhalo na vysokovýkonném laserovém robotizovaném pracovišti (**obr. 28**). Používané technologie laserového robotizovaného pracoviště jsou laserové kalení, navařování a svařování.

Vybavení pracoviště

- Šestiosý robot Motoman s pracovním rozsahem 2000 x 7000 mm **obr. 28 - 1**
- Jednoosé polohovadlo – nosnost 1000 kg, upínací průměr 200 mm, průměr 800 mm, max. délka upnuté součásti 6000 mm **obr. 28 - 2**
- Dvouosé polohovadlo – nosnost 250 kg, velikost obrobku průměr 1200 mm Pevný přípravkový stůl – rozměr 1000 x 1000 mm **obr. 29**



Obr. 29 Dvouosé polohovadlo

Popis laseru

- Jedná se o pevnolátkový diskový laser TruDisk 6006 s výkonem 6000 W.
- Nastavitelný rozsah výkonu 120 W až 6000 W
- Výkonová stálost při jmenovitém výkonu $\pm 1 \%$ při aktivní regulaci výkonu
- Vlnová délka 1030 nm
- Minimální průměr optického kabelu 600 μm

Průběh laserového kalení

Průběh laserového kalení zobrazuje **obr 30**. Kalená tyč se upnula do jednoosého polohovačla, ve kterém se pomalu otáčela kolem své osy. Nad ní se pohyboval šestiosý robot, nesoucí laserovou kalící hlavu, rychlostí posuvu 3 mm/s. Na kalenou plochu dopadal laserový paprsek s plným fokusem $\varnothing 6\text{mm}$, který kmital zvolenou frekvencí 50 Hz a vytvářel tak šířku kalícího pásma. Současně byla pomocí pyrometrů průběžně kontrolována teplota procesu a na základě vyhodnocení teplot byl regulován výkon laseru. Tím bylo zaručeno, že se tyč zakalí za definovaných a stálých podmínek. Zkušební teplota byla zvolena 1350 °C při emisivitě pyrometru 0,7 a výkonu laseru 5000 W. Povrch tyče byl však mírně nataven, proto se teplota snížila na 1300 °C.



Obr. 30 Průběh laserového kalení

5.6 Příprava metalografického vzorku

Po povrchovém kalení byl napříč každé tyče odebrán pásovou pilou vzorek tloušťky cca 15 mm. Vzorek se vždy odebíral z prostředku tepelně ovlivněné vrstvy po indukčním i po laserovém kalení, aby se eliminovala úvodní a konečná část kalení. **Obr. 31** zobrazuje odebraný vzorek, na jehož povrchu je zjevná vrstva odpovídající hloubce zakalení.

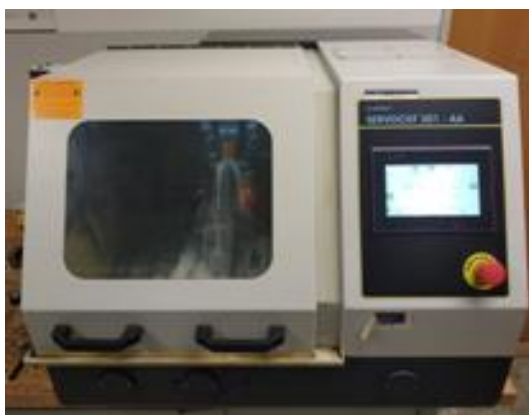
Na automatické metalografické pile SERVOCUT – 301 (**obr.32**) byl ze vzorku vyřezán klínek, který obsahoval zakalenou část + původní strukturu materiálu. Metalografická pila zamezuje při řezání mechanickému a tepelnému ovlivnění struktury materiálu a to především díky předvolenému automatickému posunu a dopadající chladicí kapalině do místa řezu.

Vyřezané vzorky se dále lisovaly do granulované pryskyřice za teploty 170 °C v automatickém lisu ECOPRESS 50, který je zobrazen na **obr. 33**. Z každé tyče se zalisovaly 2 vzorky. Jeden zakalený indukčně a jeden zakalený laserem. Dohromady bylo zalisováno 8 vzorků.

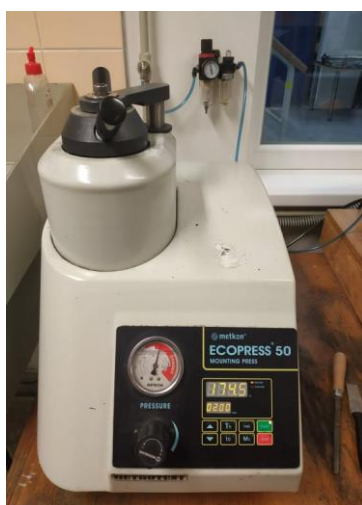
Běžnými postupy broušením na metalografické brusce byly na smirkových papírech za mokra vzorky broušeny a nakonec leštěny diamantovou pastou. **Obr. 34** zobrazuje metalografickou brusku FORCIMAT.



Obr. 31 Odebraný vzorek ze zakalené tyče



Obr. 32 Metalografická pila SERVOCUT



Obr. 33 Automatický lis na vzorky ECOPRESS 50



Obr. 34 Metalografická bruska FORCIMAT

5.7 Výsledné naměřené mikrotvrdości

Měření mikrotvrdości bylo provedeno ve společnosti KSK Precise Motion, a.s. Při měření se zjišťovala tvrdost materiálu podle metody Vickerse. Měření bylo provedeno vždy 1 mm od povrchu materiálu až do hloubky 2 mm u laserově zakaleného vzorku a 6 mm u indukčně zakaleného vzorku.

K měření byl použit plně automatický mikrotvrdoměr Qness řady Q10, který je zobrazen na **obr. 35**. Měření probíhalo tak, že se diamantové tělíčko (indentor) vtlačilo do materiálu přesně definovanou silou. Výsledná plocha vtisku byla dále změřena pomocí světelného mikroskopu. Pro příklad menší vpich při dané síle vtisku, znamená vyšší tvrdost materiálu.

Zařízení Qness Q10 používá při měření zatížení od 1 do 10 kg. Tvrdost, která se získává měřením zatížení do 1 kg, se značí jako mikrotvrdość. Plocha vpichu je vyhodnocována automaticky objektivem se zvětšením 20x a 40x, automatickým ostřením a zpracováním obrazu [28].

Obr. 36 zobrazuje vpich indentoru podle Vickersovy metody. Jedná se o čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem stěn 136° . Vpich je proveden do zakalené martenzitické vrstvy materiálu. Z výsledné plochy vtisku v materiálu se vyhodnotila výsledná tvrdost.



Obr. 35 Mikrotvrdoměr Qness Q10



Obr. 36 Vpich mikrotvrdoměru do zakalené martenzitické struktury

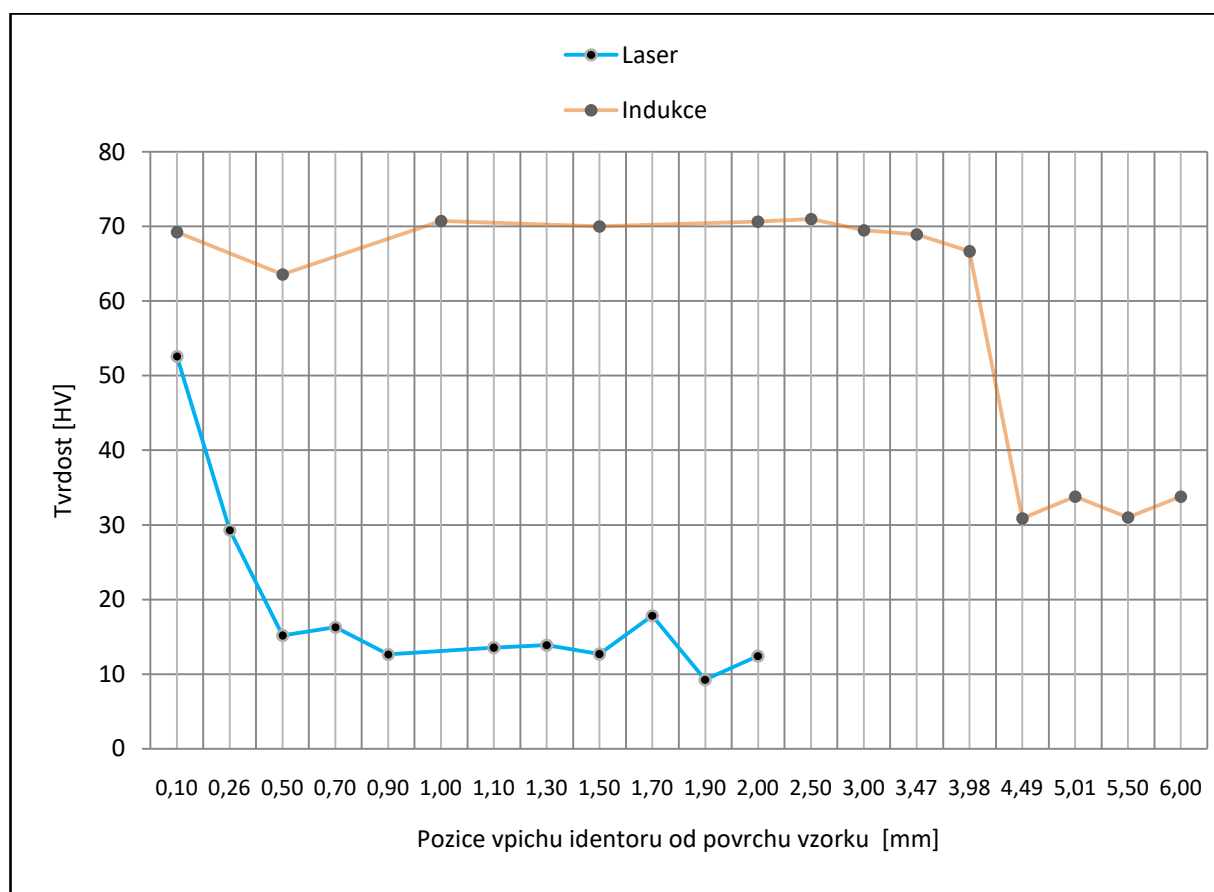
5.7.1 Výsledné mikrotvrdości zakalených materiálů

Vzorek 1: Laserové a indukční povrchové kalení litiny EN-GJS-400-15

Obě metody kalení, laserové a indukční, jsou zaneseny do grafu 4. Na ose Y jsou vyneseny hodnoty tvrdosti podle Vickerse. Na ose X jsou vyneseny jednotlivé pozice vpichu indentoru od povrchu vzorku.

