

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

POVRCHOVÉ KALENÍ VYBRANÝCH LITÝCH SLITIN ŽELEZA

SURFACE HARDENING OF SELECTED CAST FERROUS ALLOYS

AUTOR: Jan Stoudek

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Jakub Horník, Ph.D.

PRAHA 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stoudek** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **466513**
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:

Povrchové kalení vybraných litých slitin železa

Název bakalářské práce anglicky:

Surface hardening of selected cast ferrous alloys

Pokyny pro vypracování:

Rešerše v oblasti grafitických litin a jejich tepelného zpracování.
Povrchové kalení laserem grafitických litin.
Měření tvrdosti a tloušťek vrstev laserově kalených vzorků vybraných litin.
Shrnutí a diskuse výsledků.
Závěr.

Seznam doporučené literatury:

- [1] STOLAŘ, P., Materiálové základy rychlých ohřevů Sborník Rychlé ohřevy v TZ, indukční kalení, elektronový paprsek, 25. 4. 2019, Praha
- [2] MUŽÍK, T.: Kalení laserem, Sborník Rychlé ohřevy v TZ, indukční kalení, elektronový paprsek, 25. 4. 2019, Praha
- [3] NĚMEC, M., BEDNÁŘ, B., STUNOVÁ, B.: Teorie slévání. České vysoké učení technické v Praze, Česká technika - nakladatelství ČVUT, Praha : 2009. 218 s. ISBN 978-80-01-04395-0.
- [4] NĚMEČEK, S: Surface of Cast Iron after Laser Hardening, Advanced Materials Research, Trans Tech Pulications Ltd, 2013

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jakub Horník, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **04.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jakub Horník, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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 tuto práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....
Podpis

Anotace

Tato Bakalářská práce se v teoretické části zabývá problematikou litin, jejich základním rozdělením, vlastnostmi, možnostmi zlepšení jejich vlastností prostřednictvím dalšího tepelného zpracování. V praktické části se zaměřuje na experimentální vyhodnocení mikrostruktury a průběhu mikrotvrdosti vzorků vybraných grafitických litin, u nichž bylo provedeno laserové povrchové kalení. U všech porovnávaných litin došlo po povrchovém kalení k vytvoření souvislé martenzitické vrstvy, případně při lokálním natavení povrchu ke kombinaci ledeburitu a martenzitu. Tvrdost se po laserovém povrchovém kalení pohybuje v rozsahu (900 – 1050) HV01. Tloušťka zakalené vrstvy dosahuje podle druhu litiny (0,3 – 0,7) mm.

Klíčová slova

Litiny, litina s lupínkovým grafitem, litina s kuličkovým grafitem, tepelné zpracování litin, povrchové kalení laserem, mikrostruktura, mikrotvrdost

Annotation

This Bachelor thesis in theoretical part deals with cast irons, their basic classification, their properties and possibilities of improving their properties by heat treatment. In practical part it focuses on experimental evaluation of microstructure and microhardness of selected cast irons after laser surface hardening. After surface hardening for all samples of compared cast irons, there is a martensite layer or in case of partial melting of surface, combination of ledeburite and martensite. Hardness after laser surface hardening is in range (900 – 1050) HV_{0,1}. According to type of cast iron, achieved thickness of hardened layer is (0,3 – 0,7) mm.

Keywords

Cast irons, gray cast iron, ductile cast iron, heat treatment of cast irons, laser surface hardening, microstructure, microhardness

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jakubu Horníkovi PhD., za veškerou pomoc při řešení této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Janu Krčilovi za jeho trpělivost a pomoc při řešení praktické části bakalářské práce. Za poskytnutí experimentálního materiálu děkuji doc. Ing. Břetislavu Skrbkovi, CSc. a doc. Ing. Stanislavu Němečekovi, Ph.D za provedení laserového povrchového kalení. Zapomenout nesmím ani na moji rodinu a blízké, kteří mne podporovali po celou dobu studia.

Obsah

1	Úvod	9
2	Lité slitiny železa	9
2.1	Oceli na odlitky.....	10
2.1.1	Nevýhody ocelových odlitků	11
2.2	Litiny.....	11
2.2.1	Strukturní složky litin.....	13
2.2.2	Značení litin	14
2.2.3	Chemické složení litin.....	15
2.2.4	Druhy litin.....	16
2.2.5	Legování litin	24
3	Tepelné zpracování litin	27
3.1	Kalení litin.....	27
3.2	Povrchové kalení	29
3.2.1	Povrchové kalení plamenem.....	29
3.2.2	Indukční povrchové kalení	30
3.2.3	Povrchové kalení koncentrovanými zdroji energie.....	31
3.3	Izotermicky zpracované litiny	37
4	Zkoušky tvrdosti	38
4.1	Zkouška tvrdosti podle Vickerse	39
4.2	Zkouška tvrdosti podle Knoop.....	41
4.3	Metodika zkoušek mikrotvrdosti	42
4.4	Nanotvrdost	44
5	Experimentální část.....	45
5.1	Materiál použitý v rámci experimentální části.....	45
5.1.1	Chemické složení.....	45
5.1.2	Technologický postup laserového kalení	46
5.2	Příprava vzorků pro experimentální část	46
5.3	Mikrostruktura a měření mikrotvrdostí	51
5.3.1	Litina s lupínkovým grafitem EN GJL-200.....	51
5.3.2	Litina EN GJL-200 AGI.....	54
5.3.3	Litina EN GJL-250 Sn AGI	58

