

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

LASEROVÉ POVRCHOVÉ KALENÍ LITIN S KULIČKOVÝM
GRAFITEM

AUTOR: Pečený Matěj

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Krčil Jan Ph.D.

PRAHA 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pečený** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **501376**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Laserové povrchové kalení litin s kuličkovým grafitem

Název bakalářské práce anglicky:

Laser hardening of the surface of cast iron with nodular graphite

Pokyny pro vypracování:

- 1) Napsat teoretickou rešerši zabývající se povrchovým kalením litin pomocí laseru
- 2) Na základě literární rešerše navrhnout postup experimentu na vybraném materiálu
- 3) Provést experimentální hodnocení připravených vzorků
- 4) Analyzovat získané výsledky a diskutovat je s dostupnou literaturou
- 5) Vyvodit závěry

Seznam doporučené literatury:

- [1] MACEK, K. a P. ZUNA. Nauka o materiálu. Dotisk prvního vydání. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1507-6.
[2] BABU, P., K.R. BALASUBRAMANIAN a G. BUVANASHEKARAN. Laser surface hardening: A review. International Journal of Surface Science and Engineering [online]. 2011, 5(23), 131-151 [cit. 2022-12-06]. ISSN 1749-785X.
[3] GRUM, J. Comparison of different techniques of laser surface hardening. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering [online]. 2007, 2007(24), 17- 24 [cit. 2022-12-05].
[4] CATALÁN, N., E. RAMOS-MOORE, A. BOCCARDO a D. CELENTANO. Surface Laser Treatment of Cast Irons: A Review. Metals [online]. 2022, 12(4) [cit. 2022-12-22]. ISSN 2075-4701.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Krčil, Ph.D. ústav materiálového inženýrství FS

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **29.03.2023** Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jan Krčil, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Cvrček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Laserové povrchové kalení litin s kuličkovým grafitem“ vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá povrchovým laserovým kalením litiny s kuličkovým grafitem. V teoretické části jsou popsány základní druhy litin a ostatní metody povrchového kalení. V experimentální části je vyhodnocena makrostruktura, mikrostruktura a tvrdost NiCu litiny po povrchovém laserovém kalení. Naměřené výsledky jsou porovnány s dostupnou literaturou.

Klíčová slova

Litiny, litina s kuličkovým grafitem, povrchové laserové kalení, pevnolátkový laser, mikrostruktura, měření mikrotvrdosti

Annotation

This Bachelor thesis deals with the laser hardening of the surface of cast iron with nodular graphite. The theoretical part describes basic types of cast irons and other methods of surface hardening. The experimental part evaluates the macrostructure, microstructure and hardness of NiCu cast iron after laser surface hardening. The measured results are compared with the available literature.

Keywords

Cast irons, cast iron with nodular graphite, laser surface hardening, solid state laser, microstructure, microhardness measurement

Poděkování

Tímto děkuji svému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Janu Krčilovi, Ph.D. za věnovaný čas, ochotu, cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále děkuji doc. Ing. Stanislavu Němečkovi, Ph.D., IWE za povrchové kalení vzorků a Ing. Lucii Pilsové za pomoc v laboratořích.

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Litiny.....	9
2.1.	Litina s lupínkovým grafitem (LLG).....	12
2.2.	Litina s kuličkovým grafitem (LKG).....	14
2.3.	Litina s červíkovitým grafitem (LVG).....	15
2.4.	Litina s vločkovým grafitem.....	16
3	Kalení.....	18
3.1.	Martenzitické kalení.....	20
3.2.	Bainitické kalení.....	21
3.3.	Povrchové kalení.....	22
3.3.1.	Povrchové kalení plamenem.....	23
3.3.2.	Indukční povrchové kalení.....	24
3.3.3.	Povrchové kalení laserem.....	25
3.4.	Laserové povrchové kalení litin.....	27
4	Experimentální část.....	33
4.1.	Použitý materiál a příprava metalografického vzorku.....	33
4.2.	Parametry laseru.....	35
4.3.	Metalografie a měření tvrdosti.....	36
4.3.1.	NiCu litina – průjezd A.....	36
4.3.2.	NiCu litina – průjezd B.....	39
4.3.3.	NiCu litina – průjezd C.....	42
4.3.4.	NiCu litina – průjezd D.....	45
4.3.5.	NiCu litina – průjezd E.....	48
5	Diskuse.....	51
6	Závěr.....	52
	Bibliografie.....	53
	Seznam obrázků.....	56
	Seznam tabulek.....	57

1 Úvod

Litiny můžeme obecně rozdělit dle dvou základních kritérií. V závislosti na obsahu uhlíku rozlišujeme litiny podeutektické a nadeutektické, podle strukturního hlediska litiny dělíme na grafitické a cementitické. Nejobvyklejším typem vyráběných litin je litina s lupínkovým grafitem, ta je také nejrozšířenějším slévárenským materiálem.

Laserové povrchové kalení je momentálně značně využívané tepelné zpracování. Důvodem je vysoká přesnost a efektivita laseru. Zároveň není nutné používat žádné kalící médium, zahřátá oblast se sama ochladí okolním materiálem. Pomocí laseru zakalíme pouze požadované plochy, oblasti materiálu, které jsou při používání namáhané. Laserové kalení se nejvíce využívá na cyklicky namáhané součásti, proto má velké uplatnění v automobilovém průmyslu.

Cílem bakalářské práce je seznámení se základními druhy litin, srovnání dalších metod povrchového kalení s laserem, k čemu se jaká metoda využívá a proč je výhodné použít povrchové kalení. Zjistit a vyhodnotit, jak se změní vlastnosti, tvar, velikost a struktura zkoušeného materiálu po laserovém povrchovém kalení.

2 Litiny

Litiny jsou slitiny železa, uhlíku a dalších doprovodných prvků, které jsou jak prospěšné, tak škodlivé. Doprovodných prvků je v litinách vždy více než u ocelí, jelikož není možná taková rafinace. V případě, že by u litin probíhalo výrazné odstraňování nežádoucích příměsí a nečistot, došlo by také k odstranění potřebných prvků. Zpravidla se dají litiny od ocelí odlišit tím, že mají více než 2,11 % C. Obsah uhlíku v litinách překračuje jeho maximální rozpustnost v austenitu. [1] [2]

Základním kritériem k rozdělení litin je strukturní hledisko. Litiny mohou krystalizovat čistě podle metastabilního diagramu Fe-Fe₃C (Obr. 1), kde je eutektikem ledeburit, který je tvořen austenitem a cementitem. V tomto případě je uhlík ve struktuře vázaný v cementitu, a proto vznikají litiny cementitické. Nebo litiny krystalizují podle stabilního diagramu Fe-C (Obr. 2), kdy vzniká grafitické eutektikum. Zde je veškerý uhlík, nebo jeho převážná část, vyloučen jako grafit, eutektikum je tvořeno austenitem a grafitem, hovoříme tedy o litinách grafitických. [1] [2]

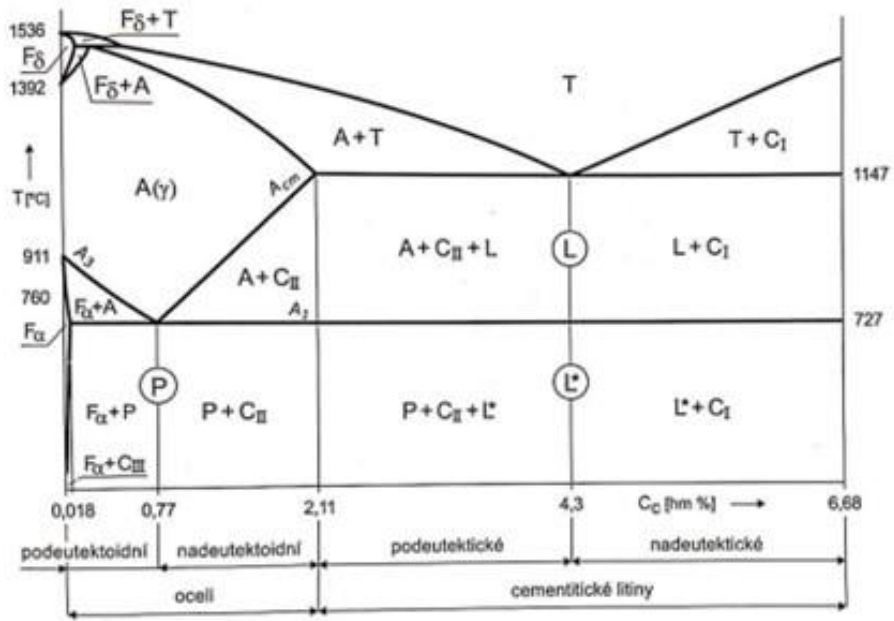
Krystalizace grafitických litin je trochu problematická, protože obvykle dochází ke kombinované krystalizaci dle stabilního i metastabilního diagramu. Zatímco při velmi pomalém ochlazení se austenit plně transformuje na ferit a grafit, se zvyšující se ochlazovací rychlostí probíhají obě přeměny současně. To má za následek výslednou feriticko-perlitickou matici, případně pouze perlitickou. Značný vliv na fázové přeměny litin v tuhém stavu má chemické složení a účinek přísad na eutektoidní přeměnu. Například přísady niklu či mědi, které se sice při tuhnutí chovají grafitizačně, ale při austenitické přeměně zároveň pomáhají k tvorbě perlitu. [3]

Ať už se jedná o eutektikum grafitické nebo ledeburitické, vždy je křehké, proto jdou litiny pouze odlévat. Nelze je tvářet za tepla ani za studena. Přítomnost grafitu ve struktuře u grafitických litin má za následek zbarvení lomové plochy do šeda, proto jsou ve starší literatuře označovány jako litiny šedé. V případě cementitických litin k tomuto jevu nedochází, tudíž byly dříve nazývány litinami bílými. Tyto názvy se již dle aktuálního značení nepoužívají, někde je však stále můžeme najít. [1] [4]

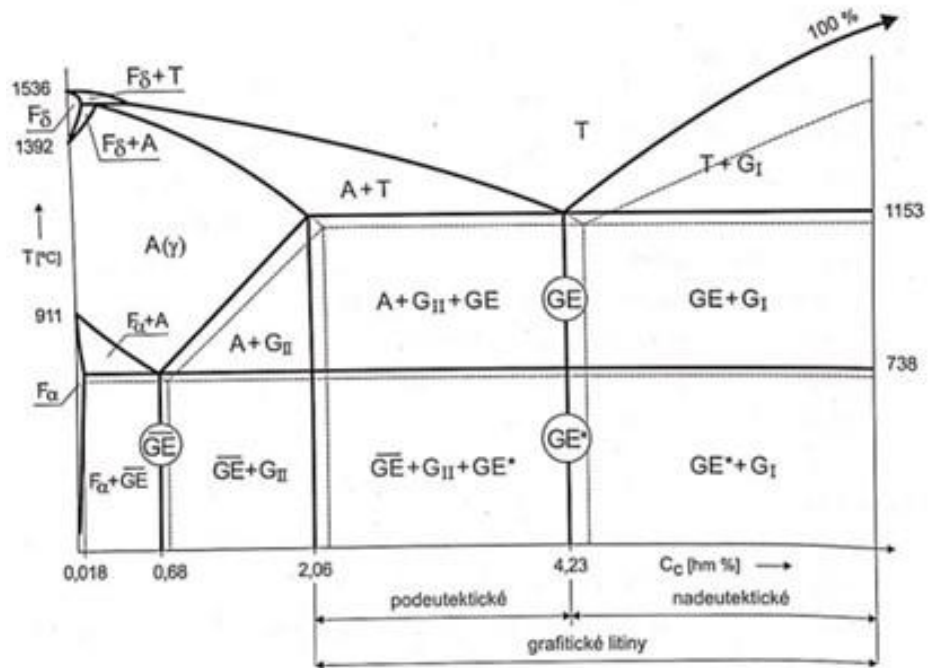
Grafitickými litinami jsou litina s lupínkovým grafitem (šedá), litina s kuličkovým grafitem (tvárná) a litina s červíkovitým grafitem (vermikulární), po temperování do této skupiny řadíme i litinu s vločkovým grafitem (temperovaná).

Mezi cementitické litiny patří bílá litina, kterou tvoří směs cementitu a perlitu. Ve struktuře se nachází volný cementit, proto je tato litina velmi křehká a neobrobitelná.