Z grafu je patrné, že při použití indukčního kalení je maximální povrchová tvrdost okolo 70 HV. Hloubka zakalené vrstvy je cca 4 mm. Dále se hodnoty tvrdosti pohybují okolo 35 HV. Za vrstvou povrchového kalení dochází ke zpevnění materiálu, které souvisí s rychlým ochlazením nasyceného austenitu, který se následně transformoval na perlit.

Při použití laserového kalení je maximální povrchová tvrdost mírně nad 50 HV v hloubce pouhých 0,1 mm pod povrchem. Dále hodnoty tvrdosti klesají na hodnoty okolo 15 HV, které odpovídají tvrdosti základního kovu. Hloubka prokalení je velmi nízká, což se dá ve výsledku hodnotit jako nedostatečné zakalení. Tepelné ovlivnění struktury pod zakalenou vrstvou je minimální ve srovnání s indukčním kalením, kde je tepelné ovlivnění značné.



Graf 4 Naměřená mikrotvrdość u materiálu EN-GJS-400-15

Konkrétní hodnoty naměřených tvrdostí a hloubky vpichu pod povrchem materiálu zobrazují tab. 13 a 14.

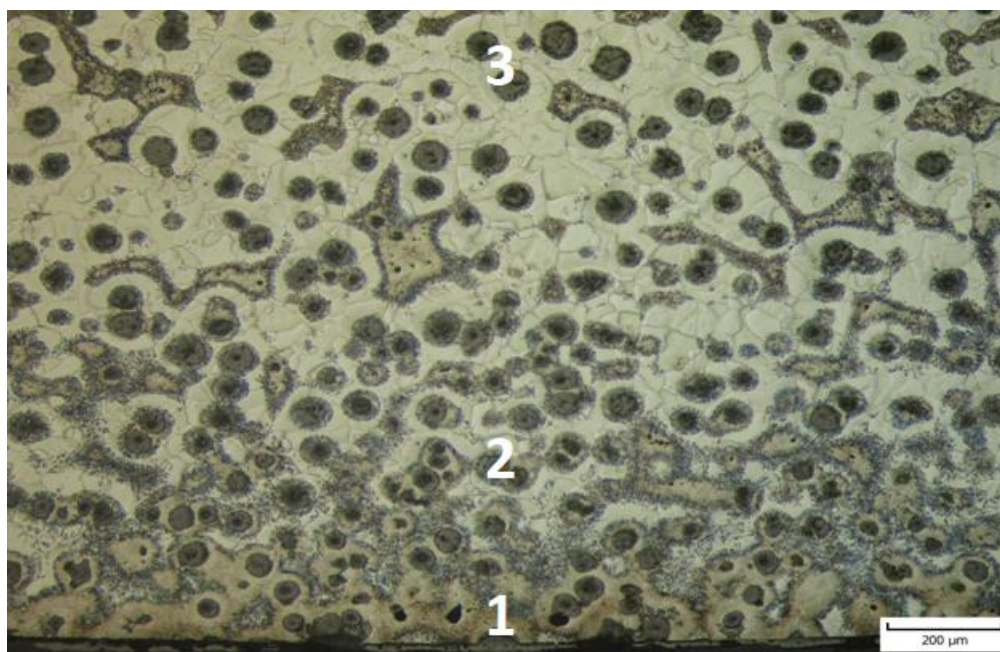
Tab. 13 Laserové kalení vzorku 1

Číslo měření	Tvrдость [HV]	Pozice vpichu [mm]
1	52,60	0,10
2	29,30	0,26
3	15,15	0,50
4	16,29	0,70
5	12,64	0,90
6	13,53	1,10
7	13,90	1,30
8	12,67	1,50
9	17,84	1,70
10	9,25	1,90
11	12,42	2,00

Tab. 14 Indukční kalení vzorku 1

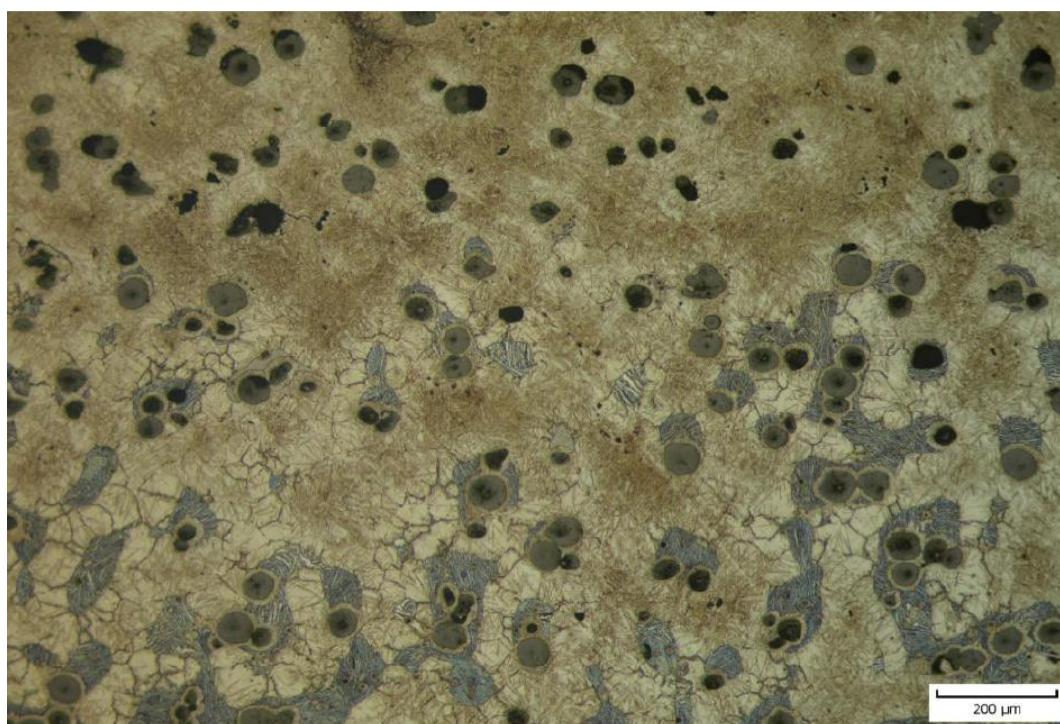
Číslo měření	Tvrдость [HV]	Pozice vpichu [mm]
1	69,22	0,10
2	63,58	0,50
3	70,74	1,00
4	70,01	1,50
5	70,67	2,00
6	71,01	2,50
7	69,51	3,00
8	68,93	3,47
9	66,65	3,98
10	30,88	4,49
11	33,80	5,01
12	31,02	5,50
13	33,81	6,00

Ve struktuře vzorků je po povrchovém kalení s ohledem na způsob ochlazování zřejmá změna struktury. Během indukčního kalení při použití vodní sprchy lze v zakalené struktuře vlivem nadkritické rychlosti ochlazování téměř vždy očekávat martenzitickou strukturu. Při metalografickém hodnocení však nebylo ani při použití 400 násobného optického zvětšení možno posoudit, zda se jedná o martenzit nebo bainit. K bližšímu hodnocení by muselo být provedeno například měření mikrotvrđosti částic jednotlivých struktur a podle jejich tvrdosti určit o kterou z nich se jedná. Toto hodnocení však nebylo provedeno. Hodnotila se tloušťka zakalené vrstvy a míra ovlivnění materiálu do jeho hloubky. Fotografie struktur ukazují přechod základního kovu do oblasti kalených struktur.



Obr 37 Struktura litiny EN-GJS-400-15 po povrchovém laserovém kalení

Obr. 37 znázorňuje strukturu litiny EN-GJS-400-15 po povrchovém laserovém kalení. Obrázek je rozdělen čísly na 3 oblasti. Oblast 1 je povrch vzorku, kde lze vidět zakalená vrstva sahající do hloubky cca 0,1 mm, naměřená tvrdost zakalené vrstvy je okolo 50HV. Oblast 2 přechodová vrstva. Výchozí austenit zde nebyl při způsobu rychlosti a ohřevu dostatečně obohacen uhlíkem. Obohacení je zde těsně okolo grafitových zrn a na periferii eutektických buněk (místa obohacena Mn), kde lze vidět zakalenou strukturu. Přechodová vrstva má zvýšenou tvrdost okolo 30 HV a sahá do hloubky cca 0,26 mm. Oblast 3 je výchozí struktura materiálu, která je tepelně minimálně ovlivněna. Výchozí tvrdost kovové matrice je zde okolo 15 HV.