5.3.4	Litina EN GJS-700 CuNi ADI	61
5.4	Diskuze výsledků	63
6	Závěr.....	65
7	Bibliografie	67
8	Seznam obrázků	70

1 Úvod

Litiny tvoří většinu podílu odlitků světové produkce slévárenských slitin, přičemž zásadní podíl mají litiny grafitické. Nahrazují stále častěji ocelové odlitky, neboť jsou méně náročné na výrobu nejen po ekonomické stránce. Uplatnění litin je velmi široké, jejich zastoupení nacházíme téměř ve všech odvětvích lidské činnosti, zejména díky jejich unikátním vlastnostem, které lze navíc dále zlepšovat ať už legováním či různými druhy tepelného zpracování.

Cílem této práce je porovnat vliv povrchového kalení laserem na změny mikrostruktury a průběhu tvrdosti v povrchových vrstvách vzorků litin s lupínkovým a kuličkovým grafitem. V teoretické části je provedena rešerše literatury v oblasti litin obecně, jejich srovnání s ocelmi na odlitky a popsány základní druhy a vlastnosti litin. Teoretická část se dále zabývá možnostmi zlepšení vlastností litin, tedy legováním a jednotlivými typy tepelného zpracování, včetně povrchového kalení laserem, které je následně využito v praktické části bakalářské práce. Zde jsou analyzovány mikrostrukturní změny a měřeny průběhy mikrotvrdosti povrchových vrstev litin s lupínkovým a kuličkovým grafitem, u nichž bylo provedeno laserové povrchové kalení. Výstupy experimentální části, tedy zjištěné vlastnosti jednotlivých litin a jejich vzájemné srovnání je uvedeno v závěru bakalářské práce.

2 Lité slitiny železa

Slévárenské slitiny představují v současnosti rozsáhlou oblast materiálů se širokou škálou mechanických, technologických a užitných vlastností. Strojírenství, letecký nebo automobilový průmysl, to vše jsou největší spotřebitelé slévárenských slitin a odlitků z nich vyrobených. Speciální slitiny jsou používány rovněž v lékařství, zde se využívá technologie přesného lití pro výrobu odlitků zubní a kloubní protetiky. Slitiny kovů pro výrobu odlitků musí mít dobré slévárenské vlastnosti, ty jsou za splnění požadovaných parametrů předpokladem pro výrobu odlitků bez vad

a při optimálních nákladech. Mezi důležité materiálové a slévárenské vlastnosti patří např. zabíhavost, viskozita, smrštění nebo tavitelnost. Nejvýznamnější skupinu slévárenských slitin tvoří slitiny na bázi železa, které jsou zastoupeny litinami a ocelmi na odlitky, které kromě železa obsahují základní prvky, jako jsou uhlík, křemík a mangan, ale také další prvky které jsou používány k legování, kam patří např. nikl, molybden či chrom a také nežádoucí obsahy jako jsou síra a fosfor. V současné době patří mezi nejpoužívanější materiály pro výrobu odlitků grafitické litiny a oceli na odlitky. [1,2]