Přechodovým typem je litina tvrzená, ta obsahuje nejen grafitické, ale i cementitické eutektikum. Odlitky z této litiny mají tvrdou cementitickou vrstvu na povrchu a měkké jádro, které tvoří litina grafitická. [1] [2]



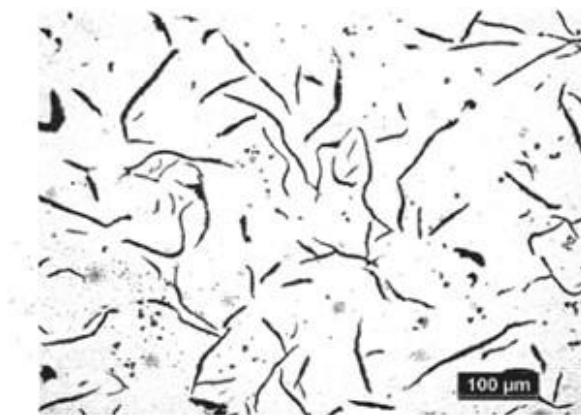
Obrázek 1 Metastabilní rovnovážný diagram Fe - Fe₃C [5]



Obrázek 2 Porovnání metastabilního a Stablního rovnovážného diagramu Fe - C [5]

2.1. Litina s lupínkovým grafitem (LLG)

Litina s lupínkovým grafitem, dříve nazývána šedou litinou, je považovaná za nejobvyklejší typ vyráběných litin. Tuto litinu můžeme definovat jako slitinu železa a uhlíku, která se nejčastěji používá na odlitky. Volný uhlík je v litině přítomen ve formě grafitu, který má na metalografickém výbrusu tvar lupínků neboli tvar lamelárních částic (Obr. 3). Lupínky jsou převážně velmi dlouhé a mají úzké útvary, jejich konec je ostrý. Lupínkový grafit je obsažen v základní kovové hmotě, která může být trojího druhu – feritická, feriticko – perlitická nebo perlitická. [2] [3] [4]



Obrázek 3 Lupínkový grafit v nenaleptném stavu [5]

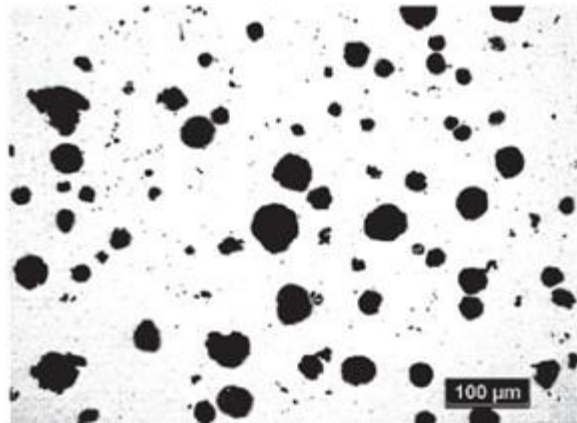
Litiny s lupínkovým grafitem jsou nejrozšířenějším slévárenským materiálem, a proto se vyznačují dobrými slévárenskými vlastnostmi. Z hlediska ceny je to relativně levný konstrukční materiál. Tím, že má grafit ve tvaru lupínků ostrohranné zakončení, vytváří velké množství vrubů a snižuje mechanické vlastnosti litiny. Dalšími nevýhodami jsou nízká pevnost, kterou způsobuje grafit zmenšováním nosného průřezu základní hmoty, velmi nízká plasticita, houževnatost a tažnost. Narozdíl od LKG a LVG nejsou zpravidla potřeba žádné metalurgické zásahy, a není tak nutné provádět modifikaci. [1] [2] [3]

V průmyslu se většinou používají šedé litiny podeutektické se základním chemickým složením: 2,8 až 3,6 % C (v novější literatuře se uvádí 2,5 až 4,0 % C), 1,7 až 2,7 % Si, 0,5 až 1,0 % Mn, 0,2 až 0,5 % P, max. 0,15 % S. Z grafitotvorných přísad má v litině největší význam křemík, který snižuje koncentraci uhlíku v eutektiku. Důsledkem toho bude původní podeutektická litina tuhnout jako eutektická, případně nadeutektická. Při malých tloušťkách stěn, respektive velkých

ochlazovacích rychlostí, musíme zvýšit obsah křemíku. Ten svým grafitizačním účinkem kompenzuje vliv karbidotvorných prvků, vliv manganu a síry. [1] [3]

2.2. Litina s kuličkovým grafitem (LKG)

Grafitická litina, také označována jako litina tvárná, je v současné době významným konstrukčním materiálem. Uhlík v ní je přítomen ve formě grafitu, který má tvar kulovitých zrn (Obr. 4). Aby měla litina nejlepší možné vlastnosti, musel by mít grafit tvar dokonalé kuličky, nejčastěji se však jedná o “nedokonale zrnitý“ grafit. LKG svými mechanickými i technologickými vlastnostmi vytváří jakýsi přechod mezi ocelí a šedou litinou. [1] [2] [3]



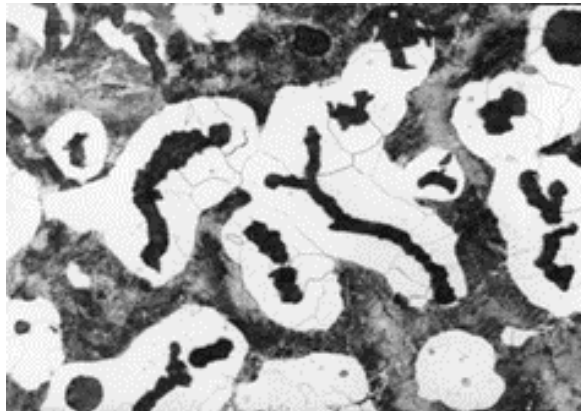
Obrázek 4 Kuličkový grafit v nenaleptaném stavu [5]

Ve srovnání s LLG má výrazně lepší mechanické vlastnosti, zejména plasticitu. Má podstatně vyšší pevnost, houževnatost a modul pružnosti. Pevnost v tahu roste v závislosti na obsahu perlitu ve struktuře, pohybuje se od 370 do 800 MPa. Třecí vlastnosti, slévatelnost a schopnost útlumu jsou naopak vlastnosti, které má LKG v porovnání s LLG horší, avšak stále lepší než ocel. [1] [3] [4]

Litiny s kuličkovým grafitem jsou převážně eutektické, popř. nadeutektické s chemickým složením: 3,2 až 4,0 % C, 1,8 až 3,0 % Si, 0,2 až 0,8 % Mn, max. 0,1 % P, max. 0,05 % S, 0,04 až 0,08 % Mg. Tvárná litina se vyrábí transformací taveniny čistým hořčíkem. Účinek hořčíku tlumí síra, a proto její obsah v litině musí být velmi nízký. Pokud by litina obsahovala vyšší množství síry, nebylo by možné tvoření kuličkového grafitu. Dále je potřeba eliminovat karbidotvorný účinek hořčíku a tím zabránit vzniku cementitu. To se provádí grafitizačním očkováním ferosiliciem. [3] [4]

2.3. Litina s červíkovitým grafitem (LVG)

Litina s červíkovitým neboli vermikulárním grafitem má takový tvar grafitu, že běžně zahrnuje určité množství lupínkového nebo kuličkového grafitu, a tak zaujímá místo mezi těmito dvěma litinami. Tvar grafitu se podobá lamelárním částicím s tím rozdílem, že útvary jsou kratší, tlustší a nemají ostrý konec (Obr. 5). Pokud při výrobě litiny s kuličkovým grafitem není dostatečně účinná modifikace hořčíkem, je šance, že získáme vermikulární grafit. [2] [3]



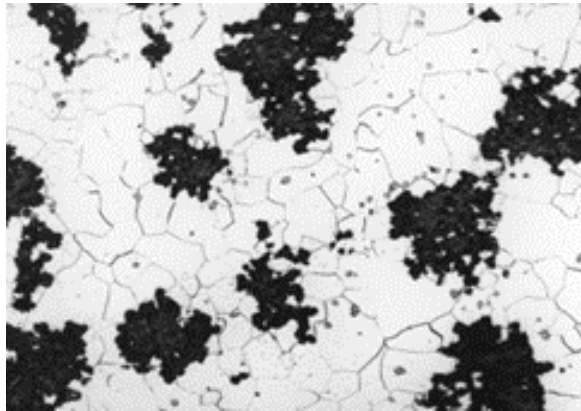
Obrázek 5 Vermikulární grafit [2]

Litina s vermikulárním grafitem dosahuje horších pevností než litina s kuličkovým grafitem, ale má podstatně vyšší tepelnou vodivost. Ve srovnání s litinou s lupínkovým grafitem vykazuje nejen lepší pevnostní vlastnosti, ale také mírně vyšší tepelnou vodivost. Vlastnosti litiny závisí především na poměru feritu a perlitu ve struktuře, dále pak na množství kuličkového grafitu, jehož podíl by měl tvořit přibližně 10, maximálně však 20 %. Převážně feritickou základní hmotu má grafit v případě nelegované litiny. Mez pevnosti této struktury je v rozmezí 320 až 380 MPa a tvrdost od 135 do 170 HB. U litiny, jejíž struktura je z velké části perlitická, získáváme mez pevnosti minimálně 400 MPa a tvrdost je v rozmezí 190 až 280 HB.

Používá se na výrobu součástí, které podléhají tepelnému i mechanickému namáhání. Jedná se například o hlavy válců, brzdové části nebo výfukové potrubí. Výroba této litiny je patentově chráněna. Zpracování je možné tzv. modifikační přísadou. To znamená, že vyvoláme vznik kuličkového grafitu, ale nesmí dojít k jeho úplnému vytvoření. Další možností je, během modifikace hořčíkem, přidání titanu či jiného prvku, který brání vzniku kuličkového grafitu. [3] [6]

2.4. Litina s vločkovým grafitem

Litina s vločkovým grafitem (Obr. 6), častěji nazývaná jako temperovaná litina, je slitina železa s uhlíkem. Jelikož tuhne podle metastabilního diagramu jako bílá litina, eutektikem je ledeburit, a veškerý uhlík je vázán ve formě karbidu železa Fe_3C . Temperovaná litina poté vzniká tepelným zpracováním bílé litiny. Takový proces se nazývá temperování. Jde o grafitizační žíhání, které rozloží karbidy v ledeburitickém eutektiku na volný temperovaný grafit. [1] [3]



Obrázek 6 Temperovaný grafit [2]

Charakteristickými vlastnostmi jsou dobrá houževnatost a obrobiteľnosť, ktoré sa ovšem získavajú až následným tepelným zpracováním, tedy temperováním. Bez tohoto procesu je litina velmi tvrdá, křehká a prakticky neobrobiteľná. Temperovaný grafit má kompaktnější tvar, a tedy i menší vrubový účinek než LLG. Podobně jako LKG má zvýšené deformační rysy, zejména tažnosť, proto se používá na součásti, které podléhají velkým silám a dynamickému namáhání. [1] [3]

Podle charakteru lomu lze tuto litinu rozdělit na temperovanou litinu s bílým a s černým lomem.

Temperovaná litina s bílým lomem se vyznačuje tím, že základní hmota je v jádře perlitická a na povrchu feritická. Pokud však budeme dlouhodobě žíhat odlitky s tloušťkou stěny menší než 8 mm, můžeme dosáhnout v celém průřezu čistě feritickou strukturu. Temperovanou litinu s bílým lomem získáme žíháním v oxidační atmosféře, kterou tvoří směs oxidu uhličitého, oxidu uhelnatého, vodíku a vodních par. Teplota se pohybuje okolo 1000 °C. Cílem tohoto procesu je oduhličení struktury a rozložení ledeburitických karbidů na austenit a grafit, tzv. temperový uhlík.

U temperované litiny s černým lomem může být výsledná struktura feritická až perlitická. V případě feritické základní hmoty má litina nízkou pevnost a vyšší houževnatost. Perlitické litiny mají naopak vysokou pevnost, ale nižší houževnatost. Při tepelném zpracování této litiny je všechen uhlík vyloučen ve formě temperového grafitu, proto je součástí lomu šedý až šedočerný vzhled. Tepelné zpracování je dvoustupňové, v první fázi dochází k rozpadu cementitu a vzniká temperovaný grafit, druhou fází se dosahuje požadované struktury. [3] [4] [7]

3 Kalení

Kalení je jeden ze způsobů tepelného zpracování, jehož provedením vznikne v materiálu nerovnovážná strukturní složka martenzitu. V případě, že martenzitická struktura vznikne jen částečně, vytvoří se směs martenzitu a bainitu. Převážně však chceme zajistit vznik martenzitické struktury. Ve struktuře máme vždy určitý podíl zbytkového austenitu (A_z), který je pro nás nežádoucí, protože je druhou nejměkčí složkou po feritu. Jeho množství se odvíjí od legujících prvků a obsahu uhlíku. Podíl zbytkového austenitu můžeme minimalizovat kalením na sekundární tvrdost nebo kalením se zmrazováním, kdy se nacházíme v záporných teplotách a přibližujeme se teplotě M_f . [3] [5]

Účelem kalení je zvýšení tvrdosti, pevnosti a odolnosti proti opotřebení. Vzhledem k tomu, že se v litinách nachází částice grafitu, není tvrdost u grafitických litin tak vysoká jako u ocelí. Výsledná tvrdost po martenzitickém kalení u LLG odpovídá přibližně 50 HRC, zatímco u LKG se pohybuje kolem 55 HRC. Důvodem je tvar grafitu, jeho rozložení a velikost. Litiny s lupínkovým grafitem mají kvůli lupínkovému tvaru grafitu náchylnost k popraskání. Materiál nejprve ohřejeme na kalící teplotu 30 až 50° nad teplotu A_1 , provedeme výdrž na této teplotě a následně ochladíme nadkritickou rychlostí. Čím rychleji materiál ochladíme, tím jemnější, a tedy i pevnější, strukturu dostaneme. Ohřev závisí na vsázce, tvaru materiálu a jeho složení. [3] [5] [8]