Obr 38 Struktura litiny EN-GJS-400-15 po povrchovém indukčním kalení

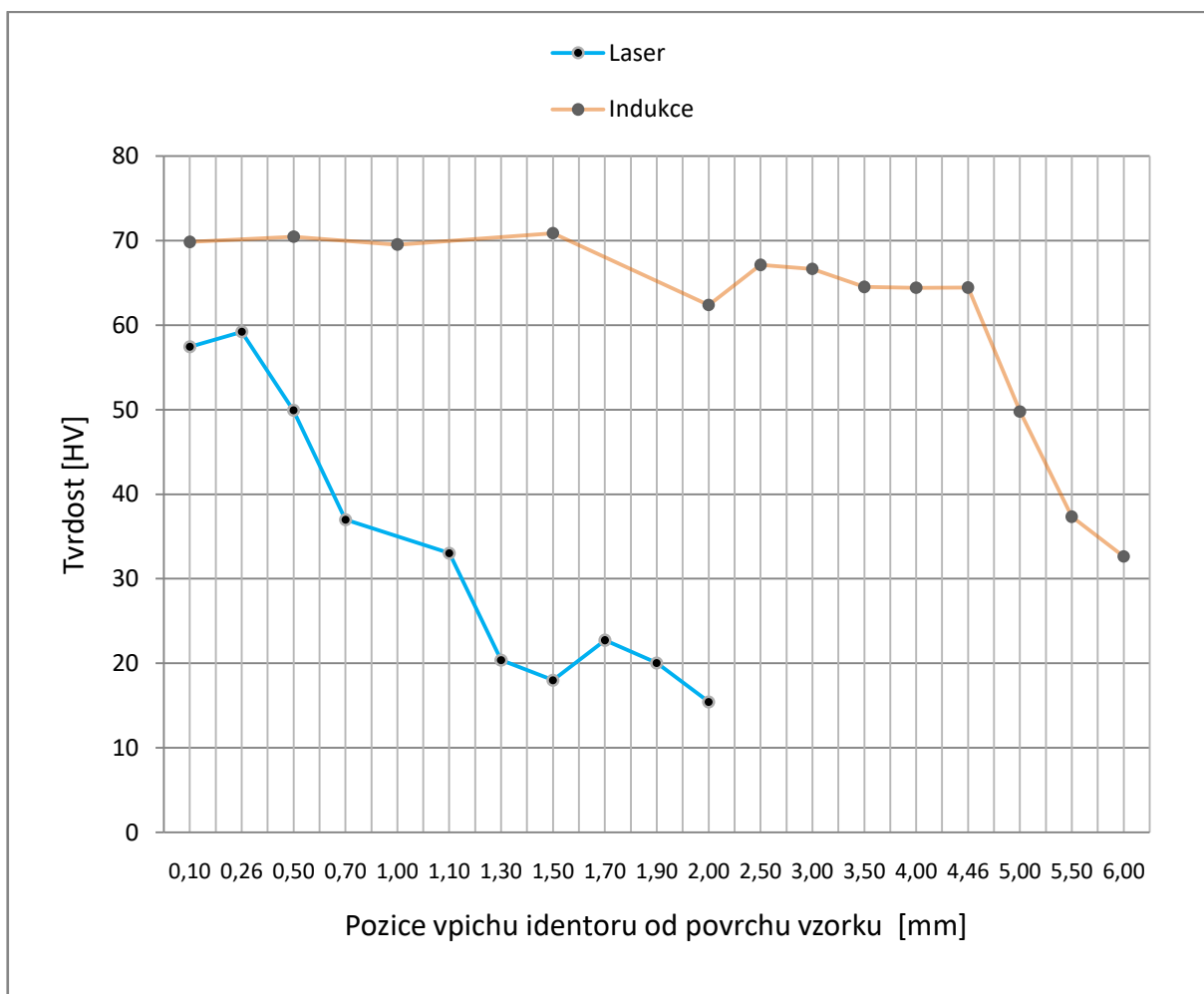
Obr. 38 znázorňuje strukturu litiny EN-GJS-400-15 po povrchovém indukčním kalení. Obrázek zobrazuje zakalenou oblast, která sahá do hloubky cca 4 mm, naměřená tvrdost zakalené vrstvy se pohybuje okolo 70 HV.

Vzorek 2: Laserové a indukční povrchové kalení litiny EN-GJS-500-7

Obě metody kalení, laserové a indukční, jsou zaneseny do grafu 5. Na ose Y jsou vyneseny hodnoty tvrdosti podle Vickerse. Na ose X jsou vyneseny jednotlivé pozice vpichu indentoru od povrchu vzorku.

Z grafu je patrné, že při použití indukčního kalení je maximální povrchová tvrdost okolo 70 HV, která sahá do hloubky 1,5 mm. Dále hodnoty tvrdosti mírně klesají na hodnotu okolo 65 HV, která sahá do hloubky 4,46 mm. Poté je patrný pokles tvrdosti na hodnotu okolo 30 HV.

Při použití laserového kalení je maximální povrchová tvrdost okolo 60 HV v hloubce do 0,26 mm pod povrchem. Dále hodnoty tvrdosti postupně klesají na hodnoty okolo 20 až 15 HV, které odpovídají tvrdosti základního kovu.



Graf 5 Naměřená mikrotvrdost u materiálu EN-GJS-500-7

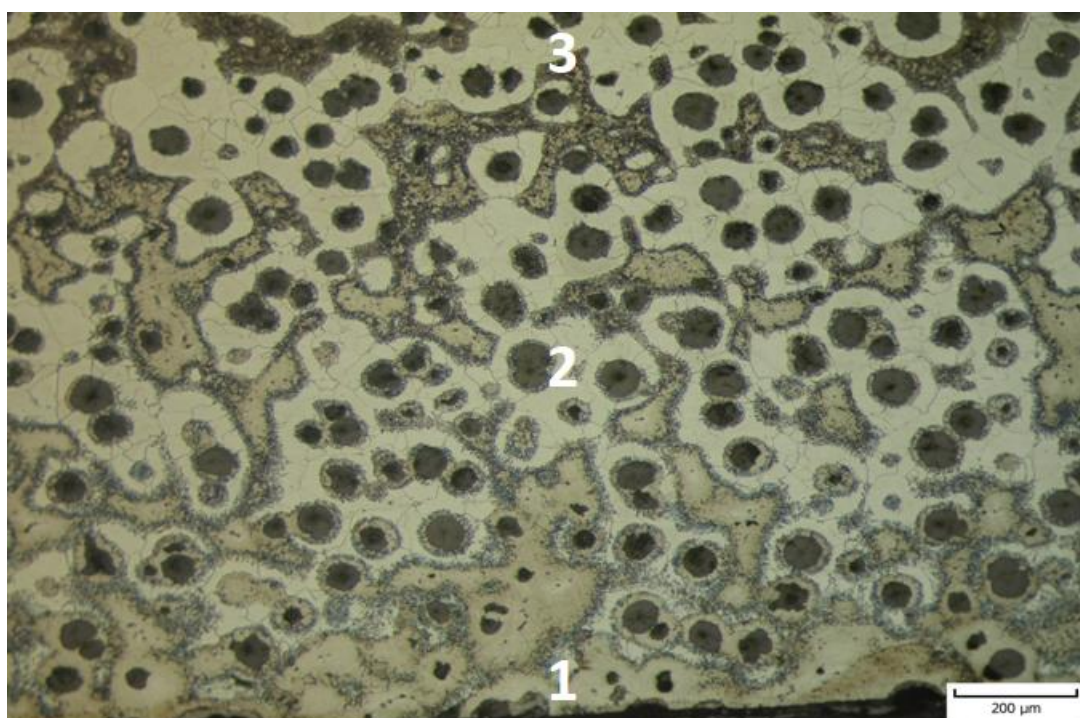
Konkrétní hodnoty naměřených tvrdostí a hloubky vpichu pod povrchem materiálu zobrazují tab. 15 a 16.

Tab. 15 Laserové kalení vzorku 2

Číslo měření	Tvrдость [HV]	Pozice vpi- chu [mm]
1	57,43	0,10
2	59,19	0,26
3	49,91	0,49
4	36,98	0,70
5	33,02	1,10
6	20,37	1,30
7	18,00	1,50
8	22,73	1,70
9	20,03	1,90
10	15,43	2,00