2.1 Oceli na odlitky

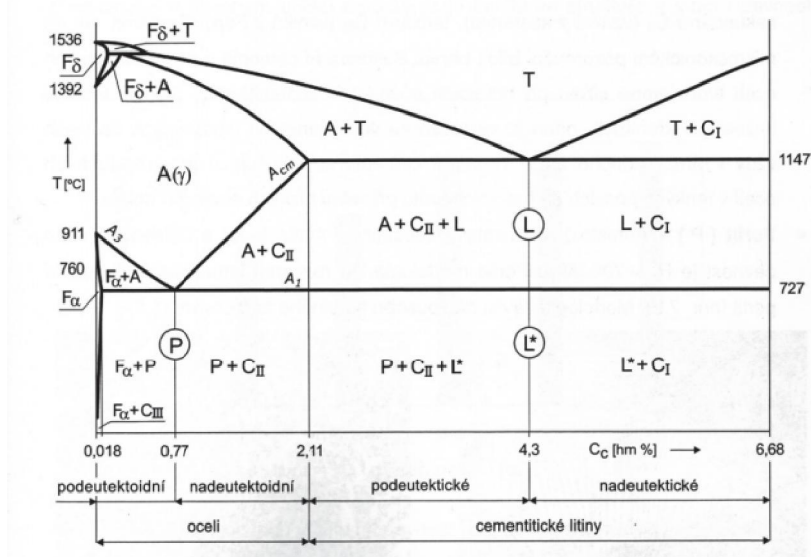
Ocelí na odlitky chápeme slitinu železa s uhlíkem, manganem, křemíkem a dalšími jinými prvky, kdy obsah uhlíku v této slitině nepřesáhne nejvyšší hodnotu rozpustnosti v austenitu, což je 2,14 % bez vlivu ostatních prvků a ve které není přítomna eutektická fáze. Ocel může obsahovat legovací prvky, tedy slitinové přísady a to kromě výrobně nutného množství přísadových doprovodných prvků. Ocelové odlitky mívají po odlití hrubozrnnou strukturu, a proto se tepelně zpracovávají, aby došlo ke zjemnění jejich struktury a zlepšení mechanických vlastností. Oceli můžeme rozdělit do několika skupin. Uhlíkové oceli na odlitky obsahují uhlík od 0,1 do 0,6 %. Odlitky se po odlití normalizačně žíhají a mohou se při vyšších obsazích uhlíku (0,25 %) i dále zušlechťovat. Dále rozlišujeme nízko a středně legované oceli, kdy součet středních obsahů legujících prvků nepřesahuje 5 % u nízkolegovaných ocelí a 10 % u středně legovaných ocelí. Další skupinou jsou vysokolegované slitiny železa na odlitky, které se používají pro výrobu trvalých magnetů. Nejvyužívanější jsou pro tavení oceli na odlitky využívány elektrické obloukové pece, které jsou nejpoužívanějšími pecními agregáty v České republice spolu se středofrekvenčními pecemi. [1]

2.1.1 Nevýhody ocelových odlitek

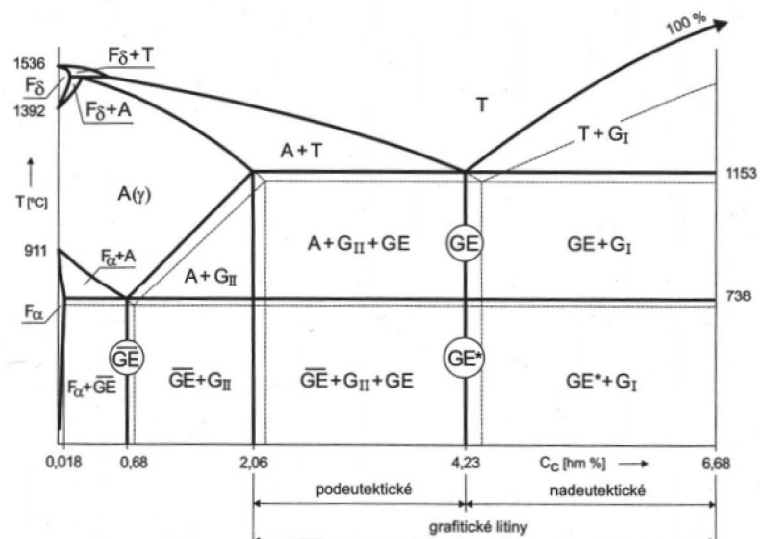
Oproti litinám mají ocelové odlitky větší smrštění, z tohoto důvodu se musí nálitkovat, což vede k tavení velkého množství kovu. Zároveň se odlévají při vysokých teplotách, které činí přibližně 1550 až 1600 stupňů celsia a tyto teploty způsobují větší tepelné namáhání forem, což může vést k většímu výskytu povrchových vad odlitku, jako jsou spečeniny. Ani vyzdívkové materiály v pecích a pánvích dlouhodobě nesnesou tak vysoké teploty. Na povrchu ocelových odlitek často vznikají nízkotavitelné sloučeniny, které přispívají ke vzniku připečenin a z tohoto důvodu nejsou pro ocelové odlitky vhodné formy, k jejichž výrobě byla použita kyselá ostřiva. Oproti litinám má ocel horší zabíhavost, a proto nesmí být ocelové odlitky složité a musí mít oproti litinovým odlitkům tlustší stěny. [3]

2.2 Litiny

Jako litiny označujeme slitiny železa, uhlíku a dalších prvků, ve kterých je vyšší obsah uhlíku, než je jeho maximální rozpustnost v austenitu. Uhlík je ve slitinách vyloučen jako grafit nebo je vázán jako karbid Fe_3C nebo jako karbid jiného prvku. Při krystalizaci litin se uplatňuje systém metastabilního Fe – Fe_3C - Obr. 1 či stabilního diagramu Fe - grafit – Obr. 2 nebo se v průběhu tuhnutí a chladnutí mohou uplatnit oba tyto diagramy. [4]