Velmi důležitá je volba kalícího prostředí, která ovlivňuje rychlost ochlazování, teplotu i výslednou strukturu materiálu. Pokud chceme získat martenzitickou strukturu, musí být rychlost ochlazování vyšší než rychlost kritická, tedy nadkritická. Pokud bude rychlost ochlazování pod M_s , dojde ke stabilizaci a nárůstu zbytkového austenitu, který způsobí nízkou tvrdost. Ovšem extrémně vysoká rychlost ochlazování je také nežádoucí, protože dochází k teplotním rozdílům povrchu a jádra, které by mohly vyvolat vnitřní pnutí a následnou deformaci kaleného dílu. Vhodné prostředí volíme dle chemického složení, tloušťky dílu a velikosti průměrů. [1] [3] [8]

Abychom ochladili materiál na teplotu, kdy začíná transformace martenzitu, používáme převážně tato kalící prostředí: voda, olej, vzduch, solná lázeň. Voda je nejrychlejší ochlazovací prostředí, to může vyvolávat zvýšení vnitřního pnutí

a následnou deformaci kaleného dílu. Olej se používá pro kalení součástí malých průměrů a s malou kritickou rychlostí. Vzduch je nejpomalejší kalící prostředí, a proto se vzduchem mohou ochlazovat pouze materiály s velmi malou kritickou rychlostí ochlazování. Solná lázeň se využívá k izotermickému kalení, kdy byl materiál dlouhou dobu ponechán na stejné teplotě, nebo k rovnoměrnému ohřevu tvarově složitých součástí. [4] [8]

Schopnost slitin železa a uhlíku dosáhnout martenzitické struktury se nazývá kalitelnost. Ta je dána chemickým složením materiálu. Rozlišujeme slitiny kalitelné a nekalitelné. Za nekalitelné slitiny považujeme ty, které mají příliš malé množství uhlíku, a tak by i po zakalení zůstaly měkké. Dále jsou to vysoce legované slitiny s feritickou nebo austenitickou strukturou. Přidáním legovacích prvků, především chromu a wolframu, jsou slitiny kalitelné i při nižším obsahu uhlíku. S kalitelností přímo souvisí i pojmy zakalitelnost a prokalitelnost. Zakalená struktura musí v jádře obsahovat alespoň 50 % martenzitu. Zakalitelnost nejvíce závisí na chemickém složení, velikosti zrna a homogenitě austenitu před kalením. Na povrchu dosahujeme maximální tvrdosti martenzitu, ta závisí na obsahu uhlíku a stanovuje maximální hodnotu zakalitelnosti, kterou jsme schopni dosáhnout. [3] [5] [9]

Prokalitelnost je schopnost materiálu docílit tvrdosti, jenž odpovídá její zakalenosti, tedy struktuře s 50 % martenzitu v určité hloubce pod povrchem. Vztah mezi skutečnou rychlostí ochlazování a kritickou rychlostí kalení udává hodnotu prokalitelnosti. Na prokalitelnost má určitě vliv obsah uhlíku, který s rostoucím podílem snadněji tvoří martenzit, ale souběžně narůstá i podíl A_z . Dále také velikost austenitického zrna a přidání legujících prvků, z nichž všechny vyjma kobaltu zvyšují prokalitelnost. Nejpoužívanější metodou pro určení prokalitelnosti je Jominiho čelní zkouška. Výsledkem této zkoušky je zjištění průběhu tvrdosti na vzdálenosti od ochlazovaného čela, tzv. křivka prokalitelnosti. Pro zápis hodnot se poté používá Jominiho index prokalitelnosti J . [1] [3] [5]

3.1. Martenzitické kalení

Martenzitické kalení, též označováno jako kalení neutrální, je tepelné zpracování, kterým se dosahuje vysoké pevnosti a tvrdosti materiálu. Proces martenzitického kalení zahrnuje austenitizaci, rychlé ochlazení a popuštění, cílem je získat popuštěný martenzit. Ochlazení se provádí ve studeném prostředí, nejčastější média jsou voda nebo olej. Pokud chceme snížit pravděpodobnost deformací a popraskání materiálu, je lepší zvolit termální kalení do teplé lázně. Další možná kalící média jsou solná lázeň či dusík pod vysokým tlakem. [10] [11]

Martenzit je přesycený tuhý roztok uhlíku v železe α . Vzniká při poměrně nízkých teplotách transformací austenitu. Je velmi tvrdý, ale zároveň křehký. S rostoucím obsahem uhlíku roste také jeho tvrdost. Má tvar nepravidelně širokých jehlic, jejichž velikost je dána velikostí austenitického zrna. Jehlice martenzitu svírají mezi sebou úhel 60° . [5] [8]

Mezi hlavní výhody patří vysoká úroveň tvrdosti a pevnosti. Díly mají ideální kombinaci vysoké pevnosti a houževnatosti. I přesto, že jsou odolné vůči opotřebení i vysoké teplotě, zachovávají si přijatelnou houževnatost. Další výhodou je jemnozrnná struktura, po broušení docílíme požadované obrobitelnosti. Martenzitické nerezové oceli dosahují v zakaleném stavu maximální korozní odolnosti. Za nevýhody považujeme vysoká vnitřní pnutí, hlavně po kalení do vody. Vnitřní pnutí mohou vést až k deformaci a prasknutí kalených předmětů. [3] [10] [12]

Použití a aplikace martenzitického kalení je určeno pro díly a nástroje, které jsou vystavené vysoké zátěži a teplotě. Jsou to například hnací hřídele, nosné tyče nebo matice a šrouby. Dále pružiny všech typů a velikostí nebo nástroje pro tváření ze tepla a za studena. Díly v odvětví, kde se vyžaduje vysoká korozní odolnost, takže medicína a potravinářství. [10]

3.2. Baitické kalení

Baitické kalení je takové tepelné zpracování, při kterém dochází ke zvýšení houževnatosti a pevnosti, dochází také ke snížení deformací. Po kalení dostáváme v materiálu baitickou strukturu, jenž tvoří nerovnovážná nelamelární směs feritu a cementitu. Nejprve dojde k rychlému ochlazení z oblasti austenitu na teplotu, která se nachází mezi perlitickou a martenzitickou přeměnou, kde dochází k baitické transformaci. Poté dostatečně dlouho vydržíme na dané teplotě a na závěr dochladíme na teplotu okolí. Teploty kalení se pohybují v rozmezí od 250 do 550 °C. Kalení probíhá nejčastěji v solné lázni, případně v oleji. Je zajímavé, že po kalení obvykle nedochází k popouštění tak, jak jsme na to zvyklí. Popouštět budeme jen v případě, když bychom získali tvrdší strukturu, než je požadováno. [10] [11] [13]

Baitit se svým tvarem jeví jako neuspořádané protáhlé útvary připomínající jehlice. Jsou širší než jehlice martenzitu a také spolu nesvírají úhel 60°. Martenzit je tvrdší a pevnější, baitit je ovšem výrazně houževnatější. Na světelném mikroskopu je baitická struktura tmavší než ta martenzitická. Baitit je složka vznikající ve velkém rozpětí teplot, proto rozeznáváme horní a dolní baitit, kdy se jako hraniční teplota uvádí 350 °C. Difúze uhlíku je zásadním dějem při růstu baititu. U horního baititu je důležitá difúze uhlíku v austenitu a u dolního je to difúze do feritu. [5] [11]

Za výhody této metody se uvádí zejména vyšší tažnost, houževnatost a odolnost proti rázům. Vyznačuje se nízkým tepelným namáháním a absorpcí dynamických zatížení. U tenkostěnných obrobků dochází ke snižování deformací.

Baitické kalení nachází velké uplatnění v automobilovém průmyslu. Vyrábí se díly, které vyžadují nadměrnou pružnost a houževnatost. Příkladem jsou válečková a kuličková ložiska. Dále se používá pro zhotovení tenkých dílů. [10] [12]

3.3. Povrchové kalení

Při povrchovém kalení se vytváří tvrdý povrch se zachováním houževnatého jádra. Kombinace těchto vlastností je velmi výhodná, neboť díly kalené touto metodou odolávají vysokému namáhání a mají zvýšené únavové vlastnosti. Dále dochází ke zvýšení tvrdosti povrchu a odolnosti proti opotřebení. Zároveň je využíváno setrvačnosti strukturních a fázových přeměn k získání specifických vlastností. Materiál rychle zahřejeme na teplotu, která překračuje horní kritickou teplotu až o 200 °C, toho dosáhneme díky již zmíněné setrvačnosti. Proběhne rychlá austenitizace, která zajistí jemné zrno, a tudíž i jemnější martenzitickou strukturu ve srovnání s objemovým kalením. Po ohřátí následuje výdrž na teplotě a rychlé ochlazení. Důležitým faktorem je výchozí struktura – jemnost a rozložení karbidů. Za nejvhodnější strukturu je považován sorbit či jemný lamelární perlit, proto by se měli součásti před povrchovým kalením zušlechťovat. To však vytváří pod povrchem vrstvu, jenž při cyklickém namáhání snižuje mez únavy. Z toho důvodu se součásti před povrchovým kalením normalizačně žihají. [11] [13] [14]

Zakalená vrstva má hloubku většinou 1 až 5 mm, podstatný je pozvolný přechod kalené vrstvy do jádra a stejnoměrnost tloušťky kalené vrstvy. Po povrchovém kalení přichází na řadu nízkoteplotní popouštění – do 200 °C, při kterém klesá měrný objem a dochází k redistribuci vnitřního napětí. Nejčastější použití je na výrobu hřídelí či ozubených kol, popřípadě dalších součástí podléhajících cyklickému namáhání a únavě. Jelikož potřebujeme dodat materiálu vysokou tepelnou energii za krátký čas, nejvíce se používá povrchové kalení laserem, indukci, plamenem nebo elektronovým svazkem. [11] [14]

3.3.1. Povrchové kalení plamenem

Tato metoda spočívá ve velmi rychlém zahřátí povrchu materiálu plamenem o vysoké teplotě. Jako zdroj tepla slouží plamen hořáku, ve kterém se spaluje kyslíkovo-acetylenový plyn. Jelikož se při povrchovém kalení aplikuje jen krátká výdrž na kalící teplotě, je nezbytné povrch materiálu ohřát na teplotu, která je vyšší než v případě základního kalení. Po zahřátí povrchu nad tuto horní kritickou teplotu se materiál uhasí a ochladí vodní sprchou. Chlazení zpevňuje povrch při zachování měkkého jádra, proto je výrobek dobře tvárný. Povrchové kalení plamenem dosahuje povrchové tvrdosti kolem 55-60 HRC a hloubka se pohybuje mezi 1,3 až 6,4 mm. Hloubka kalené plochy závisí na intenzitě plamenu, složení materiálu, délce zahřívání, typu součásti i na hasícím médiu. [8] [15] [16] [17]

Kalený povrch je tvrdý a odolný proti opotřebením, povrchovým kalením se zlepšuje jeho únavová pevnost. Mezi výhody patří i minimalizace provozních nákladů, snížení fází tepelného zpracování a tím i zkrácení doby zpracování. Plamen je na rozdíl od indukce schopný kalit ploché povrchy, proto nachází uplatnění při kalení desek a nožů. [15] [16]

Kalení plamenem je vhodné především pro rotační předměty a dlouhé tyče. Při rychlém otáčení součásti je povrch materiálu ohříván plamenem. Jakmile je dosaženo kalící teploty, ohřátou povrchovou vrstvou materiálu ochladíme vodní sprchou. V případě dlouhých a cylindrických dílů můžeme kalit protahováním přes plamen a kruhovou vodní sprchu. Ideálními součástmi pro povrchové kalení plamenem jsou hřídele, vodící tyče, čepy klikových hřídelů či kolejnice. [8] [16]

3.3.2. Indukční povrchové kalení

Tato metoda je využívána ke zlepšení mechanických vlastností – zvýšení povrchové tvrdosti a odolnosti proti opotřebení. Vzhledem k tomu, že nedochází k narušení mikrostruktury jádra, kalením prodloužíme únavovou životnost. Tvrdost povrchu se pohybuje mezi 56-65 HRC, záleží na obsahu uhlíku. Hloubka je přibližně mezi 0,8 až 3,1 mm. [10] [15] [18]

Kalená součást se vloží do měděné cívky, jenž je chlazená vodou. V cívce je pomocí střídavého proudu indukované magnetické pole, které způsobí zahřátí vnějšího povrchu materiálu nad jeho teplotu transformace. Výdrž na této teplotě probíhá tak dlouho, dokud nezískáme požadovanou hloubku, poté jsou díly okamžitě zakaleny. Frekvence použitého proudu má vliv na hloubku zakalené vrstvy. Se zvyšující se frekvencí proudu, klesá hloubka zakalené vrstvy na povrchu. Volba kalícího média záleží na požadované tvrdosti a typu materiálu. Nejčastěji se používá voda, případně olej. Na součást jsou buď namířeny trysky nebo se ochlazuje ponorem. Výchozí struktura transformuje na martenzit, který je výrazně tvrdší. Následkem kalení vznikají značná vnitřní pnutí, proto je nezbytné součásti neprodleně popustit na teplotu 150 až 200 °C po dobu 30 až 60 minut. [8] [15] [18]

Jak už bylo zmíněno mezi výhody patří vysoká povrchová tvrdost s měkkým jádrem, zvýšená mez únavy a dostatečná hloubka prokalení, jenž umožňuje namáhat kalené součásti vysokými zatíženími. Oblasti po svařování či obrábění vlivem indukčního kalení zůstávají měkké, a proto není nutné je maskovat. Nevýhodou této metody je vyšší pravděpodobnost popraskání, která je způsobená rychlým ohřevem a zakalením, přispívá k tomu také vytváření horkých míst na různých hranách jako jsou drážky a závity. Je třeba důkladně zvolit velikost a obrys cívky. Může se stát, že dané součásti nebude vyhovovat obvyklý kruhový tvar cívky, cena vlastní speciální cívky by byla astronomická. Indukční kalení se typicky používá pro hřídele, vřetena, ložiskové kroužky, ozubená kola, převodová kola či závitové trubky. [10] [15] [18]