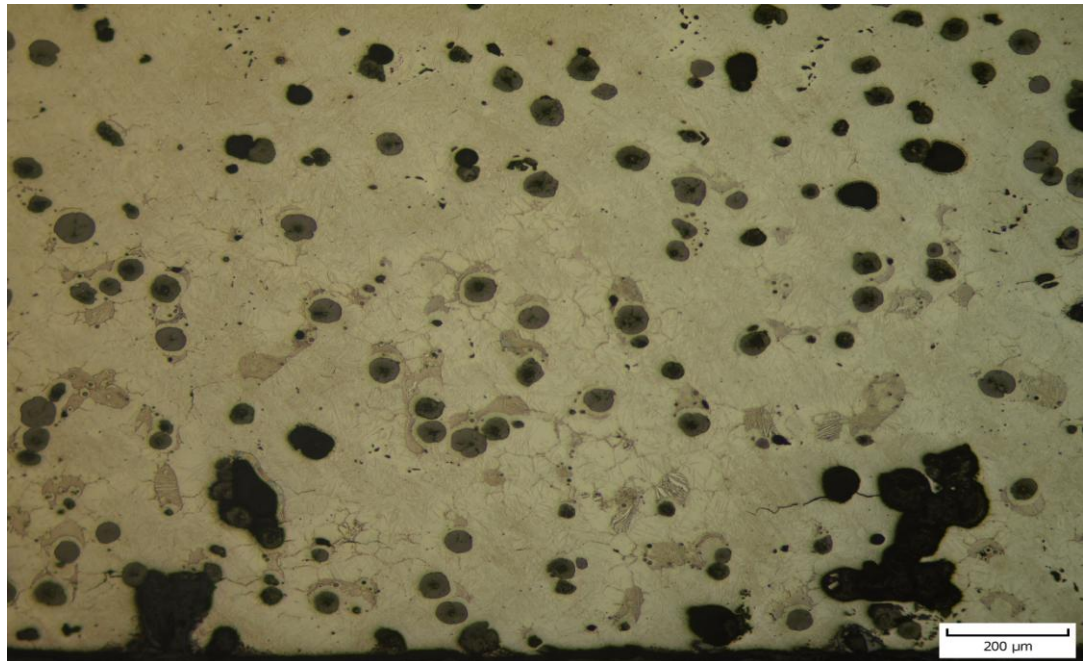
Tab. 16 Indukční kalení vzorku 2

Číslo měření	Tvrдость [HV]	Pozice vpi- chu [mm]
1	69,82	0,10
2	70,44	0,50
3	69,51	1,00
4	70,85	1,50
5	62,36	2,01
6	67,10	2,50
7	66,63	3,00
8	64,50	3,49
9	64,41	4,00
10	64,42	4,46
11	49,75	5,00
12	37,32	5,50
13	32,62	6,00



Obr 39 Struktura litiny EN-GJS-500-7 po povrchovém laserovém kalení

Obr. 39 znázorňuje strukturu litiny EN-GJS-500-7 po povrchovém laserovém kalení. Obrázek je rozdělen čísly na 3 oblasti. Oblast 1 je povrch vzorku, kde lze vidět zakalená vrstva sahající do hloubky cca 0,5 mm, naměřená tvrďost zakalené vrstvy se zde pohybuje okolo 55 HV. Oblast 2 je přechodová vrstva. Výchozí austenit zde nebyl při způsobu rychlosti a ohřevu dostatečně obohacen uhlíkem. Obohacení je zde těsně okolo grafitových zrn a na periferii eutektických buněk, kde lze vidět zakalenou strukturu. Přechodová vrstva má zvýšenou tvrďost okolo 35 HV a sahá do hloubky cca 1,1 mm. Oblast 3 je výchozí struktury materiálu, která je tepelně minimálně ovlivněna. Výchozí tvrďost kovové matrice je zde okolo 20 HV.



Obr 40 Struktura litiny EN-GJS-500-7 po povrchovém indukčním kalení

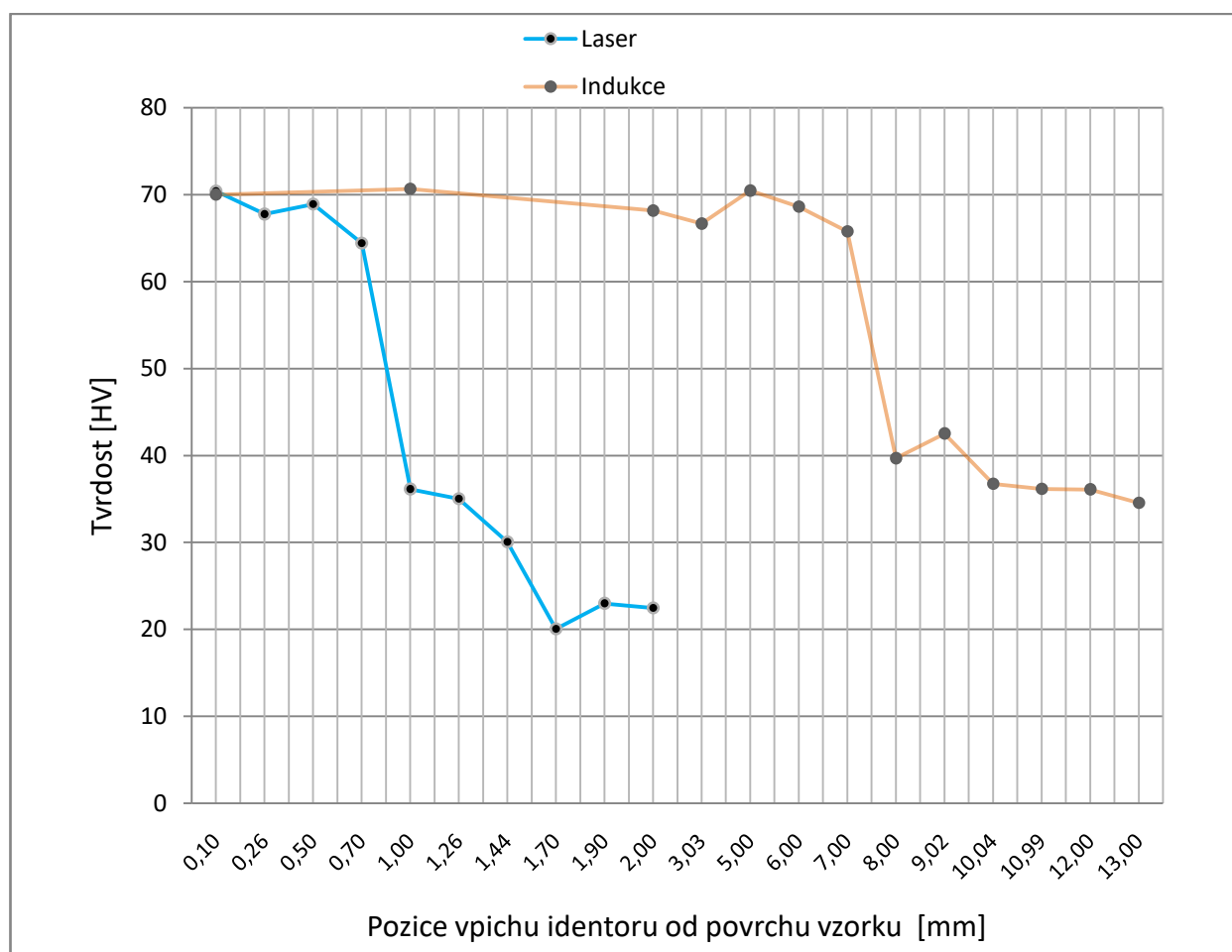
Obr. 40 znázorňuje strukturu litiny EN-GJS-500-7 po povrchovém indukčním kalení. Obrázek zobrazuje zakalenou oblast, která sahá do hloubky cca 4,5 mm, naměřená tvrdost zakalené vrstvy se pohybuje okolo 70 HV.

Vzorek 3: Laserové a indukční povrchové kalení litiny EN-GJS-600-3

Obě metody kalení, laserové a indukční, jsou zaneseny do grafu 6. Na ose Y jsou vyneseny hodnoty tvrdosti podle Vickerse. Na ose X jsou vyneseny jednotlivé pozice vpichu indentoru od povrchu vzorku.

Z grafu je patrné, že při použití indukčního kalení je maximální povrchová tvrdost okolo 70 HV, která sahá do hloubky cca 7 mm. Dále hodnoty tvrdosti klesají na hodnotu okolo 35 HV.

Při použití laserového kalení je maximální povrchová tvrdost okolo 65 HV v hloubce do 0,7 mm pod povrchem. Dále hodnoty tvrdosti klesají na hodnoty okolo 35 HV do hloubky 1,44 mm. Následně hodnoty klesají k přibližně 20 HV.



Graf 6 Naměřená mikrotvrdost u materiálu EN-GJS-600-3

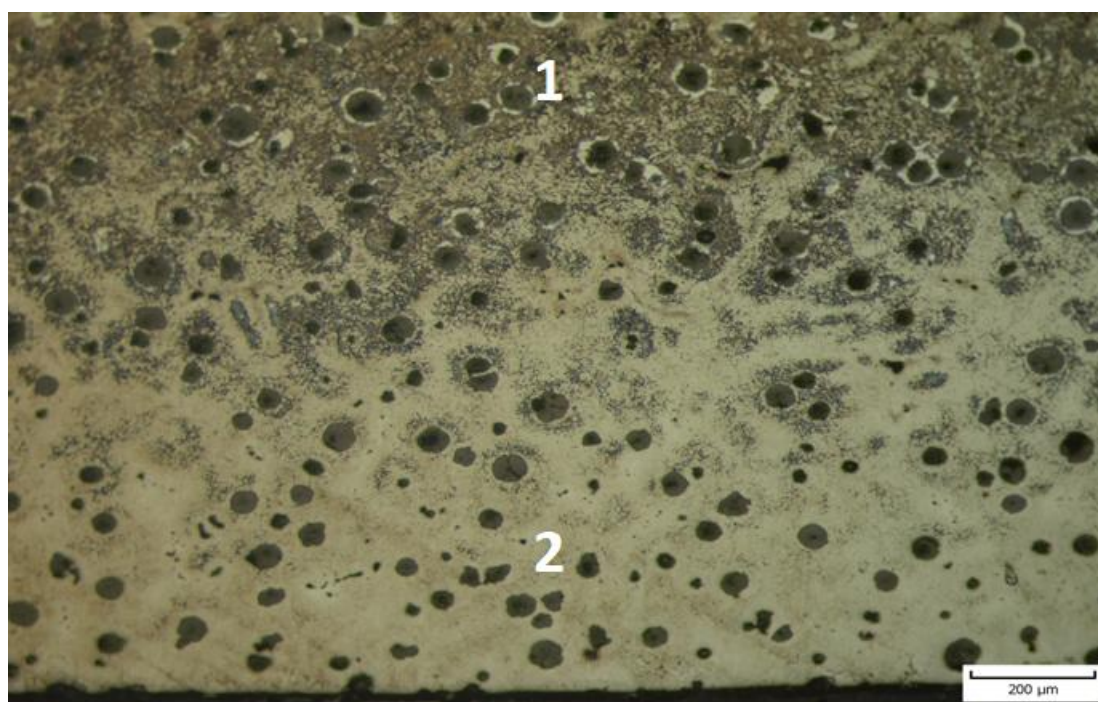
Konkrétní hodnoty naměřených tvrdostí a hloubky vpichu pod povrchem materiálu zobrazují tab. 17 a 18.