Obrázek 1 - Metastabilní rovnovážný diagram $Fe - Fe_3C$ [5]



Obrázek 2 - Stabilní rovnovážný diagram $Fe - \text{grafit}$ v porovnání s metastabilním [5]

Litina vzniká roztavením surovin, čímž rozumíme např. surové železo, litinové zlomky případně ocelový odpad nebo jiné přísady. K tavení dochází v kuplovně, elektrické indukční či obloukové peci. Podle chemického složení a podmínek za jakých litina tuhne, v ní vzniká grafitové eutektikum či cementitické eutektikum, tedy ledeburit. Podle vyloučeného eutektika litiny pak dále rozlišujeme. V případě litin, které mají bílý lom, hovoříme o tzv. bílých litinách, kam spadá např. tvrzená litina, druhou skupinu pak tvoří grafitické litiny, které mají lom šedý. Zvláštní skupinou vyráběnou pro určité účely jsou pak litiny legované, kdy dochází ke zlepšení

např. mechanických vlastností či zlepšení korozivzdornosti či otěruvzdornosti za pomoci vhodných prvků. [6]

2.2.1 Strukturní složky litin

Struktura litin je v případě grafitických litin tvořena základní kovovou hmotou a grafitem. V případě litin karbidických základní kovovou hmotou a kovovými karbidy.

Grafit je krystalickou formou uhlíku, krystalizující v hexagonální soustavě. V litinách se grafit vyskytuje v rámci tří zastoupených druhů. Prvním druhem je grafit eutektický, který společně s austenitem tvoří grafitické eutektikum a vzniká při tuhnutí eutektika. Grafit primární vzniká v podobě hrubých lupínků, které negativně ovlivňují mechanické vlastnosti u nadeutektických litin. Posledním druhem grafitu je grafit, který vzniká při tepelném zpracování v rámci rozpadu cementitu na grafit a ferit.

Základní kovová hmota je v případě nelegovaných a tepelně nezpracovaných litin tvořena feritem, perlitem, případně ledeburitem. Následným zpracováním nebo legováním se vytvářejí strukturní složky jako austenit, martenzit, případně bainit, který je však v případě litin nazýván ausferitem.

Ferit se v litinách nevyskytuje jako samostatná strukturní složka, ale označuje se tak mikrostruktura vznikající při eutektoidní transformaci austenitu dle stabilního systému - grafitový eutektoid. Ferit má kubickou, prostorově centrovanou mřížku a vzniká společně s eutektoidním grafitem, jehož podíl je pouze 0,68 %. Grafitový eutektoid – ferit je tvárný, měkký (až 200 HV) a snadno obrobitelný, s rostoucím podílem feritu roste také houževnatost.

Perlit je eutektoid, který vzniká rozpadem austenitu podle metastabilního systému. Skládá se z cementitu a lamel feritu. Obvykle se vyskytuje ve formě lamelární, kdy je tvořen lamelami feritu a cementitu umístěných na sobě. Dalším druhem je perlit lobulární vznikající při vhodném tepelném zpracování, kdy se

lamely balí do globulí, což s sebou přináší lepší obrobitelnost. Perlit je oproti feritu pevnější a tvrdší (až 450 HV) a s jeho rostoucím podílem tedy roste pevnost a tvrdost litiny.

Austenit má kubickou, plošně středěnou mřížku, za normálních teplot se vyskytuje hlavně ve formě zbytkového austenitu po tepelném zpracování, případně v legovaných litinách Niklem či Manganem. Austenit je měkký (až 350 HV), tvárný a korozivzdorný.

Cementit je karbid železa Fe_3C obsahující 6,67% uhlíku. Je velice tvrdý (až 700 HV) a křehký. Cementit se vyskytuje v několika formách. Primární cementit se vyskytuje v nadeutektických cementitických litinách. Ve formě eutektické se vyskytuje coby součást ledeburitu. Poslední formou je forma perlitická, kdy coby součást perlitu zvyšuje pevnost.

Ledeburit je eutektikem v metastabilní soustavě Fe- Fe_3C a obsahuje 4,3% uhlíku. Jedná se o tvrdou (až 700 HV) fázovou směs tvořenou austenitem a cementitem.

Martenzit vzniká při kalení litin, je velmi tvrdý (až 1000 HV) a křehký. **Bainit** neboli ausferit je tvrdá (až 600 HV) a pevná strukturní složka vznikající při tepelném zpracování nebo při lití niklových či molybdenových litin. [4]

2.2.2 Značení litin

Dle normy ČSN EN 1561 značíme všechny litiny písmeny EN-GJx, kde G značí materiál pro odlitky a J litinu. Třetí pozice ve značení litin je vyhrazena konkrétnímu druhu litiny, respektive grafitu v ní obsaženém – L pro lupínkový grafit, S pro kuličkový grafit, M pro temperovaný uhlík, V pro vermikulární grafit, N pro bezgrafitické litiny a Y se používá v případě speciální struktury.