3.3.3. Povrchové kalení laserem

Laserové kalení, které v poslední době získalo na oblíbenosti a pro firmy je čím dál používanější a preferovanější volbou tepelného zpracování, se skládá z rychlého ohřevu povrchové vrstvy, výdrže na dané teplotě a prudkého ochlazení. Paprsek laseru zahřívá povrch materiálu ve směru pohybu. Oblast, kterou paprsek zahřeje, se následně samovolně zakalí – sama se ochladí okolním materiálem, není nutné použití žádného chladícího média. Chlazení probíhá od jádra směrem k povrchu. Pokud chceme mít jistotu, že nenastane oxidace povrchu, lze při kalení použít ochrannou atmosféru. Rychlý ohřev společně s rychlým ochlazením zajistí jemnou strukturu a malé velikosti zrn, získáme tvrdý martenzit a zvýšíme tak tvrdost povrchové vrstvy, odolnost proti opotřebení, jádro zůstane houževnaté a předejdeme vnitřnímu pnutí. [19] [20] [21]

Touto metodou dokážeme zakalit pouze požadované plochy a konkrétní části dílů, zároveň v blízkém okolí zakalené plochy dochází k minimálnímu tepelnému ovlivnění. Vhodnými materiály jsou nástrojové oceli, středně uhlíkové oceli a litiny. Oceli mají nejčastěji obsah uhlíku v rozmezí 0,4 až 0,5 %, nesmí však mít méně než 0,2 %. Abychom dosáhli požadovaného výkonu, je důležité správně zvolit některé parametry – výkon laseru, tvar a průměr paprsku, rychlost snímání, rychlost pohybu laserového paprsku a vzdálenost rozostření. Musíme také myslet na tloušťku stěny materiálu. Většinou se uvádí, že by měla mít desetinásobek tloušťky kalené vrstvy. U nedostatečné tloušťky součásti se povrch ochladí kapalným médiem nebo na vzduchu. Zakalená vrstva většinou dosahuje hloubky od 0,1 do 1,5 mm, ale je možné dosáhnout až 2 mm. [19] [21] [22]

Mezi nejvýznamnější výhody laserového kalení patří absence kalících médií, vytvrzený povrch se získá samovolným zakalením materiálu. Výsledné obrobky tak nepotřebují žádné, nebo stačí pouze minimální očištění či konečné broušení. Lze kalit pouze oblasti materiálu, které jsou při používání namáhané. Tím, že horký povrch součásti není zprudka ochlazován chladící kapalinou, jako je tomu při kalení plamenem nebo indukci, nedochází v materiálu k velkým vnitřním pnutím, které často vedou k trhlinám a popraskání. Další výhodou je úspora energie, laser je ve srovnání s klasickými metodami povrchového kalení znatelně úspornější.

Tato metoda zároveň vyniká svou ekologičností, životností a efektivitou. V neposlední řadě je to snadná automatizace procesu a dosažení jemnější struktury martenzitu, tvrdost zakalené vrstvy může být až o 100 HV vyšší než u ostatních metod, tedy až 68 HRC. [19] [20] [23] [24]

Pokud se budeme bavit o nevýhodách této metody, kterých moc není, a právě proto se laserové kalení opravdu hojně využívá, jsou to například vysoké investiční náklady do zařízení. Nutná je ochrana proti záření a také příprava povrchu, neboť laserové světlo se v kovech špatně pohlcuje. Jsou zapotřebí vysoce kvalifikovaní operátoři, kteří by měli mít rozsáhlé znalosti tepelného zpracování a zkušenosti s manipulací s laserovou technologií. [21] [23]

Využití laserového kalení je jak v malosériové, tak i ve velkosériové výrobě. Uplatňuje se v leteckém, automobilovém i strojním průmyslu. Konkrétní použití je pro tvarově složité lící a lisovací formy, pístní kroužky, ložisková pouzdra, lopatky turbín nebo ozubená kola, v jejichž výrobě společně s hřídelemi nahrazuje laser indukční kalení. Dále se tato technologie využívá pro kalení náběžných hran turbínových lopatek a ventilů spalovacích motorů. [19] [20]

Tabulka 1 Porovnání metod povrchového kalení

	Plamen	Indukce	Laser
Tvrdost [HRC]	55-60	56-65	až 68
Hloubka [mm]	1,3-6,4	0,8-3,1	0,1-2

3.4. Laserové povrchové kalení litin

Při laserovém povrchovém kalení litin je cílem tepelného zpracování dosažení teplot nad bodem kritické transformace – austenitizační teplota. Následně dochází k rychlému procesu samozakalení okolním neovlivněným materiálem. Mezi komponenty kalené laserem patří vysoce namáhané strojní součásti, jsou to ozubená kola, vačkové hřídele, skříně převodovky, výfukové ventily či vložky válců. Laser se nejvíce používá v automobilovém průmyslu. [25]

Jedná se o přesný a vysoce lokalizovaný proces pro získání tvrdší a odolnější mikrostruktury. Nehledě na počáteční mikrostrukturu litiny, klíčovým parametrem je lineární energie, která zohledňuje společný účinek těchto parametrů: výkon laseru, rychlost skenování a tloušťka absorpční vrstvy. Pro kalení litin se nejvíce používají tyto lasery: Nd:YAG laser, diodový laser a CO₂ laser. Použití prvních dvou zmíněných umožňuje vyšší koeficienty absorpce vyzařované energie než při použití běžného CO₂ laseru, u kterého je navíc ke zvýšení absorptivity potřeba nanášet tenké povlaky na základní materiál. Další výhodou Nd:YAG laseru je, že generovanou energii lze převést přes optický kabel na pracoviště. [25] [26]

Pokud je laserové tepelné zpracování požadováno pro velké plochy, používá se metoda překrývání. Tato metoda má však za následek nepříznivý účinek popouštění a nepravidelnou tvrdost povrchu, tj. změkčení v překrývajících se průchodech. Po studii [27] se dospělo k závěru, že optimální mezera mezi laserovými paprsky je 2 mm. Proběhly výzkumy [28] [29], které zjišťovaly vliv překrývání na výslednou tvrdost materiálu. Povrchové kalení Nd:YAG laserem LLG zvýšilo tvrdost z asi 300 na 800-950 HV_{0,1} v tepelně ovlivněné zóně. V překrývajících se zónách nastal popouštěcí efekt, kdy tvrdost klesla na 470 HV_{0,1}, i tehdy byla splněna minimální tvrdost 450 HV_{0,1} pro pístitní kroužky. Jiná studie [29] došla k podobným výsledkům, kdy v nepřekrývajících se oblastí došlo k popouštění, jenž snížilo tvrdost na 300-400 HV_{0,3}, zatímco v překrývajících se oblastí došlo k popouštění, jenž snížilo tvrdost na 300-400 HV_{0,3}. V případě Gaussova laseru se překrývání používá a tento nežádoucí efekt je tedy nevyhnutelný. [25] [26]

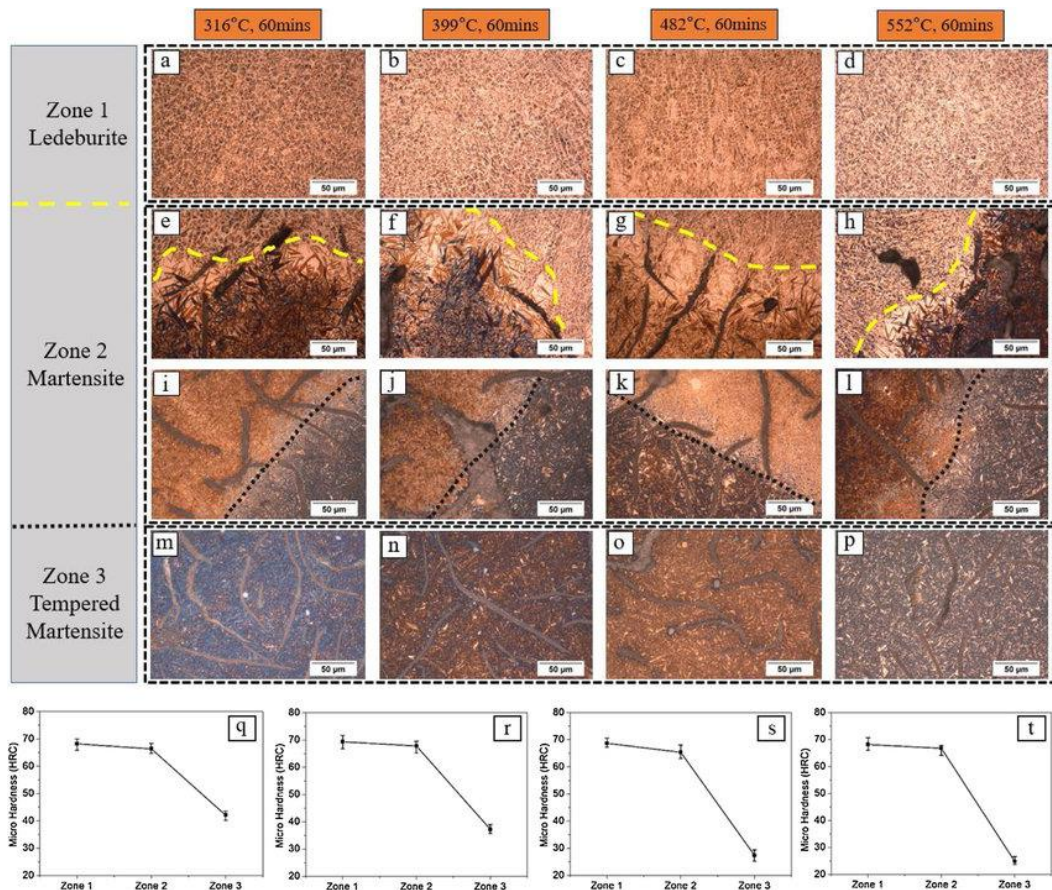
Laserové povrchové kalení výrazně zlepšuje mechanické vlastnosti litin, a proto se toto tepelné zpracování hojně využívá. Byly provedeny výzkumy [30] [31] [32], ve kterých se zkoušejí různé druhy litin a vliv laserového kalení na jejich strukturu a vlastnosti. Cílem výzkumů pro časopisy Applied Sciences [30] a Journal of Materials Research and Technology [31] [32] byly účinky laserového povrchového kalení na vlastnosti opotřebené litiny s lupínkovým grafitem.

Povrchy vzorků s tímto chemickým složením (Tab.2) byly broušeny a leštěny. Byl použit kontinuální vlnový Nd:YAG laser s vlnovou délkou 1064 nanometrů a rychlost skenování byla 2 mm/s. Absorpční schopnost byla zlepšena aplikací grafitového povlaku. Aby nedošlo ke zhoršení tvrdosti a odolnosti proti opotřebení povrchu v důsledku překrývajících se drah, dodržovala se vzdálenost 1-2 mm mezi sousedními drahami.

Tabulka 2 Chemické složení zkoušené LLG [%] [31]

C	Si	Cu	Mn	Cr	P	S	Fe
3,53	2,71	0,94	0,74	0,12	0,08	0,03	zbytek

Pod povrchem vzorků kalených laserem byly pozorovány 3 zóny (Obr. 7). První zóna byla laserem kalená plocha obsahující ledeburit s tvrdostí přibližně 68 HRC. Druhá zóna byla tepelně ovlivněná oblast obsahující martenzit s tvrdostí přibližně 66 HRC. Třetí zóna byl základní materiál obsahující popuštěný martenzit, tvrdost materiálu klesla ze 42,1 na 24,8 HRC se zvyšujícími se popouštěcími teplotami (z 316 °C na 552 °C). Je to v důsledku rozkladu martenzitu a růstu cementitických částí.



Obrázek 7 Mikrostruktura a mikrotvrdość laserem kalené litiny s různými popouštěcími teplotami [31]

(a-d) první zóna – ledeburit

(e-h) přechod mezi první a druhou zónou (ledeburitem a martenzitem)

(i-l) přechod mezi druhou a třetí zónou (martenzitem a základním materiálem)

(m-p) třetí zóna – základní materiál obsahující popuštěný martenzit

(q-t) mikrotvrdość materiálu pro dané popouštěcí teploty

Opotřebené oblasti v laserem kalené zóně jsou pod vytvrzením zcela hladké. V oblastech základního materiálu však vznikají významné trhliny, které se nacházejí kolem špičatých částí grafitu v důsledku vysoké koncentrace napětí. V případě laserem kalené zóny byl grafit rozpuštěn během procesu kalení a ledeburitická struktura s martenzitickou strukturou, které mají vysokou tvrdost, poskytují větší ochranu proti lomu. [30] [31] [32]

U povrchového kalení laserem tvárné litiny, kterou zkoumali a testovali vědci z SAE International [33]. Ke zkoušení použili kontinuální vlnový vláknový laser s vlnovou délkou 1070 nanometrů. Před samotným laserovým kalením se povrch vzorků s tímto chemickým složením (Tab. 3) frézoval za účelem snížení odrazivosti a zlepšení vstřebávání laserového paprsku. Pro zpevnění povrchu vzorku byl použit maximální výkon 400 W.