Tab. 17 Laserové kalení vzorku 3

Číslo měření	Tvrдость [HV]	Pozice vpichu [mm]
1	70,40	0,10
2	67,76	0,26
3	68,91	0,50
4	64,42	0,70
5	36,13	1,07
6	35,01	1,26
7	30,05	1,44
8	20,05	1,70
9	22,98	1,90
10	22,45	1,99

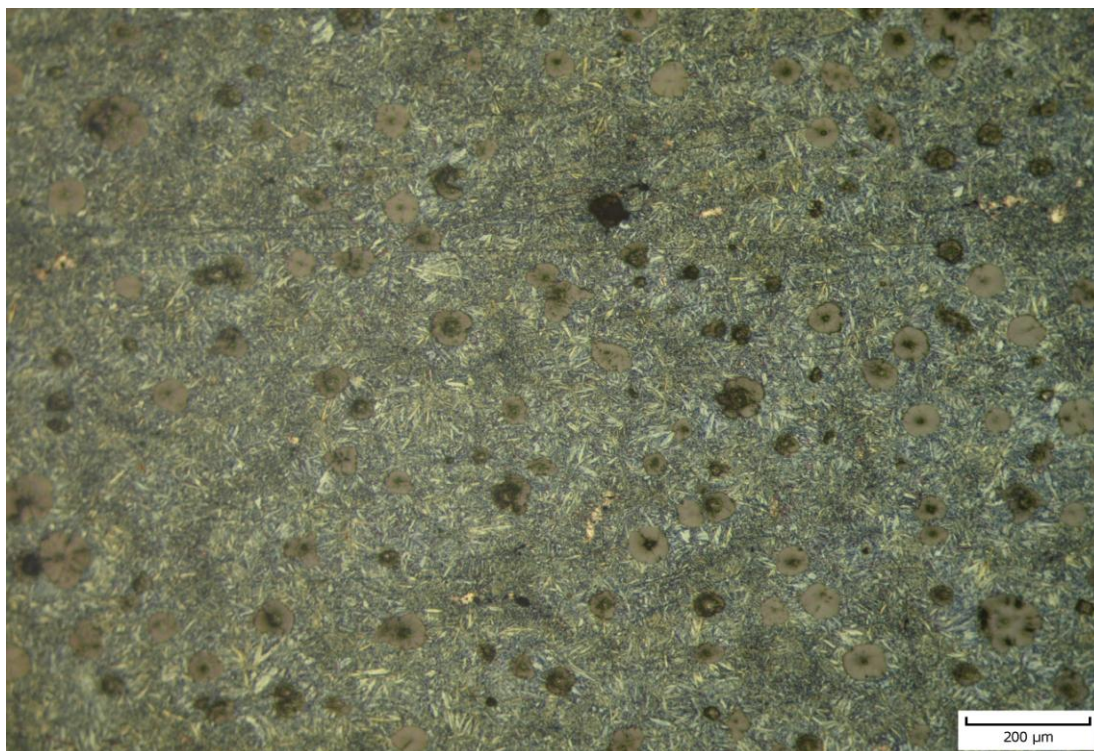
Tab. 18 Indukční kalení vzorku 3

Číslo měření	Tvrдость [HV]	Pozice vpichu [mm]
1	70,00	0,10
2	70,65	1,00
3	68,15	2,00
4	66,66	3,03
5	70,45	5,00
6	68,60	6,00
7	65,77	7,00
8	39,67	8,00
9	42,51	9,02
10	36,72	10,04
11	36,13	10,99
12	36,09	12,00
13	34,54	13,00



Obr 41 Struktura litiny EN-GJS-600-3 po povrchovém laserovém kalení

Obr. 41 znázorňuje strukturu litiny EN-GJS-600-3 po povrchovém laserovém kalení. Obrázek je rozdělen čísly na 2 oblasti. Oblast 1 je povrch vzorku, kde lze vidět zakalená vrstva sahající do hloubky 0,70 mm, naměřená tvrďost zakalené vrstvy se zde pohybuje okolo 70 HV. Část 2 je oblast přechodové vrstvy. Přechodová vrstva má zvýšenou tvrďost okolo 35 HV a sahá do hloubky cca 1,5 mm.



Obr 42 Struktura litiny EN-GJS-600-3 po povrchovém indukčním kalení

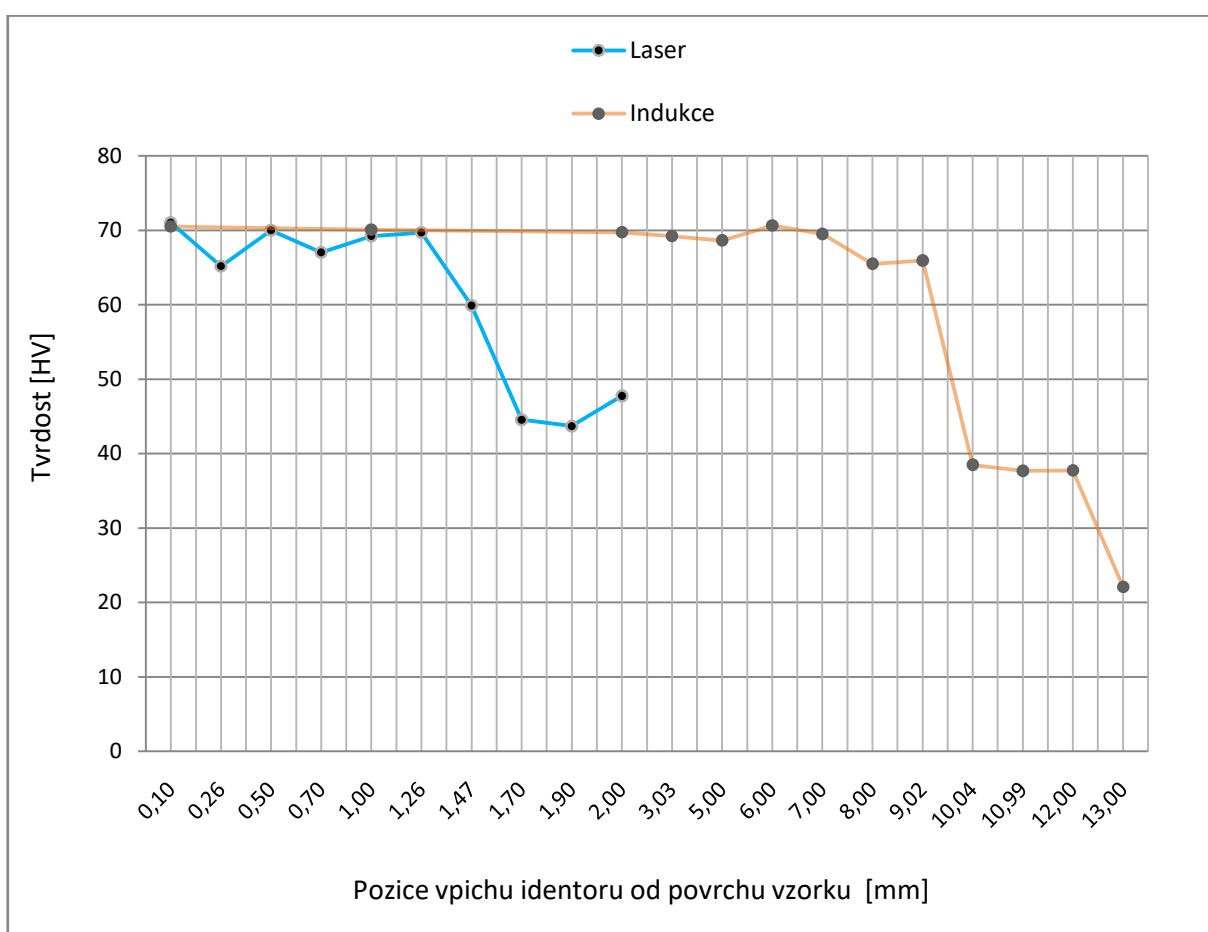
Obr. 42 znázorňuje strukturu litiny EN-GJS-600-3 po povrchovém indukčním kalení. Obrázek zobrazuje oblast, kterou tvoří zakalená jehlicovitá struktura. Jehlicovitá struktura sahá do hloubky 7 mm, naměřená tvrdost zakalené vrstvy se pohybuje okolo 70 HV.

Vzorek 4: Laserové a indukční povrchové kalení litiny EN-GJS-700-2

Obě metody kalení, laserové a indukční, jsou zaneseny do grafu 6. Na ose Y jsou vyneseny hodnoty tvrdosti podle Vickerse. Na ose X jsou vyneseny jednotlivé pozice vpichu indentoru od povrchu vzorku.