V případě potřeby lze k tomuto značení přidat i mikrostrukturní případně makrostrukturní označení, kdy písmena A,F,P,M,L označují strukturní složky a

písmena Q, T, B, W označují vlastnosti litin, kdy Q znamená kalené, T kalené a popouštěné, B litiny s černým lomem a W litiny s bílým lomem.

Za tímto značením zpravidla následuje numerické označení mechanických vlastností. Nejčastěji používanou hodnotou je hodnota pevnosti v tahu, dále jsou také využívány hodnoty tažnosti, nárazové práce či tvrdosti.

Chemické složení legovaných litin se vyjadřuje značkou X, po níž následují chemické značky jednotlivých prvků a procentuální vyjádření jejich obsahu v litině.

Příkladem může být značka EN-GJL 150, která označuje litinu s lupínkovým grafitem a pevností v tahu 150MPa. Litina s kuličkovým grafitem s podílem 13 % niklu a 7 % molybdenu je pak značena jako EN-GJS-XNiMo13-7. [7]

2.2.3 Chemické složení

Mezi hlavní prvky obsažené v litině můžeme kromě železa zařadit i uhlík, křemík, mangan, fosfor nebo síru. Další složkou jsou pak prvky očkujících přísad, kde u legovaných či speciálních litin to mohou být např. molybden, nikl, cín, titan či chrom. Poslední skupina je tvořena prvky, které se mohou do litiny dostat z výchozích surovin při druhování a jejichž přítomnost je zpravidla považována za nežádoucí. Sem patří např. olovo, antimon, arsen, bor, hliník nebo bismut a pokud se nejedná o legující přísadu mohou být za nežádoucí považovány i cín, titan a chrom. Každý z prvků má na strukturu tuhnutí fáze anebo na základní kovovou hmotu specifický vliv. Prvky rozlišujeme podle toho, jaký mají vliv na mikrostrukturu, na primární, legující, karbidotvorné a perlitotvorné a nežádoucí.

V litinách mohou spolupůsobit i plyny. Mohou jednak způsobovat vnitřní vady odlitku jako jsou uzavřené bubliny nebo iniciovat grafitizaci právě tím, že spolupůsobí při vzniku krystalizačních zárodků. Kyslík se v litinách vyskytuje oproti ocelím na odlitky v relativně nízkých obsazích, v nadměrném množství totiž může způsobovat v odlitcích bodliny a bubliny. Váže se na stabilní oxidy, které jsou

zárodky grafitu a tím podporují grafitizaci. Dusík do litiny přechází z atmosféry, častěji z pojiv formovacích směsí, které dusík obsahují. Dusík pak podporuje tvorbu karbidů a v tlustostěnných odlitcích z litiny s lupínkovým grafitem zjemňuje grafit. Vodík neovlivňuje stupeň grafitizace, ve vyšším obsahu v litině zvyšuje sklon k bílému tuhnutí, podporuje tvorbu perlitu ve struktuře, ale může být i zdrojem vad jako jsou bubliny, anomální struktury nebo zákalky v odlitcích.

Na mechanické, fyzikální, strukturní i slévárenské vlastnosti, má volba základního chemického složení rozhodující vliv. To, jaké by mělo být chemické složení a metalurgické zpracování, je určováno jak velikostí a hmotností odlitku, tak jeho modulem pevnosti. Na rozdíl od oceli však nemůžeme jednotlivé typy litin charakterizovat pouze chemickým složením, ale musíme přihlížet k dalším podmínkám, jako je rychlost ochlazování, protože to je rozhodující pro konečnou strukturu litiny. [1]

2.2.4 Druhy litin

Struktura litin se skládá z primární fáze a eutektika. Litiny můžeme rozdělit do dvou základních skupin. O grafitických litinách hovoříme v případě, že se zde vyskytuje volný uhlík. Pokud je však uhlík vázaný v cementitu, jedná se o litiny karbidické. Fázové přeměny se u těchto dvou druhů litin řídí rovnovážným diagramem a to stabilním u grafitických litin a metastabilním u cementitických litin. [4,5]

Setkáváme se také s rozdělením litin na šedé a bílé, které vychází z barvy lomu a vypovídá o stabilní či metastabilní rovnováze. Obsahem grafitu se zbarvuje plocha lomu šedě, v přítomnosti cementitu bíle. [8]