Tabulka 3 Chemické složení zkoušené tvárné litiny [%] [33]

C	Si	Mn	S	P	Fe
3,353	2,337	0,3	0,012	0,021	zbytek

Výsledná měření dosahovala hodnot tvrdostí v rozsahu 750–850 HV v horní roztavené zóně, s rostoucí hloubkou tvrdost klesala. Maximální roztavená hloubka pro použité laserové zpracování byla 0,478 mm a maximální tvrdost se pohybovala v rozmezí 800-900 HV. [33]

Jiný výzkum tvárné litiny s odlišnými parametry a chemickým složením (Tab. 4) provedli vědci pro deník Optik [34]. Byl použit vláknový laser YFL-600 s maximálním výkonem 600 W a vlnovou délkou 1080 nanometrů. Cílem této studie je také další rozvoj konceptu efektivity procesu aplikovaného na laserové transformační kalení. Proces čištění před laserovým transformačním kalením zahrnoval broušení, leštění a leptání mikrostruktury Nitalem.

Tabulka 4 Chemické složení zkoušené tvárné litiny [%] [34]

C	Cr	Ni	Cu	Mn	Si	P _{max}	Fe
3,4	0,1	0,7	0,8	0,35	2,3	0,05	zbytek

Bylo dosaženo tvrdosti 1020 HV s hloubkou 0,80 mm. Pro dosažení nejlepších výsledků by neměly být grafitové částice v mikrostruktuře při procesu kalení zcela rozpuštěny. Jednotnost tvrdosti dosažená při 50% překrývání laserových stop byla lepší než při 20% překrývání. Je to dáno tím, že reustenizace a následné opětovné zpevnění nebo popuštění má za následek homogennější mikrostrukturu. [34]

Proběhly 2 výzkumy [35] [36], ve kterých byly zkoušeny speciální litiny laserovým povrchovým kalením. Ten první byl vydán časopisem Metals [35] a zabývá se cementitickou litinou, která je legovaná niklem a chromem (Tab. 5). Tyto litiny jsou známé vysokou tvrdostí a skvělou odolností proti opotřebení. Nejvíce využívané jsou v těžebním průmyslu a při zpracování nerostů – kladiva, drtiče či rozměňovací válce.

Tabulka 5 Chemické složení cementitické litiny [%] [35]

C	Si	Mn	Ni	Cr
3,1	0,7	0,77	4	2,44

Pro kalení se použil Nd:YAG laser s vlnovou délkou 1064 nanometrů. Před laserovým kalením se vzorky obrobily a povrch se očistil acetonem. Vzorky byly austenitizovány při 800 °C po dobu 8 hodin a následně chlazeny uvnitř pece. Pro zlepšení houževnatosti nárazu bylo provedeno temperování vzorků.

Z měření vyplývá, že tvrzená hloubka je přímo úměrná hodnotám vstupu laserového tepla. Nejmělkší tvrzená zóna měla 25 mikrometrů a nejhlubší 500 mikrometrů, tomu odpovídá tepelný příkon 6 a 17 J/mm². Po laserovém kalení došlo k výraznému zvýšení mikrotvrdosti z 580 HV na 1455 HV. [35]

Druhý článek byl vydán v Journal of Materials research and Technology [36] a zabývá se povrchovým laserovým kalením litiny s vysokým obsahem chromu (Tab. 6). Účelem je získání lepších mikrostrukturních a mechanických vlastností. Vzorek byl nejprve obroben, vyleštěn a následně ultrazvukově vyčištěn alkoholem. K jednorůchodovému testu byl použit axiální rychloprůtokový průmyslový CO₂ laser NEL-2500 A.

Tabulka 6 Chemické složení litiny s vysokým obsahem chromu [%] [36]

C	Cr	Mn	Si	S	P	Re	Fe
2,0-2,7	16-19	0,5-1,1	0,4-0,6	≤0,03	≤0,03	≤0,15	zbytek

Měření ukázalo, že se po laserovém kalení zlepšila tvrdost, která rostla se zvýšením výkonu laseru a snížením rychlosti snímání. Největší tvrdost 885,7 HV byla naměřena při výkonu laseru 850 W a rychlosti 4 mm/s, ale povrch vzorku byl roztaven a došlo ke zjevným závadám. Nejlepší zesilující účinek na mikrotvrdost byl tedy stanoven pro výkon 880 W a rychlost 8 mm/s, kdy byla naměřena hodnota 787,54 HV.

4 Experimentální část

Experimentální část se zabývá povrchovým laserovým kalením litiny s kuličkovým grafitem. Cílem bylo vyhodnocení mikrostruktury a makrostruktury zkušební vzorku, který byl zakalen pěti průjezdy stejného laseru s různými parametry. Následně byla na všech průjezdech provedena zkouška tvrdosti dle Vickerse.

4.1. Použitý materiál a příprava metalografického vzorku

Pro tuto práci byla použita grafitická litina s kuličkovým grafitem legovaná NiCu s chemickým složením (Tab. 7).

Tabulka 7 Chemické složení zkoušené NiCu litiny [%]

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mg	Mo
3,48	2,68	0,12	0,04	0,008	0,94	1,95	0,06	0,033

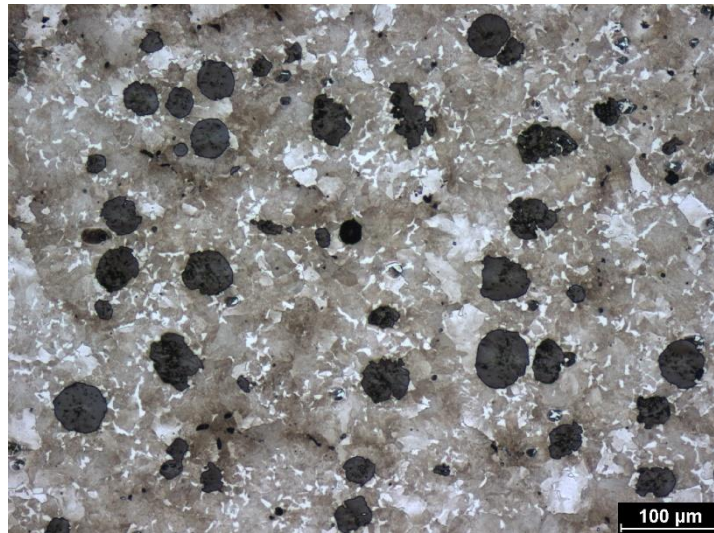
Vzorek byl nejprve rozříznut na metalografické pile. Do místa řezu neustále dopadá chladicí kapalina, tím je zamezeno tepelnému ovlivnění struktury materiálu. Následně byl vzorek zalisován do pryskyřice. Zalisovaný vzorek byl poté broušen na metalografické brusce brusnými papíry (s drsností P60 – P2400) za mokra a posléze leštěn diamantovou suspenzí (3 mikrony) a koloidní SiO₂. Takto připravený vzorek byl naleptán 2 % nitalem (98 % ethanol + 2 % HNO₃) a zdokumentován pro vyhodnocení mikrostruktury, makrostruktury a tvrdosti.

Použitá zařízení: metalografická pila LECO MSX 255, metalografická bruska/leštička LECO GPX 300, metalografický mikroskop Neophot 32 vybavený CCD kamerou, automatický tvrdoměr Struers Duramin 40AC3.

Měření tvrdosti bylo provedeno pomocí tvrdoměru, dle Vickerse. Na monitoru byla v jednotlivých průjezdech nejprve nalezena zakalená vrstva, následovalo zvolení správného zvětšení, zaostření obrazu a byla nastavena základní poloha pro provedení vpichů. V každém průjezdu bylo provedeno 120 vtisků se zatěžující silou 0,1 kg.

Z naměřených hodnot byly sestaveny grafy, které znázorňují průběh mikrotvrdomosti hodnocené litiny.

Dále byla dokumentována mikrostruktura v oblasti neovlivněné kalením (Obr. 8) a (Obr. 9). Mikrostruktura jádra NiCu litiny je tvořena směsí perlitu a malého množství feritu.



Obrázek 8 Mikrostruktura jádra NiCu litiny, zvětšeno 100x

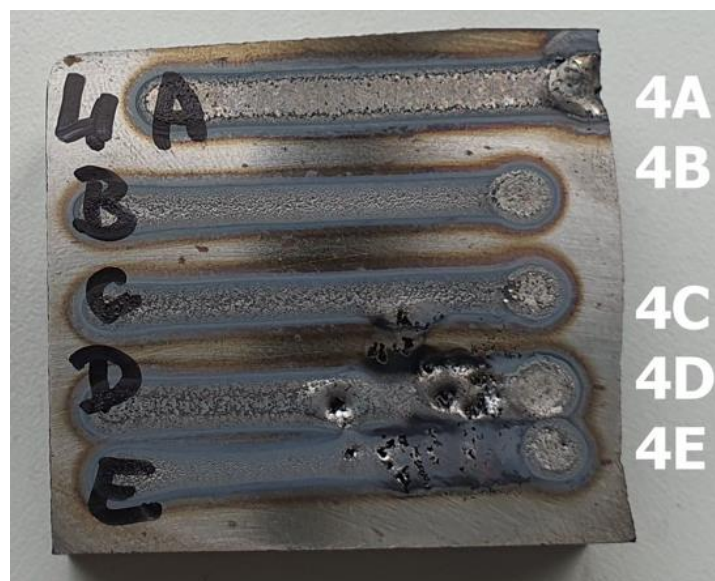


Obrázek 9 Mikrostruktura jádra NiCu litiny, zvětšeno 400x

4.2. Parametry laseru

K povrchovému kalení byl použit laser TruDisk 4006 s nastavitelným rozsahem výkonu 80 W až 4000 W. Výkonová stálost při jmenovitém výkonu $\pm 1 \%$ při aktivované regulaci výkonu. Minimální průměr optického kabelu 600 μm . TruDisk je vysoce výkonný pevnolátkový diskový laser s vlnovou délkou 1030 nanometrů od společnosti Trumpf.

Tímto laserem bylo na zkušební vzorku, NiCu litině, provedeno pět průjezdů (Obr. 10) s následujícími parametry (Tab. 8).



Obrázek 10 Zkušební vzorek

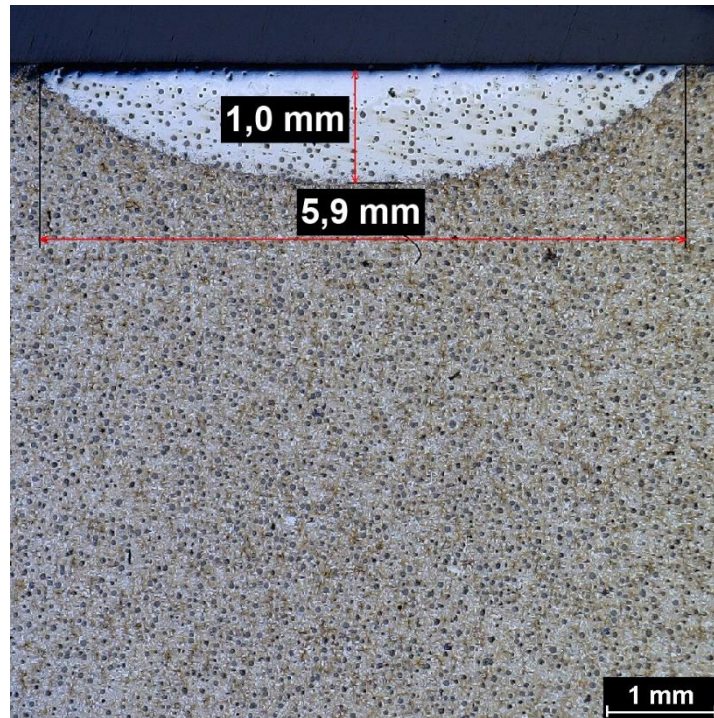
Tabulka 8 Parametry laseru TruDisk 4006

Stopa	Výkon laseru [W]	Rychlost pohybu paprsku [mm/s]	Fokusační vzdálenost [mm]
A	1500	10	130
B	1000	20	130
C	1000	10	130
D	1200	10	130
E	1200	20	130

4.3. Metalografie a měření tvrdosti

4.3.1. NiCu litina – průřez A

Vyhodnocením makrostruktury (Obr. 11) získáme rozměry zakalené vrstvy. Hloubka zakalené vrstvy je 1 mm a šířka zakalené vrstvy je 5,9 mm.



Obrázek 11 Makrostruktura NiCu litiny v průřezu A

Vyhodnocením mikrostruktury (Obr. 12) a (Obr. 13) pozorujeme zakalenou vrstvu NiCu litiny, kterou tvoří martenzit a zbytkový austenit, s převažující složkou martenzitu.