Z grafu je patrné, že při použití indukčního kalení je maximální povrchová tvrdost okolo 70 HV, která sahá do hloubky cca 9 mm. Dále hodnoty tvrdosti klesají na hodnotu mírně pod 40 HV, která sahá do hloubky 12 mm. Poté je patrný další pokles tvrdosti na hodnotu okolo 20 HV.

Při použití laserového kalení je maximální povrchová tvrdost okolo 70 HV v hloubce do 1,26 mm pod povrchem. Dále hodnoty tvrdosti padají na hodnoty okolo 45 HV.



Graf 7 Naměřená mikrotvrдость u materiálu EN-GJS-700-2

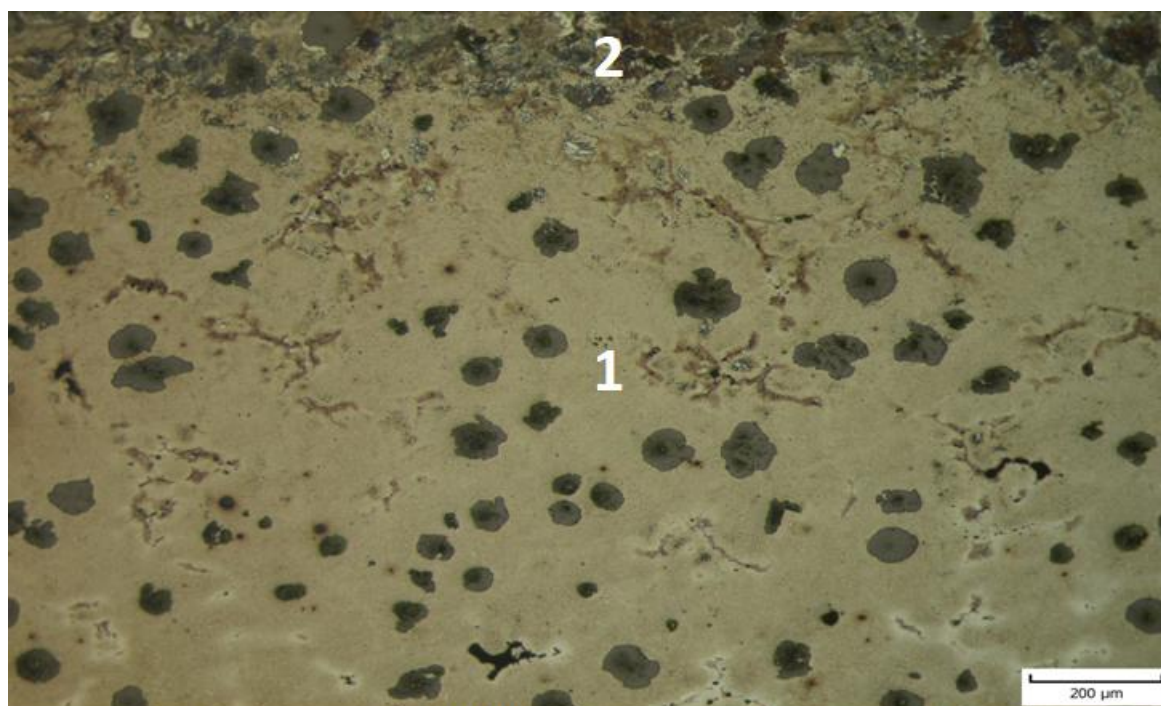
Konkrétní hodnoty naměřených tvrdostí a hloubky vpichu pod povrchem materiálu zobrazují tab. 19 a 20.

Tab. 19 Laserové kalení vzorku 4

Číslo měření	Tvrдость [HV]	Pozice vpichu [mm]
1	71,03	0,10
2	65,19	0,26
3	70,01	0,50
4	67,05	0,70
5	69,22	1,00
6	69,70	1,26
7	59,91	1,47
8	44,55	1,70
9	43,71	1,90
10	47,77	2,03

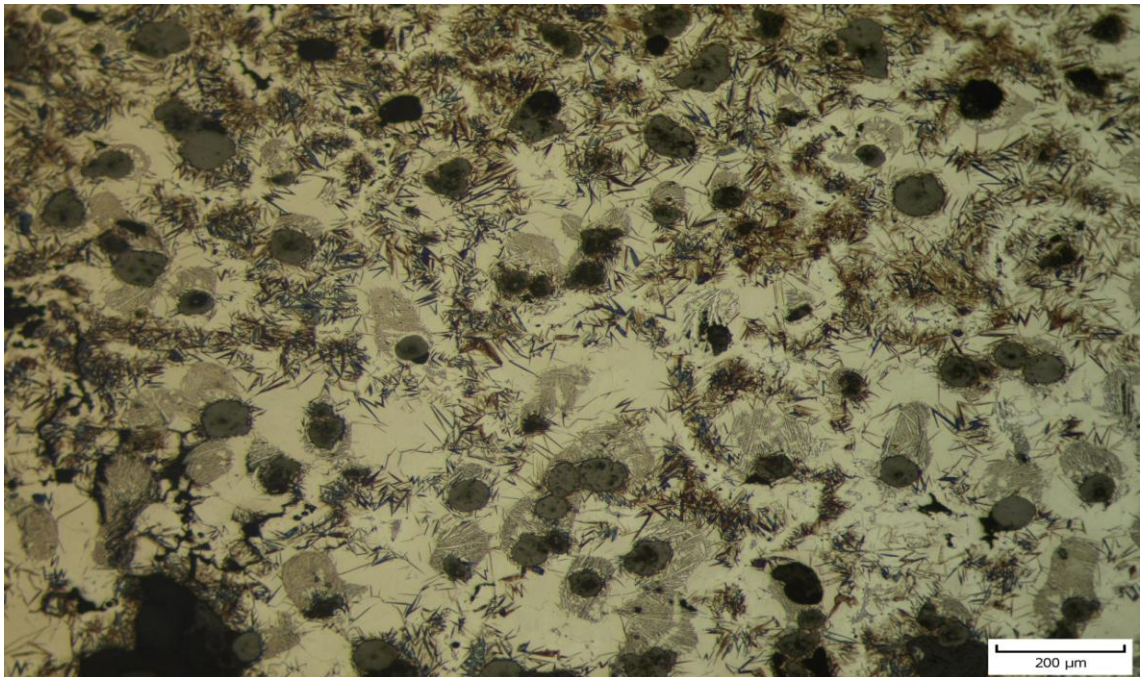
Tab. 20 Indukční kalení vzorku 4

Číslo měření	Tvrдость [HV]	Pozice vpichu [mm]
1	70,52	0,10
2	70,08	1,00
3	69,73	2,00
4	69,22	3,00
5	68,64	5,00
6	70,64	6,06
7	69,51	7,05
8	65,50	7,93
9	65,94	9,02
10	38,49	9,93
11	37,68	11,05
12	37,73	11,93
13	22,09	12,93



Obr 43 Struktura litiny EN-GJS-700-2 po povrchovém laserovém kalení

Obr. 43 znázorňuje strukturu litiny EN-GJS-700-2 po povrchovém laserovém kalení. Obrázek je rozdělen čísly na 2 oblasti. Oblast 1 je povrch vzorku, kde lze vidět zakalená vrstva sahající do hloubky 1,47 mm, naměřená tvrďost zakalené vrstvy se zde pohybuje okolo 70 HV. Oblast 2 je přechodová vrstva. Přechodová vrstva má zvýšenou tvrďost okolo 45 HV.

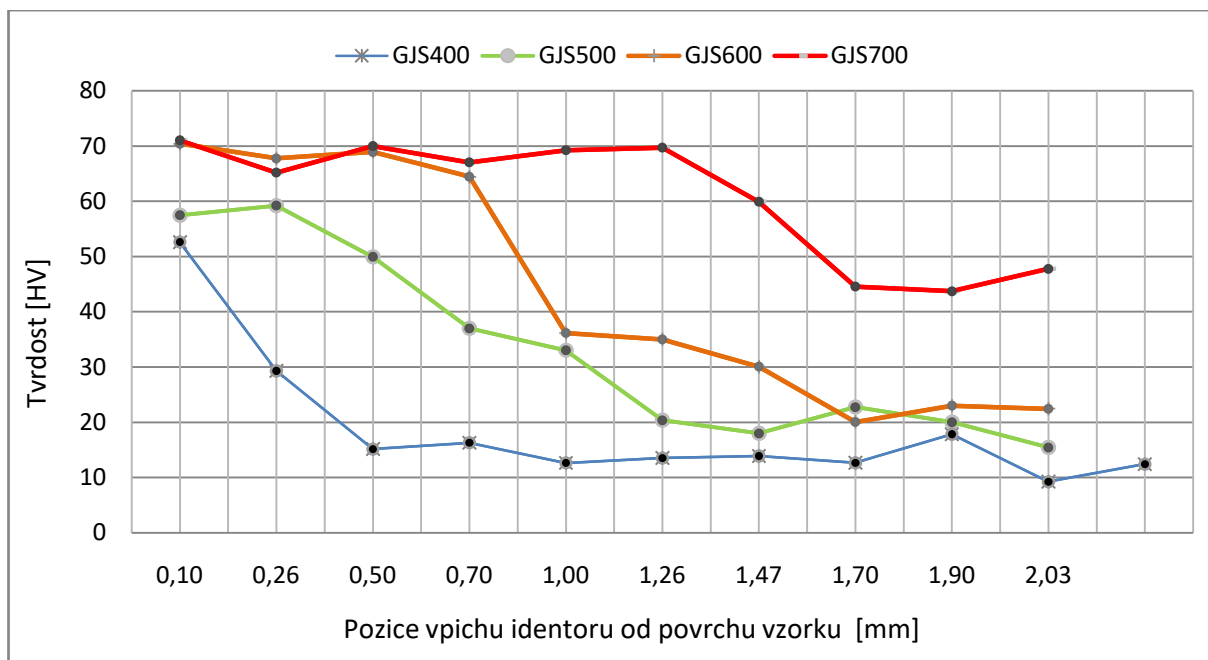


Obr 44 Struktura litiny EN-GJS-700-2 po povrchovém indukčním kalení

Obr. 44 znázorňuje strukturu litiny EN-GJS-700-7 po povrchovém indukčním kalení. Na obrázku lze vidět povrchovou vrstvu, která obsahuje martenzitické jehlice. Martenzitická jehlicovitá struktura zasahuje do hloubky cca 9 mm, naměřená tvrdost zakalené vrstvy se pohybuje okolo 70 HV.