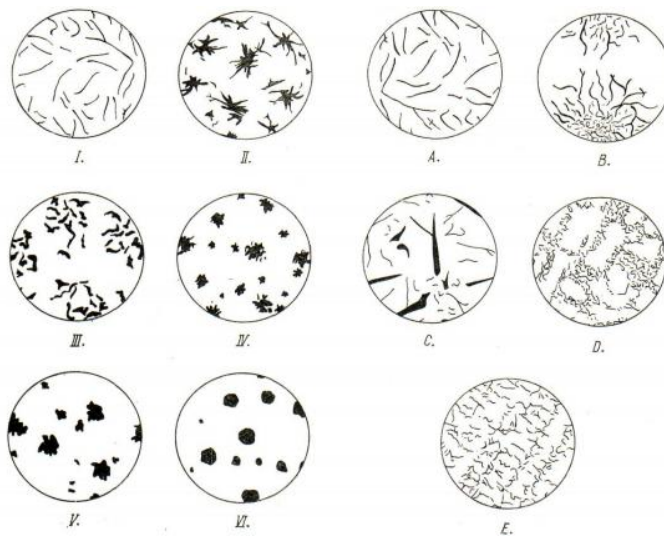
Přechodovým typem mezi grafitickými a cementitickými litinami lze v důsledku toho, že se v jejich struktuře nachází současně oba typy eutektika považovat litiny tvrzené. [6]

2.2.4.1 Grafitické litiny

Litiny, u kterých při tuhnutí dle stabilního diagramu vzniká grafitické eutektikum, jež je tvořeno austenitem a uhlíkem, vyloučeném v podobě grafitu, nazýváme litinami grafitickými. Grafit krystalizuje v šesterečné soustavě, je velmi měkký a drobný. Soustavu železo - grafit nazýváme soustavou stabilní a krystalizují v ní grafitické litiny. [4]

Tvar vyloučeného grafitu - Obr. 3 - je hlavním kritériem k určení druhu litiny. Ty se tedy podle jeho tvaru dělí na následující typy:

- Litina s lupínkovým grafitem
- Litina s červíkovitým grafitem
- Litina s kuličkovitým grafitem
- Litina s vločkovým grafitem



Obrázek 3 - Tvar a rozložení grafitu v litinách [4]

I – lupínkový grafít, II – pavoučkovitý grafít, III – červíkovitý grafít, IV – vločkovitý grafít,

V – nedokonale zrnitý, VI – dokonale zrnitý

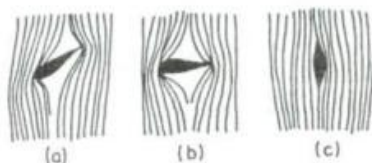
A – rovnoměrně rozložený, B – růžicovitě rozložený, C – smíšeně rozložený,

D – mezidendricky neusměrněně, E – mezidendricky usměrněně

Litina s lupínkovým grafitem

Litina s lupínkovým grafitem bývá často označována jako šedá litina. Grafit, který obsahuje, je ve tvaru prostorových útvarů, které se podobají zelné hlávce. Tyto mají na metalografickém výbrusu tvar lupínků a jejich délka je větší než jejich tloušťka a jejich konec je ostrý. V současné době jde o nejpoužívanější litinu, její zastoupení tvoří až 85 % všech litinových odlitků. Obvykle vzniká bez metalurgických zásahů. [4]

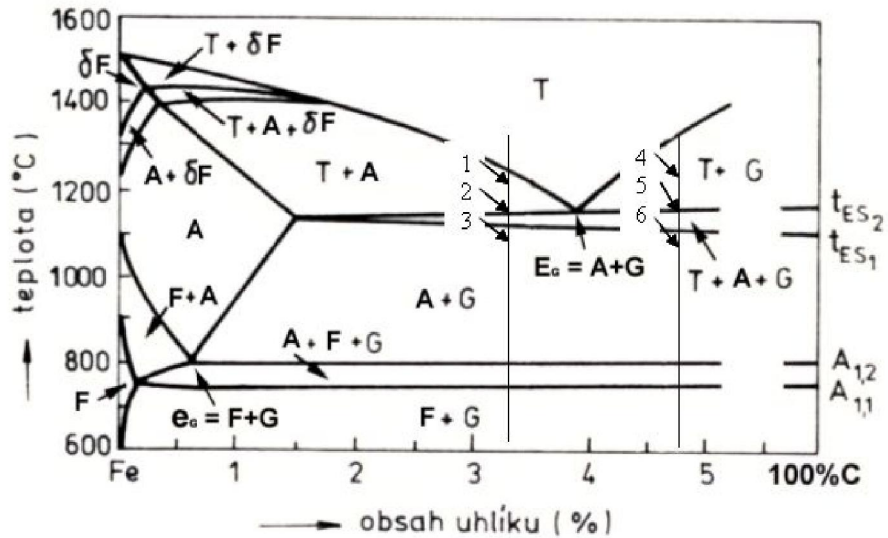
Podle normy, je litina s lupínkovým grafitem definována jako slitina uhlíku a železa na odlitky, ve které je volný uhlík přítomen jako grafit ve tvaru lamelárních částic. Jde o poměrně levný materiál vhodný ke konstrukci a má dobré slévárenské vlastnosti. Lupínky grafitu vytváří velké množství vrubů – Obr. 4 v základní kovové hmotě litiny a tím snižují její mechanické vlastnosti. Tažnost lupínkových litin je menší než 1 % a plastické vlastnosti jsou tak minimální. [6]