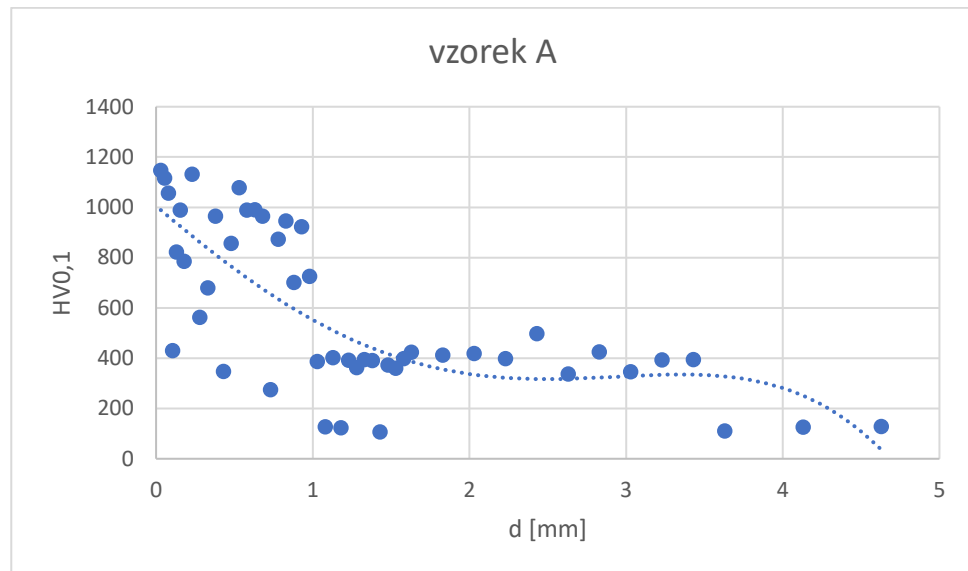


Obrázek 12 Mikrostruktura NiCu litiny v průřezu A, zvětšeno 100x



Obrázek 13 Mikrostruktura NiCu litiny v průřezu A, zvětšeno 400x

Na závěr byla měřena tvrdost dle Vickerse HV0,1 – se zatížením 0,98 N. Měření probíhalo směrem od povrchu k jádru a bylo provedeno 120 vtisků. Z naměřených hodnot tvrdosti byl sestrojen graf (Obr. 14).

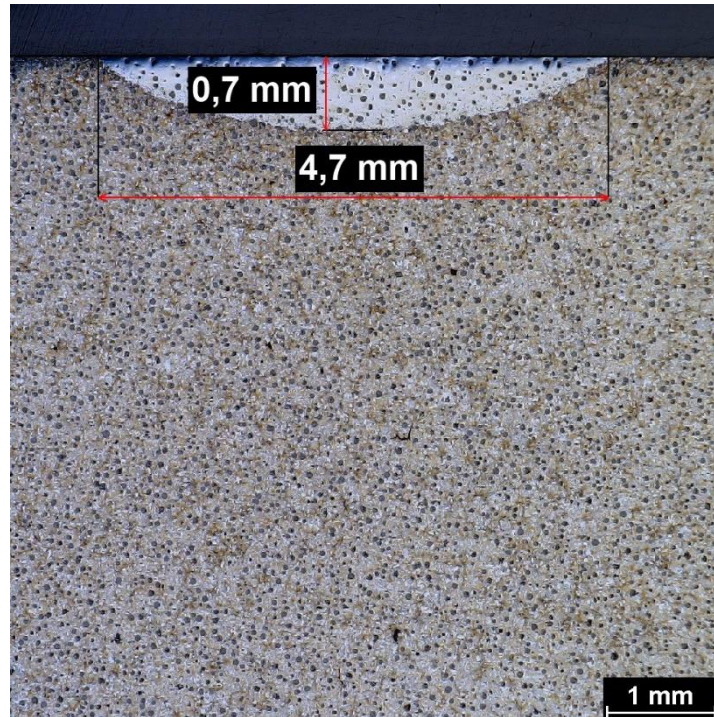


Obrázek 14 Tvrdost NiCu litiny v průřezu A

Z grafu je patrné, že nejvyšší hodnoty byly naměřeny blízko povrchu a dosahují tvrdosti i přes 1000 HV0,1. V zakalené části materiálu je tak potvrzena přítomnost martenzitu. Ve vzdálenosti 1 mm od povrchu litiny dochází k největšímu poklesu tvrdosti – přechod tvrdé zakalené vrstvy na strukturu jádra.

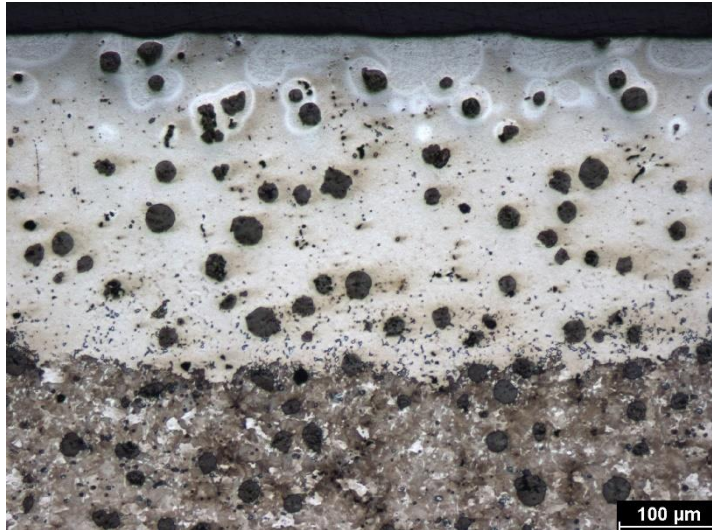
4.3.2. NiCu litina – průřez B

Vyhodnocením makrostruktury (Obr. 15) získáme rozměry zakalené vrstvy. Hloubka zakalené vrstvy je 0,7 mm a šířka zakalené vrstvy je 4,7 mm.

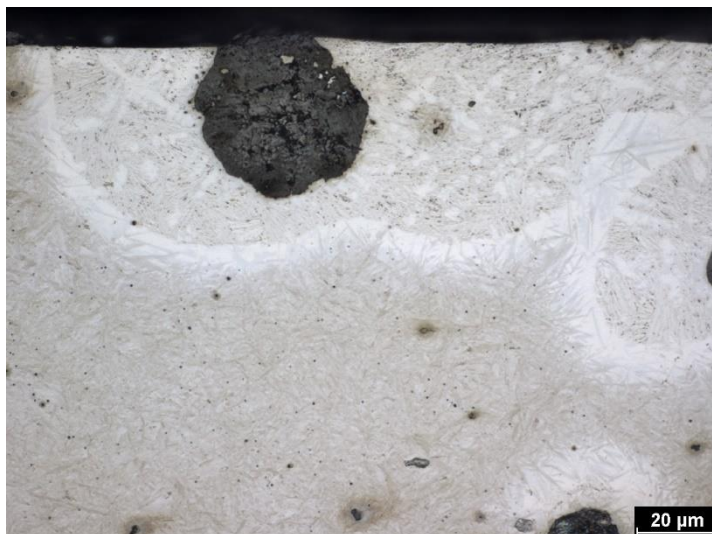


Obrázek 15 Makrostruktura NiCu litiny v průřezu B

Z obrázků mikrostruktury NiCu litiny (Obr. 16) a (Obr. 17) je patrný ostřejší přechod mezi zakalenou vrstvou a jádrem. Zakalená vrstva je tvořena martenzitem a zbytkovým austenitem, jádro je tvořeno perliticko – feritickou strukturou s převažující složkou perlitu.

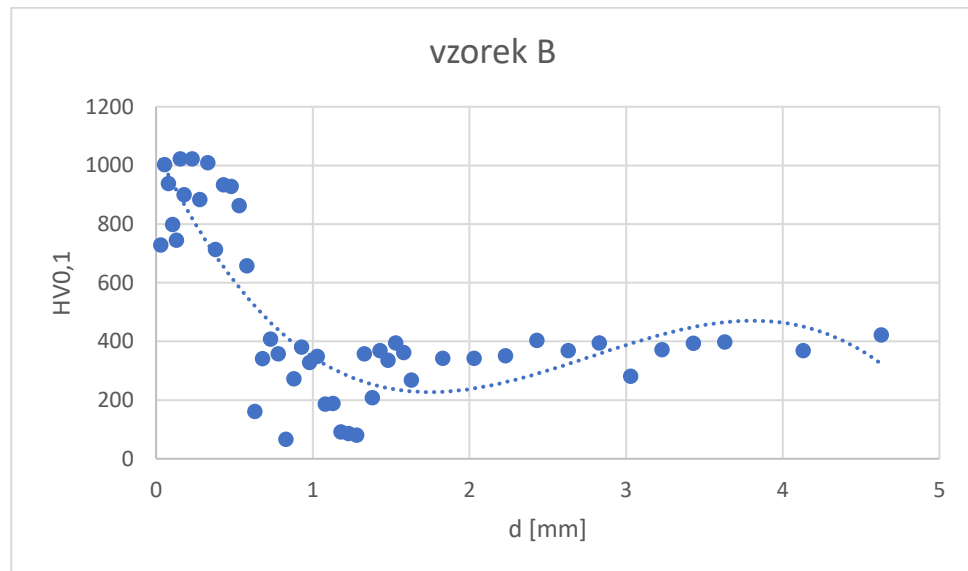


Obrázek 16 Mikrostruktura NiCu litiny v průřezu B, zvětšeno 100x



Obrázek 17 Mikrostruktura NiCu litiny v průřezu B, zvětšeno 400x

Na závěr byla měřena tvrdost dle Vickerse HV0,1 – se zatížením 0,98 N. Měření probíhalo směrem od povrchu k jádru a bylo provedeno 120 vtisků. Z naměřených hodnot tvrdosti byl sestrojen graf (Obr. 18).

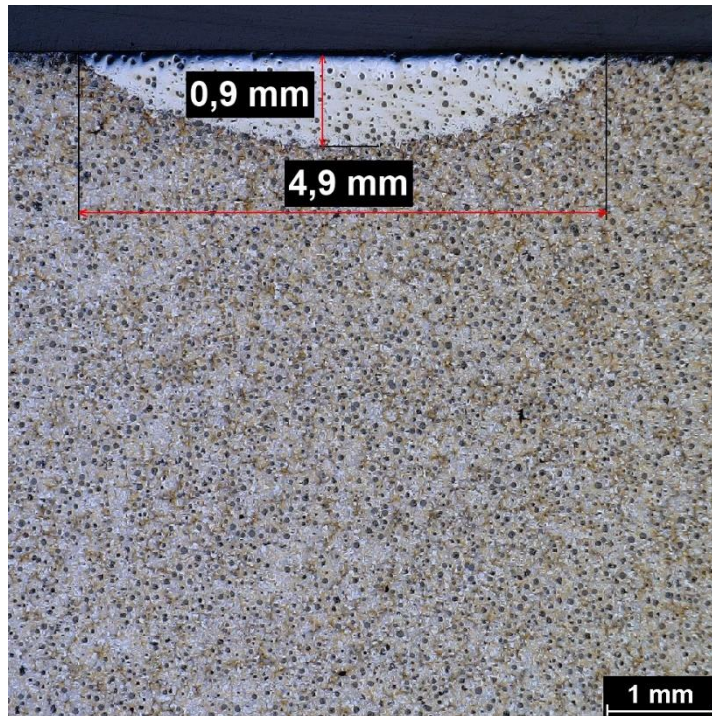


Obrázek 18 Tvrdost NiCu litiny v průřezu B

Z grafu je viditelné, že hodnoty blízko povrchu dosahují tvrdosti okolo 1000 HV0,1. Měření mikrotvrdosti potvrzuje přítomnost martenzitické struktury v zakalené části materiálu. Z grafu je dále patrný pokles tvrdosti ve vzdálenosti 0,7 mm od povrchu litiny. To je hloubka, kdy materiál přechází z tvrdé zakalené vrstvy na strukturu jádra, která dosahuje hodnot okolo 400 HV0,1.

4.3.3. NiCu litina – průřez C

Vyhodnocením makrostruktury (Obr. 19) získáme rozměry zakalené vrstvy. Hloubka zakalené vrstvy je 0,9 mm a šířka zakalené vrstvy je 4,9 mm.



Obrázek 19 Makrostruktura NiCu litiny v průřezu C

Z obrázků mikrostruktury (Obr. 20) a (Obr. 21) je částečně vidět přechod mezi zakalenou vrstvou NiCu litiny, jenž je tvořená martenzitem a zbytkovým austenitem a jádrem této litiny, které tvoří perliticko – feritická struktura s převážující složkou perlitu.

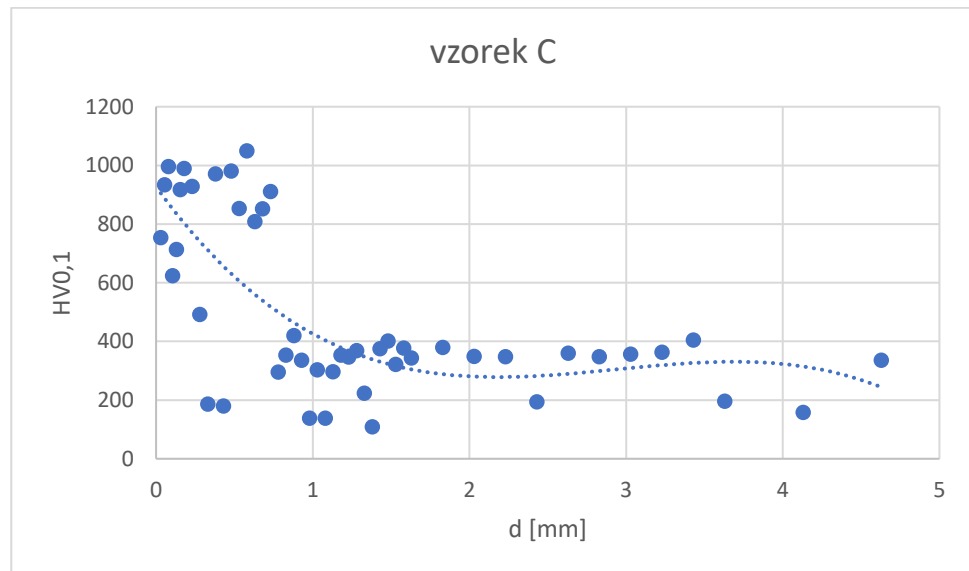


Obrázek 20 Mikrostruktura NiCu litiny v průřezu C, zvětšeno 100x



Obrázek 21 Mikrostruktura NiCu litiny v průřezu C, zvětšeno 400x

Na závěr byla měřena tvrdost dle Vickerse HV0,1 – se zatížením 0,98 N. Měření probíhalo směrem od povrchu k jádru a bylo provedeno 120 vtisků. Z naměřených hodnot tvrdosti byl sestrojen graf (Obr. 22).