Souhrn výsledků laserového povrchového kalení vzorků

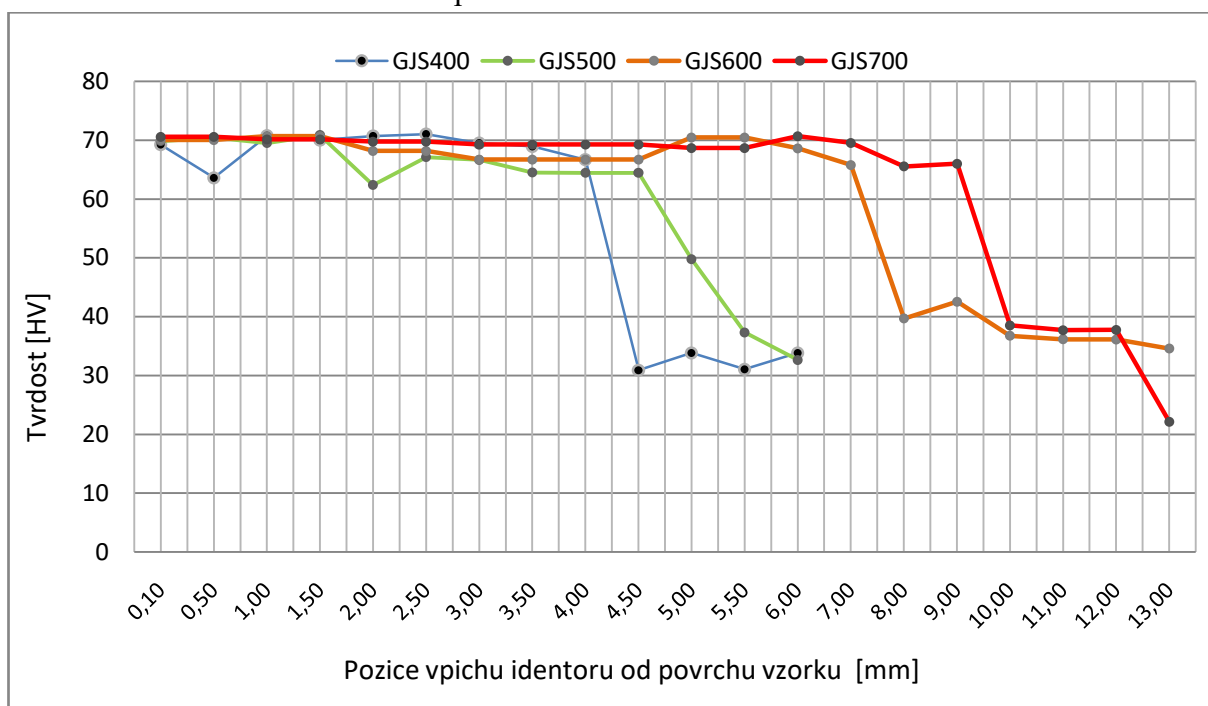
V grafu 8 je znázorněn souhrn výsledků naměřených mikrotvrdoostí v závislosti na pozici vpichu identoru od povrchu vzorků metodou laserového povrchového kalení



Graf 8 Souhrn výsledků laserového povrchového kalení vzorků

Souhrn výsledků indukčního povrchového kalení vzorků

V grafu 9 je znázorněn souhrn mikrotvrdoostí v závislosti na pozici vpichu identoru od povrchu vzorků metodou indukčního povrchového kalení



Graf 9 Souhrn výsledků indukčního povrchového kalení vzorků

6 ZÁVĚR

V diplomové práci je proveden teoretický rozbor struktur a vlastností grafitických litin, popis povrchového kalení litin a rozbor zařízení pro provedení povrchového kalení pomocí laseru a indukce.

V praktické části je popsán postup výroby odlitých vzorků z litiny s kuličkovým grafitem EN-GJS-400-15, EN GJS-500-7, EN-GJS-600-3 a EN-GJS-700-2. Postup výroby zahrnuje přípravu dřevěného modelu, jeho zaformování a následné odlévání kovu do vytvořené formy. Na odlitcích byl proveden rozbor chemického složení a ze souběžně litých YII bloků tahová zkouška, odkud se stanovily mechanické vlastnosti materiálů. Dále se na odebraných vzorcích z odlitků vyhotovila metalografie výchozích struktur, kde se hodnotila zrnitost grafitu a podíl feritu a perlitu ve struktuře.

Na odlitcích bylo následně provedeno povrchové indukční a laserové kalení. V práci je popsán postup procesu kalení spolu s nastavením parametrů u induktoru a laseru. Výsledky povrchového kalení byly posouzeny na základě měření mikrotvrdotí napříč zakaleným materiálem doplněné o metalografii zakalených struktur.

Vyhodnocení výsledků indukčního povrchového kalení:

U materiálu EN-GJS-400-15, kde je podíl feritu ve struktuře 80%, nebyl žádný problém se zakalením povrchové vrstvy. Zakalená povrchová vrstva měla tloušťku 3,98 mm a mikrotvrdot se po celé tloušťce pohybovala okolo 70 HV. U dalších vzorků se se zvyšujícím podílem perlitu ve struktuře zvětšovala i tloušťka zakalené vrstvy, která u nejvíce perlitického materiálu EN-GJS-700-2 zasahovala do hloubky cca 9 mm. Hodnota mikrotvrdotí se ve všech zakalených vrstvách pohybovala vždy okolo 70 HV. Za zakalenou vrstvou byla u každého vzorku naměřena výrazná tepelně ovlivněná oblast, ve které materiál dosahoval vyšších mikrotvrdotí oproti výchozím hodnotám.

Vyhodnocení výsledků laserového povrchového kalení:

U materiálu EN-GJS-400-15, kde je podíl feritu ve struktuře 80%, měla zakalená povrchová vrstva tloušťku pouhých 0,1 mm a mikrotvrdot okolo 50 HV. Zde se povrchové kalení dá považovat jako nedostatečné.

U dalších tří vzorků se s vyšším podílem perlitu tloušťka zakalené vrstvy zvětšuje až na hodnotu 1,26 mm s hodnotou mikrotvrdotí okolo 70HV. Za zakalenou vrstvou u vzorků nebyla dle mikrotvrdotí značná tepelně ovlivněná oblast. Jako vhodné materiály pro povrchové kalení laserem jsou litiny LKG s vyšším podílem perlitu GJS 600 a GJS 700, kde je možné vytvořit zakalenou vrstvu větší než cca 0,7 mm.

Z výsledků je patrné, že použití metody indukčního povrchového kalení není omezující pro litiny s převážně feritickou strukturou. Je však nutné říct, že se povrchově kalil ideální tvar odlitků, který by mohl vykazovat problémy se zakalením s měnící se výškou stěn, s vyvrtanými dírami na povrchu, s vyfrézovanými drážkami apod. Při použití této metody je také mnohem vyšší tepelné ovlivnění materiálu, které může vést v konečném důsledku k jeho popraskání a znehodnocení.

Při použití laserového povrchového kalení byla nedostatečně zakalena litina EN-GJS-400-15. Odvod tepla materiálu během kalení byl natolik rychlý, že zde nebyl prostor pro dostatečné nasycení austenitu uhlíkem. Tepelné ovlivnění materiálu je za kalící povrchovou vrstvou minimální.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ROUČKA, Jaromír. Metalurgie litin. Brno: PC-DIR, 1. vydání, 1998, 166 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-1263-1
- [2] PERNICA, Vítězslav. a KAŇA, Václav. XXIV. Celostátní školení tavičů a mistrů oboru elektrooceli a tvárné litiny s kuličkovým grafitem: Sborník přednášek. Žďár nad Sázavou: [ŽĐAS], 2019. ISBN 978-80-02-02880-2.
- [3] GEDEONOVÁ, Zora a Imrich JELČ. Metalurgia liatin. Košice: Hutnícka fakulta Technickej univerzity, 2000. ISBN 80-709-9516-5
- [4] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 1: struktury kovových materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2013. ISBN 978-80-01-05248-8.
- [5] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3
- [6] MORES, A, J HORNÍK, J ODEHNAL, B SKRBEK, M NĚMEC a J KRČIL, 2018. *Sborník přednášek z 55. slévárenských dnů: Povrchové indukční kalení feritické litiny s kuličkovým grafitem se zvýšeným obsahem Si*. Brno: Dům techniky ČSVTS. ISBN 978-80-02-02833-8.
- [7] VÁŇOVÁ, Petra a SOJKA, Jaroslav. STUDIJNÍ OPORTA: Základy tepelného zpracování [online]. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Opory_FMMI/636/636-Vanova_ZTZ.pdf
- [8] MATIČKA, Oldřich, Ladislav MUSIL, Ladislav PRSKAVEC, Jan KYNCL, Ivo DOLEŽEL a Bohuš ULRICH. *SIMULACE INDUKČNÍHO OHŘEVU* [online]. Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky ČVUT, Technická 2, 166 27 Praha 6 [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/matlab02/musil.pdf
- [9] MORES, Antonín, 2020. Výroba odlitků z litiny s kuličkovým grafitem v České republice - stav v roce 2019. *Slévárenství* [online]. Technická 2896/2 61600 Brno: Svaz sléváren České republiky, 23.04.2020, (3-4/2020) [cit. 2020-06-02]. ISSN 0037-6825.
- [10] Induction Heating Principle and It's Applications. www.elprocus.com [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/induction-heating-principle-and-its-applications/>
- [11] What is Induction Heating? *Inductoheat.com* [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://inductoheat.com/induction-heating/>
- [12] Advanced Induction Concepts: Advanced Induction Heating Concepts. *Radyne.com* [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://radyne.com/what-is-induction-heating-2/advanced-induction-concepts/>