Obrázek 4 - Vrubové účinky lupínků grafitu [4]

Tyto litiny jsou nejvíce rozšířeným slévárenským materiálem právě díky své dobré slévatelnosti. Zároveň je ale jejich velkou nevýhodou velmi nízká plasticita a houževnatost. Ke konstrukčním účelům se používají litiny pondeutektické, které obvykle obsahují 2,5 až 4 % uhlíku, 1,7 až 2,5 % křemíku, 0,5 až 1 % manganu, 0,2 až 0,6 % fosforu a maximálně 0,15 % síry. Nejdůležitější složkou je křemík, který svým obsahem v litině souvisí s rychlostí chladnutí odlitku, respektive jeho stěny. S vyšším podílem křemíku bude litina tuhnout jako eutektická případně nadeutektická, neboť křemík snižuje koncentraci uhlíku v eutektiku. [8]

Z tohoto důvodu bývá často využíváno ternárního diagramu Fe – C – Si či jeho řezů (tzv. pseudobinární diagram) pro konkrétní obsah křemíku – Obr. 5, jelikož tento obsah má velký vliv na tvar a uspořádání diagramu. [9]



Obrázek 5 - Pseudobinární diagram Fe-C-Si pro 2% Si [9]

V případě ternárního diagramu Fe-C-Si nerozdělujeme litiny na podeutektické a nadeutektické, ale zavádíme veličinu zvanou stupeň eutektičnosti S_c (1). [9]

$$S_c = \frac{\%C}{4,3 - 0,312\%Si - 0,275\%P} \quad (1)$$

V případě, že je S_c rovno 1, je litina eutektická, v případě menším podeutektická a pro čísla větší než 1 nadeutektická. [9]

V závislosti na obsahu křemíku v litině se mění podíl grafitu v matrici. Čím vyšší obsah křemíku bude, tím vzniká hrubší lupínkový grafit a zároveň vzrůstá podíl feritu ve struktuře a snižuje se množství perlitu. V důsledku těchto změn ve struktuře klesá pevnost v ohybu i tahu. Litina s lupínkovým grafitem je velmi citlivá na rychlost chladnutí. Při malé tloušťce stěny odlitku je třeba zvýšit obsah křemíku, neboť díky jeho grafitizačním účinkům dochází ke kompenzaci vlivu karbidotvorných prvků. [6]

Mezi významné vlastnosti těchto litin patří malá vrubová citlivost a s tím spojená vysoká hodnota meze únavy. Jedná se o společný znak grafitických litin, u litin s lupínkovým grafitem je však nejméně výraznější. Vrubová citlivost je ve vzájemném vztahu k pevnosti litiny. Čím nižší je její pevnost, tím je vrubová citlivost menší. [4]

Litina s červíkovým grafitem

Litina s červíkovitým grafitem je též nazývána litinou vermikulární. Obvykle v sobě obsahuje určité množství lupínkového či kuličkového grafitu. Tvar vermikulárního grafitu je podobný jako tvar grafitu lupínkového. Vermikulární grafit však vytváří útvary, které jsou kratší a tlustší než útvary lupínkového grafitu a jejich konec není ostrý, ale zaoblený. Stejně jako u litiny s kuličkovým grafitem, je třeba v případě litiny s červíkovitým grafitem provádět modifikaci. [4]

Výroba litiny s vermikulárním grafitem vzniká za pomoci modifikační přísady, která vyvolává vznik kuličkového grafitu, ale zároveň je použita v takovém množství, které není dostatečné pro jeho úplné vytvoření anebo je do litiny přidán prvek a to během modifikace hořčíkem, který brání vzniku kuličkového grafitu. Litina s vermikulárním grafitem má na rozdíl od litiny s kuličkovým grafitem menší tendenci ke tvorbě staženin. Z tohoto důvodu se při jejím odlévání používá podobného postupu jako při odlévání litin s lupínkovým grafitem. Na rozdíl od nich má ale litina s červíkovitým grafitem lepší pevnostní vlastnosti a mírně vyšší tepelnou vodivost. Naproti tomu litiny s kuličkovým grafitem mají sice vyšší pevnost, zároveň však také podstatně nižší tepelnou vodivost. Z tohoto důvodu jsou proto vhodné pro odlitky, u kterých se předpokládá, že budou vystaveny změnám teploty, ať už jde o bloky válců, části brzd vozidel či ocelářské kokily. Její vlastnosti nejsou díky jejímu tvaru podobně jako u litin s lupínkovým grafitem závislé v takové míře na obsahu uhlíku a dalších přísad, ale na poměru feritu a perlitu obsaženému v základní kovové vrstvě a také na množství grafitu kuličkovitého tvaru. [6]