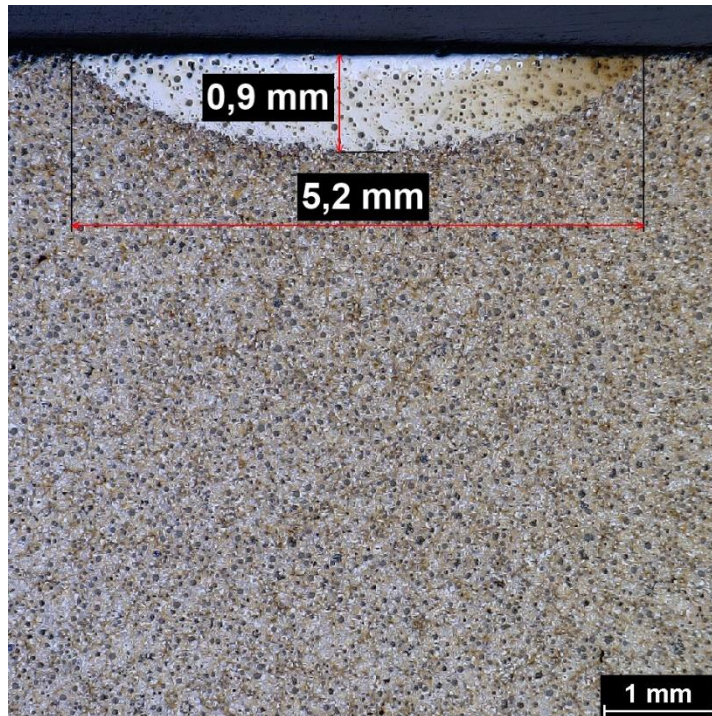


Obrázek 22 Tvrdost NiCu litiny v průřezu C

Z grafu je zřejmé, že k největšímu poklesu tvrdosti dochází ve vzdálenosti 0,9 mm od povrchu litiny. V tomto místě nastává přechod tvrdé zakalené vrstvy (hodnoty tvrdosti přibližně 1000 HV0,1) na strukturu jádra (hodnoty tvrdosti se pohybují kolem 400 HV0,1). Existence martenzitu v zakalené části materiálu je potvrzena měřením mikrotvrdosti.

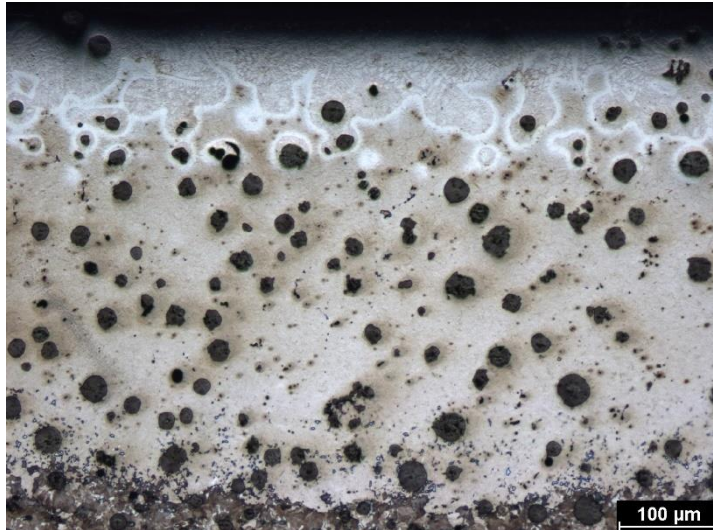
4.3.4. NiCu litina – průřez D

Vyhodnocením makrostruktury (Obr. 23) získáme rozměry zakalené vrstvy. Hloubka zakalené vrstvy je 0,9 mm a šířka zakalené vrstvy je 5,2 mm.



Obrázek 23 Makrostruktura NiCu litiny v průřezu D

Vyhodnocením mikrostruktury (Obr. 24) a (Obr. 25) pozorujeme zakalenou vrstvu NiCu litiny, kterou tvoří martenzit a zbytkový austenit. Z obrázků je částečně vidět přechod mezi zakalenou vrstvou a jádrem, jenž je tvořeno perliticko – feritickou strukturou s převažující složkou perlitu.

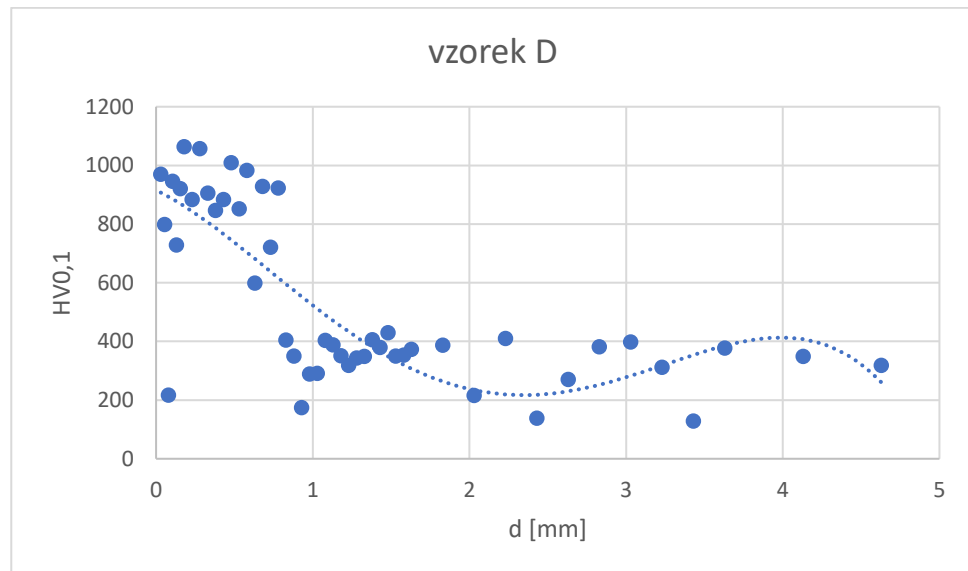


Obrázek 24 Mikrostruktura NiCu litiny v průjezdu D, zvětšeno 100x



Obrázek 25 Mikrostruktura NiCu litiny v průjezdu D, zvětšeno 400x

Na závěr byla měřena tvrdost dle Vickerse HV0,1 – se zatížením 0,98 N. Měření probíhalo směrem od povrchu k jádru a bylo provedeno 120 vtisků. Z naměřených hodnot tvrdosti byl sestrojen graf (Obr. 26).

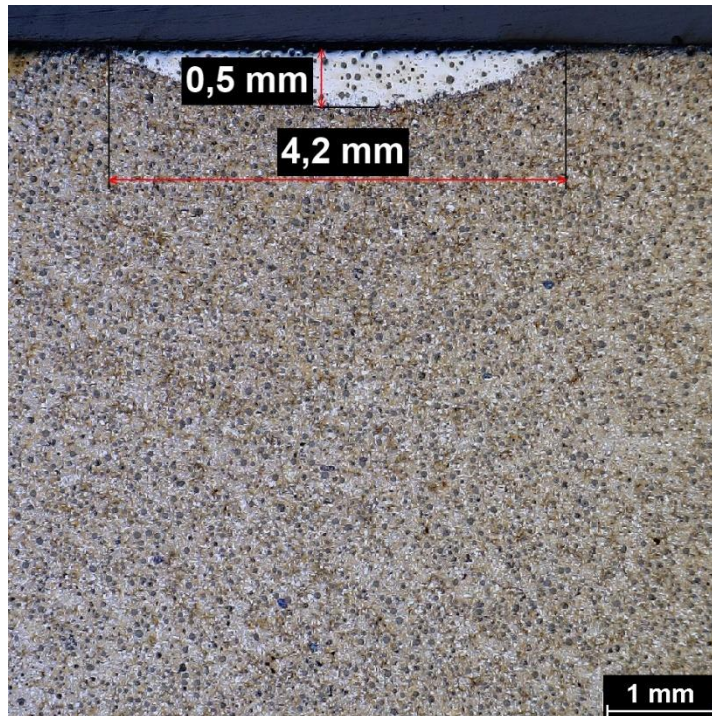


Obrázek 26 Tvrdost NiCu litiny v průjezdu D

Z grafu je patrné, že při měření došlo k výraznému poklesu tvrdosti, a to ve vzdálenosti 0,9 mm od povrchu litiny. To je způsobeno přechodem tvrdé zakalené vrstvy na strukturu jádra. Při měření mikrotvrdosti byla dále potvrzena přítomnost martenzitické struktury v zakalené části materiálu, kdy se hodnoty blížili 1000 HV0,1.

4.3.5. NiCu litina – průřez E

Vyhodnocením makrostruktury (Obr. 27) získáme rozměry zakalené vrstvy. Hloubka zakalené vrstvy je 0,5 mm a šířka zakalené vrstvy je 4,2 mm.



Obrázek 27 Makrostruktura NiCu litiny v průřezu E

Z obrázků mikrostruktury NiCu litiny (Obr. 28) a (Obr. 29) je vidět ostřejší přechod mezi zakalenou vrstvou, kterou tvoří martenzit a zbytkový austenit, a jádrem, které je tvořeno perliticko – feritickou strukturou s převážujícím perlitem.

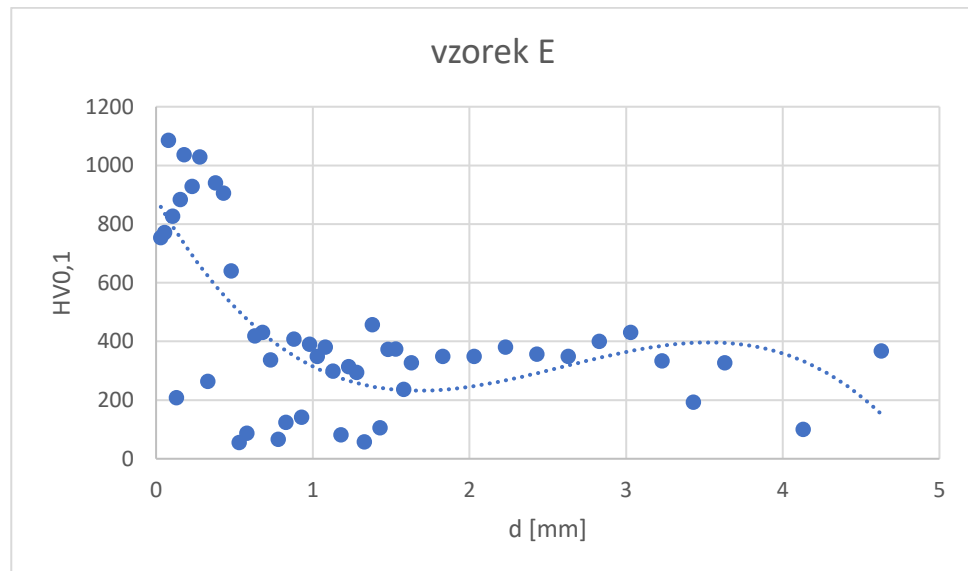


Obrázek 28 Mikrostruktura NiCu litiny v průřezu E, zvětšeno 100x



Obrázek 29 Mikrostruktura NiCu litiny v průřezu E, zvětšeno 400x

Na závěr byla měřena tvrdost dle Vickerse HV0,1 – se zatížením 0,98 N. Měření probíhalo směrem od povrchu k jádru a bylo provedeno 120 vtisků. Z naměřených hodnot tvrdosti byl sestrojen graf (Obr. 30).



Obrázek 30 Tvrdost NiCu litiny v průřezu E

Z grafu je zřejmé, že ve vzdálenosti 0,5 mm od povrchu litiny dochází k největšímu poklesu tvrdosti. Je to důsledek přechodu tvrdé zakalené vrstvy na strukturu jádra. Měření mikrotvrdosti se zároveň potvrdila existence martenzitické struktury v zakalené části materiálu. Tvrdost jádra se pohybuje okolo 400 HV0,1.