- [13] Basics of Induction Heating: Induction Heating. *Radyne.com* [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://radyne.com/what-is-induction-heating-2/induction-heating-basics/>
- [14] PILOUS, Václav. Tepelné zpracování kovových materiálů. Brno: TESIYO, 2015. ISBN 978-80-87102-11-4
- [15] *CHARACTERISTICS OF GG25* [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.dijkkamp.nl/en/materials/gg25-en-gjl-250/>
- [16] *CHARACTERISTICS OF GGG60* [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.dijkkamp.nl/en/materials/ggg60-en-gjs-600-3/>
- [17] Vermicular graphite cast iron [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/vermicular-graphite-cast-iron-3805/?cHash=30c7ccca23dd97cfae647fb4f88f5616>
- [18] Pearlitic malleable cast iron [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/core-materials/3840190860>
- [19] Case Hardening Steel [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/case-hardening-steel-10981862248.html>
- [20] *Induktionshärten* [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/waermebehandlung-stahl/oberflaechenhaerten-randschichthaerten/>
- [21] KOŘÁN, Pavel. *SERIÁL NA TÉMA LASERY: ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ* [online]. 19. 02. 2013 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127?fbclid=IwAR2KGVHvUuWCBqO-dFA25T5ZH8nzsbnNK1Qtt81B0UEt7dcWhIJRstOXaWw>
- [22] *VYSOKOVÝKONOVÉ LASEROVÉ ROBOTIZOVANÉ PRACOVIŠTĚ*. KSK PRECISE MOTION, a.s.
- [23] NĚMEČEK, Stanislav. *Zvyšování životnosti povrchů laserovým kalením: Základy laserového kalení* [online]. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22011/zvysovani-zivotnosti-povrchu-laserovym-kalenim.html?fbclid=IwAR2iy0kCPCGs7LEy_7Wwv2kX-UKhDCUroTdm4i762VGWooAT2q5ce8I8_u8
- [24] ŠMÍD, Jiří. *Lasery pro průmysl* [online]. 2008 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl.html>
- [25] KOŘÁN, Pavel. *SERIÁL NA TÉMA LASERY: HLAVNÍ TYPY LASERŮ POUŽÍVANÝCH V PRŮMYSLU* [online]. 19. 02. 2013 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128?fbclid=IwAR1oyO6B8mMqCfEmtfki0JsmK2FWdvzSnHRDvTSQWo-LSXt07-7WMqx5nPM>

[26] NOVÁK, Miroslav. *Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi* [online]. 2012 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>

[27] UKAR, E., A. LAMIKIZ, S. MARTINEZ, F. ESTALAYO, I. TABERNERO. Laser polishing of GGG70L cast iron with 2D scan-head. *Procedia Engineering*, Volume 63, 2013, pp. 53 - 59. Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2013, Zaragoza, Spain; 26 - 28 June 2013. ISSN 1877-7058.

[28] *Mikrotvrđost* [online], [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://material.karlov.mff.cuni.cz/cs/pristroje/mikrotvrđost>

[29] LI, Y., S. DONG, S. YAN, P. HE, B. XU. Phase evolution of ductile iron during laser cladding processing. *Surface and Coatings Technology*. Volume 339, 15 April 2018, pp. 37 - 47. ISSN 0257-8972.

SEZNAM TABULEK

Tab 1	Základní chemické složení LLG [5]
Tab 2	Mechanické vlastnosti LLG [2]
Tab 3	Základní chemické složení LKG [5]
Tab 4	Mechanické vlastnosti LKG [5]
Tab 5	Mechanické vlastnosti LVG [2]
Tab 6	Orientační chemické složení temperované litiny s bílým lomem [5]
Tab 7	Mechanické vlastnosti temperované litiny s bílým lomem
Tab 8	Orientační chemické složení temperované litiny s černým lomem [5]
Tab 9	Mechanické vlastnosti temperované litiny s černým lomem
Tab 10	Mechanické hodnoty z tahové zkoušky v porovnání s ČSN EN 1563
Tab 11	Nastavení induktoru
Tab 12	Laserové kalení vzorku 1
Tab 13	Indukční kalení vzorku 1
Tab 14	Laserové kalení vzorku 2
Tab 15	Indukční kalení vzorku 2
Tab 16	Laserové kalení vzorku 3
Tab 17	Indukční kalení vzorku 3
Tab 18	Laserové kalení vzorku 4
Tab 19	Indukční kalení vzorku 4

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr 1	Struktura litiny s lupínkovým grafitem [15]
Obr 2	Struktura litiny s kuličkovým grafitem [16]
Obr 3	Struktura litiny s vermikulárním grafitem [17]
Obr 4	Struktura litiny s vločkovým grafitem [18]
Obr 5	Diagram ARA neleg. LKG (3,61 % C, 2,83 % Si, 0,20 % Mn) [5]
Obr 6	Povrchově zakalené válečky s různou tloušťkou zakalené vrstvy [19]
Obr 7	Schéma indukčního kalení [20]
Obr 8	Detail měděné, vodou chlazené, cívky [11]
Obr 9	Příklad závislosti použité frekvence na hloubce průniku [12]
Obr 10	Tok proudu v indukční cívce a vznik vířivých proudů [13]
Obr 11	Schéma laseru [21]
Obr 12	Schéma difúzně chlazeného, RF buzeného CO ₂ laseru s výkonem okolo 5000 W [25]
Obr 13	Příklad vláknového laseru určeného k leštění povrchu LKG [27]
Obr 14	Geometrie aktivního prostředí u jednotlivých typů laserů [25]
Obr 15	Schéma laserového paprsku dopadajícího na povrch materiálu [22]
Obr 16	Dřevěný model odlévané tyče
Obr 17	Dřevěný model odlévané tyče
Obr 18	Zaformování dřevěného modelu
Obr 19	Odlitky po vytlučení a tryskání

- Obr 20 Schéma zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku
- Obr 21 Výchozí struktura EN-GJS-400-15 (100x)
- Obr 22 Výchozí struktura EN-GJS-500-7 (100x)
- Obr 23 Výchozí struktura EN-GJS-600-3 (100x)
- Obr 24 Výchozí struktura EN-GJS-700-2 (100x)
- Obr 25 Univerzální kalící zařízení SFR 150
- Obr 26 Začátek indukčního kalení
- Obr 27 Konec indukčního kalení
- Obr 28 Vysokovýkonné laserové robotizované pracoviště
- Obr 29 Dvou-osé polohovadlo
- Obr 30 Průběh laserového kalení
- Obr 31 Odebraný vzorek ze zakalené tyče
- Obr 32 Metalografická pila SERVOCUT
- Obr 33 Automatický lis na vzorky ECOPRESS 50
- Obr 34 Metalografická bruska FORCIMAT
- Obr 35 Mikrotvrdměr Qness Q10
- Obr 36 Vpich mikrotvrdoměru do zakalené martenzitické struktury
- Obr 37 Struktura litiny EN-GJS-400-15 po povrchovém laserovém kalení
- Obr 38 Struktura litiny EN-GJS-400-15 po povrchovém indukčním kalení
- Obr 39 Struktura litiny EN-GJS-500-7 po povrchovém laserovém kalení
- Obr 40 Struktura litiny EN-GJS-500-7 po povrchovém indukčním kalení
- Obr 41 Struktura litiny EN-GJS-600-3 po povrchovém laserovém kalení
- Obr 42 Struktura litiny EN-GJS-600-3 po povrchovém indukčním kalení
- Obr 43 Struktura litiny EN-GJS-700-2 po povrchovém laserovém kalení
- Obr 44 Struktura litiny EN-GJS-700-2 po povrchovém indukčním kalení

SEZNAM GRAFŮ

- Graf 1 Světová výroba odlitků za rok 2017 [2]
- Graf 2 Výroba odlitků v ČR v roce 2017 [2]
- Graf 3 Průběh zatěžování zkušebních tyčí v závislosti na jejich prodloužení
- Graf 4 Naměřená mikrotvrdost u materiálu EN-GJS-400-15
- Graf 5 Naměřená mikrotvrdost u materiálu EN-GJS-500-7
- Graf 6 Naměřená mikrotvrdost u materiálu EN-GJS-600-3
- Graf 7 Naměřená mikrotvrdost u materiálu EN-GJS-700-2
- Graf 8 Souhrn výsledků laserového povrchového kalení vzorků
- Graf 9 Souhrn výsledků indukčního povrchového kalení vzorků