5 Diskuse

Největších tvrdostí zakalené vrstvy jsme dosahovali v průjezdu A, a to až 1147 HV_{0,1}. Největší hloubka zakalené vrstvy byla v průjezdu A (1 mm), naopak nejmenší hloubka zakalené vrstvy byla v průjezdu E (0,5 mm). Stejně tak tomu odpovídala i šířka zakalené vrstvy, v průjezdu A byla šířka 5,9 mm a v průjezdu E byla šířka 4,2 mm. Nejlepších výsledků jsme dosahovali v průjezdu A, ve kterém byl použit laser s výkonem 1500 W a rychlostí pohybu paprsku 10 mm/s. V průjezdech B a C byl použit stejný výkon laseru (1000 W), ale rozdílná rychlost pohybu paprsku (20 mm/s a 10 mm/s). Výsledná zakalená vrstva je hlubší i širší v průjezdu C, tedy s nižší rychlostí pohybu paprsku. Stejně je to i při srovnání průjezdů D a E, kdy byl použit výkon laseru 1200 W. Hlubší a širší zakalená vrstva je opět při použití nižší rychlosti pohybu paprsků (průjezd D). A jelikož je hloubka i šířka zakalené vrstvy větší v průjezdu C (1000 W a 10 mm/s) než v průjezdu E (1200 W a 20 mm/s), lze říci, že na výsledné rozměry zakalené vrstvy má největší vliv rychlost pohybu paprsku a následně až výkon laseru.

V porovnání s výzkumem tvárné litiny pro deník Optik [34], jejíž parametry se nejvíce blížili naší zkoumané litině (průjezd B), jsme dosahovali téměř identické tvrdosti – 1020 HV u litiny zkoumané vědci z deníku Optik a 1022 HV u naší NiCu litiny. Hloubka zakalené vrstvy se lišila o 0,1 mm (0,8 mm a 0,7 mm). Oproti uvedené literatuře v této práci byly pro zakalení NiCu litiny použity odlišné laserové parametry, mnohem vyšší výkon laseru (až 1500 W) a rychlost pohybu paprsku (10 mm/s a 20 mm/s). Zároveň jsme dosahovali i vyšších tvrdostí zakalené vrstvy, to je způsobeno převážně legujícími prvky Ni a Cu, které se v ostatních zkoušených litinách nevyskytovaly.

6 Závěr

V této bakalářské práci byla provedena literární rešerše o litině s kuličkovým grafitem a možnostech jejího povrchového kalení, zejména povrchového kalení laserem.

Experiment byl proveden na NiCu litině pevnolátkovým diskovým laserem od společnosti Trumpf. Na litině bylo zakaleno 5 průjezdů s odlišnými laserovými parametry. V každém průjezdu byla posouzena a vyhodnocena metalografie zakalených struktur a jádra. Výsledky povrchového kalení byly následně posouzeny na základě měření mikrotvrdomosti dle Vickerse. Ve všech pěti případech tvrdost přesahovala 1000 HV_{0,1} a přechodem ze zakalené vrstvy na strukturu jádra klesla tvrdost na hodnotu pohybující se okolo 400 HV_{0,1}. Tento pokles nastal v největší hloubce zakalené vrstvy, která je od 0,5 do 1 mm. Šířka zakalené vrstvy dosahuje hodnot od 4,2 do 5,9 mm. Ve všech případech měření mikrotvrdomosti potvrdilo přítomnost martenzitické struktury v zakalené části materiálu.

Z výsledků jsme zjistili, že při použití stejného výkonu laseru a rozdílné rychlosti pohybu paprsku, byla naměřena vyšší tvrdost vždy v té vrstvě, kde se paprsek pohyboval pomaleji. Z toho vyplývá, že pro vyšší tvrdost zakalené vrstvy je nutné použít vysoký výkon laseru, ale především nízkou rychlost pohybu paprsku.

Bibliografie

- [1] SKÁLOVÁ, Jana, Jaroslav KOUTSKÝ a Vladislav MOTYČKA. *Nauka o materiálech*. Čtvrté. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-244-0.
- [2] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. První. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1263-1.
- [3] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
- [4] HRUBÝ, Vojtěch. *Přehled materiálového inženýrství*. První. Ostrava: Kovosil, 2010. ISBN 978-80-903694-5-0.
- [5] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. První. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [6] *Total Materia* [online]. Zürich: Key to Metals AG, 2009 [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=263>
- [7] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Dotisk prvního vydání. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1507-6.
- [8] WALLA, Viktor. *Kaličství v kostce*. První. Praha: ROH, 1965. ISBN 24-058-65.
- [9] KORECKÝ, Jan. *Kalení oceli*. Druhé. Kladno: ROH, 1951.
- [10] *Bodycote* [online]. Macclesfield, 2022 [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/services/heat-treatment/hardening-and-tempering/>
- [11] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. ISBN 978-80-261-0260-1.
- [12] *Madinger* [online]. Schweinfurt: Schmidt, 2022 [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <https://www.madinger.com/en/heat-treatment/>
- [13] *MEDUNA* [online]. Pardubice: vakuová kalírna, 2020 [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/>
- [14] *22. dny tepelného zpracování: mezinárodní konference*. První. Praha: Asociace pro tepelné zpracování kovů, 2008. ISBN 978-80-254-3067-5.
- [15] Induction Hardening / Flame Hardening. In: *Metlab* [online]. Philadelphia, 2012 [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.metlabheattreat.com/induction-flame-hardening.html>
- [16] Understanding the Flame Hardening Process and Its Applications. In: *Alpha Detroit Heat Treatment* [online]. Melbourne, 2021 [cit. 2022-12-06]. Dostupné z:

<https://alphadetroit.com.au/understanding-the-flame-hardening-process-and-its-applications/>

- [17] THE PROCESS OF FLAME HARDENING. In: *BorTec* [online]. 2022 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://bortec-group.com/glossary/flame-hardening/>
- [18] CLAY, Scot. *The Pros & Cons of Induction Hardening* [online]. Advanced Heat Treat, 2019 [cit. 2022-12-06]. Dostupné z: https://www.ahtcorp.com/webres/File/WhitePaper8_BenefitsAndLimitations_InductionHardening.pdf
- [19] Laserové kalení. In: *VÚTS* [online]. Liberec: VÚTS, 2022 [cit. 2022-12-06]. Dostupné z: <https://www.vuts.cz/laserove-kaleni-1.html>
- [20] Kalení efektivně a ekologicky pomocí laseru. In: *LASCAM* [online]. Praha: LASCAM systems, 2017 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/kaleni-laserem/>
- [21] BABU, P., K.R. BALASUBRAMANIAN a G. BUVANASHEKARAN. Laser surface hardening: A review. *International Journal of Surface Science and Engineering* [online]. 2011, **5**(23), 131-151 [cit. 2022-12-06]. ISSN 1749-785X. Dostupné z: doi:10.1504/IJSURFSE.2011.041398
- [22] Laserové kalení. In: *LASER THERM* [online]. Plzeň: LaserTherm, c2019-2022 [cit. 2022-12-07]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-kaleni>
- [23] GRUM, J. Comparison of different techniques of laser surface hardening. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* [online]. 2007, **2007**(24), 17-24 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol24_1/24101.pdf
- [24] *Härterei-Technische Mitteilungen*. Hannover, 1993, . ISSN 0341-101X.
- [25] CATALÁN, Néstor, Esteban RAMOS-MOORE, Adrian BOCCARDO a Diego CELENTANO. Surface Laser Treatment of Cast Irons: A Review. *Metals* [online]. 2022, **12**(4) [cit. 2022-12-22]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met12040562
- [26] BABU, P., K.R. BALASUBRAMANIAN a G. BUVANASHEKARAN. Laser surface hardening: a review. *International Journal of Surface Science and Engineering* [online]. 2011, **5**(23) [cit. 2022-12-22]. ISSN 1749-785X. Dostupné z: doi:10.1504/IJSURFSE.2011.041398
- [27] RANA, J., G.L. GOSWAMI, S.K. JHA, P.K. MISHRA a B.V.S.S.S. PRASAD. *Experimental studies on the microstructure and hardness of laser-treated steel specimens* [online]. 2007, **39**(2), 385-393 [cit. 2023-01-01]. ISSN 00303992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2005.07.001
- [28] HWANG, Jong-Hyun, Yun-Sig LEE, Dae-Young KIM a Joong-Geun YOUN. Laser Surface Hardening of Gray Cast Iron Used for Piston Ring. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. **11**(3), 294-300 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: doi:10.1361/105994902770344105

- [29] LIU, Anmin a Barbara PREVITALI. Laser surface treatment of grey cast iron by high power diode laser. *Physics Procedia* [online]. 2010, **5**, 439-448 [cit. 2023-01-01]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2010.08.166
- [30] WANG, Bingxu, Gary C. BARBER, Rui WANG a Yuming PAN. Comparison of Wear Performance of Austempered and Quench-Tempered Gray Cast Irons Enhanced by Laser Hardening Treatment. *Applied Sciences* [online]. 2020, **10**(9) [cit. 2022-12-21]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app10093049
- [31] WANG, Bingxu, Yuming PAN, Yu LIU et al. Effects of quench-tempering and laser hardening treatment on wear resistance of gray cast iron. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2020, **9**(4), 8163-8171 [cit. 2022-12-21]. ISSN 22387854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2020.05.006
- [32] WANG, Bingxu, Yuming PAN, Yu LIU, Gary C. BARBER, Feng QIU a Ming HU. Wear behavior of composite strengthened gray cast iron by austempering and laser hardening treatment. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2020, **9**(2), 2037-2043 [cit. 2022-12-21]. ISSN 22387854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2019.12.036
- [33] RATHOD, M. a H. DEORE. *Laser Surface Hardening of Ductile Irons* [online]. - [cit. 2022-12-17]. Dostupné z: doi:10.4271/2014-28-0021
- [34] GHAINI, F.Malek, M.H. AMERI a M.J. TORKAMANY. *Surface transformation hardening of ductile cast iron by a 600w fiber laser* [online]. 2020 [cit. 2022-12-19]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163758>
- [35] AL-SAYED, Samar, Ahmed ELSHAZLI a Abdel HUSSEIN. Laser Surface Hardening of Ni-hard White Cast Iron. *Metals* [online]. 2020, **10**(6) [cit. 2022-12-19]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met10060795
- [36] CHEN, Chunlun, Aixin FENG, Bingjie LIU, Yacheng WEI a Xiangyu SONG. Effect of quench-tempering and laser quenching on the microstructure and properties of high-chromium cast iron. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2022, **19**, 2759-2773 [cit. 2022-12-19]. ISSN 22387854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2022.06.022

Seznam obrázků

Obrázek 1 Metastabilní rovnovážný diagram Fe - Fe ₃ C [5]	11
Obrázek 2 Porovnání metastabilního a Stablního rovnovážného diagramu Fe - C [5].....	11
Obrázek 3 Lupínkový grafit v nenaleptném stavu [5].....	12
Obrázek 4 Kuličkový grafit v nenaleptném stavu [5]	14
Obrázek 5 Vermikulární grafit [2]	15
Obrázek 6 Temperovaný grafit [2].....	16
Obrázek 7 Mikrostruktura a mikrotvrdost laserem kalené litiny s různými popouštěcími teplotami [31]	29
Obrázek 8 Mikrostruktura jádra NiCu litiny, zvětšeno 100x	34
Obrázek 9 Mikrostruktura jádra NiCu litiny, zvětšeno 400x	34
Obrázek 10 Zkušební vzorek	35
Obrázek 11 Makrostruktura NiCu litiny v průjezdu A	36
Obrázek 12 Mikrostruktura NiCu litiny v průjezdu A, zvětšeno 100x	37
Obrázek 13 Mikrostruktura NiCu litiny v průjezdu A, zvětšeno 400x	37
Obrázek 14 Tvrdost NiCu litiny v průjezdu A.....	38
Obrázek 15 Makrostruktura NiCu litiny v průjezdu B.....	39
Obrázek 16 Mikrostruktura NiCu litiny v průjezdu B, zvětšeno 100x	40
Obrázek 17 Mikrostruktura NiCu litiny v průjezdu B, zvětšeno 400x	40
Obrázek 18 Tvrdost NiCu litiny v průjezdu B	41
Obrázek 19 Makrostruktura NiCu litiny v průjezdu C.....	42
Obrázek 20 Mikrostruktura NiCu litiny v průjezdu C, zvětšeno 100x	43
Obrázek 21 Mikrostruktura NiCu litiny v průjezdu C, zvětšeno 400x	43
Obrázek 22 Tvrdost NiCu litiny v průjezdu C	44
Obrázek 23 Makrostruktura NiCu litiny v průjezdu D	45
Obrázek 24 Mikrostruktura NiCu litiny v průjezdu D, zvětšeno 100x	46
Obrázek 25 Mikrostruktura NiCu litiny v průjezdu D, zvětšeno 400x	46
Obrázek 26 Tvrdost NiCu litiny v průjezdu D.....	47
Obrázek 27 Makrostruktura NiCu litiny v průjezdu E	48
Obrázek 28 Mikrostruktura NiCu litiny v průjezdu E, zvětšeno 100x.....	49
Obrázek 29 Mikrostruktura NiCu litiny v průjezdu E, zvětšeno 400x.....	49
Obrázek 30 Tvrdost NiCu litiny v průjezdu E	50

Seznam tabulek

Tabulka 1 Porovnání metod povrchového kalení.....	26
Tabulka 2 Chemické složení zkoušené LLG [%] [31].....	28
Tabulka 3 Chemické složení zkoušené tvárné litiny [%] [33]	30
Tabulka 4 Chemické složení zkoušené tvárné litiny [%] [34]	30
Tabulka 5 Chemické složení cementitické litiny [%] [35].....	31
Tabulka 6 Chemické složení litiny s vysokým obsahem chromu [%] [36].....	31
Tabulka 7 Chemické složení zkoušené NiCu litiny [%]	33
Tabulka 8 Parametry laseru TruDisk 4006	35