Litina s kuličkovým grafitem

Litina s kuličkovitým grafitem je často označována jako litina tvárná a obsahuje grafit ve tvaru kuliček. V současné době tvoří méně než 15 % hmotnosti všech odlévaných litin. Může se vyskytnout i grafit nedokonale zrnitý, pro dobré vlastnosti litiny je považována za ideální tvar dokonalá kulička. Stejně jako u litin s červíkovitým grafitem a na rozdíl od grafitu lupínkového je třeba provádět pro vznik litiny s kuličkovitým grafitem modifikaci. [4]

Kuličkovitý tvar grafitu porušuje základní kovovou hmotu méně, než grafit lupínkový. Z tohoto důvodu převládají vlastnosti matrice a litina je poměrně houževnatá. LKG tak tvoří jakýsi přechod mezi ocelí a LLG, z hlediska svých vlastností a to jak mechanických tak technologických. Má lepší plasticitu a odolnost oproti LLG a zachovává si lepší vlastnosti grafitických litin v podobě lepší slévatelnosti, třecí vlastnosti aj. oproti oceli, i když v porovnání s LLG jsou tyto její vlastnosti poněkud horší. [8]

Litinu s kuličkovitým grafitem je možné vyrobit modifikací taveniny čistým hořčíkem v autoklávu, předslitinami na bázi nikl-hořčík, měď-hořčík, železo-křemík-hořčík nebo měď-hořčík-cer v pánvi nebo přímo ve formě. Jeho tvorba je však možná jen v taveninách, v nichž je velmi nízký obsah síry a za závěrečného odsíření za pomoci hořčíku. Poté je nutné grafitizační očkování ferosiciliem, které zabraňuje vzniku cementitu tím, že eliminuje karbidotvorný účinek hořčíku. [6]

Litina s vločkovým grafitem

Litina, která obsahuje grafit, který má tvar vloček, byla dříve nazývána litinou s vločkovým grafitem, nyní je označována jako temperovaná litina. Rozpadem ledeburitického cementitu vznikají grafitové vločky. [4]

Temperovaná litina se vyrábí tepelným zpracováním litiny bílé. Vysokoteplotní žíhání dlouhodobého charakteru způsobuje rozklad cementitu, který se rozkládá na grafit a ferit. Podle toho, za jakých podmínek k žíhání dochází, získáváme litinu s černým, či bílým lomem. Struktura litiny s černým lomem je

tvořena feritickou maticí s vločkovým grafitem. Tažnost odpovídá přibližně 12 procentům a pevnost v tahu je 300 až 350 MPa. Druhy s vyšší tažností se používají při výrobě odlitků pro zemědělské a textilní stroje či pro automobily, zatímco druhy s nižší pevností nacházejí uplatnění v použití na méně namáhané strojní součásti. Struktura temperované litiny s bílým lomem je u tenkostěnných odlitků feritická či feriticko-perlitická. Povrchová vrstva u odlitků o větší tloušťce stěny je feritická, dále od povrchu se pak vyskytuje ferit, perlit a temperový grafit. Tažnost litiny s bílým lomem se pak pohybuje kolem 6 % a pevnost v tahu je vyšší než u litiny s černým lomem, protože se pohybuje okolo 350 až 450 MPa. Odlitky se pak dají využít např. v textilním, či automobilovém průmyslu. [8]

Temperovací proces u litiny s bílým lomem probíhá v peci s oduhličující automaticky řízenou oxidační atmosférou. Vháněním vzduchu a vodní páry se tato atmosféra průběžně obnovuje. Na povrchu odlitku nevznikají okuje a to z toho důvodu, že tyto plyny působí oxidačně a odebírají odlitkům počínaje okrajovým pásmem uhlík. Snižováním koncentrace uhlíku v austenitu povrchové vrstvy se poruší rovnováha na rozhraní austenit-cementit. Pro obnovení rovnováhy se musí rozpustit určitá část cementitu v austenitu. Naproti tomu temperovaná litina s černým lomem se tepelně zpracovává tak, že veškerý uhlík je vyloučen ve tvaru temperového grafitu. U této slitiny nedochází k oduhličování, je tedy třeba volit nízký obsah uhlíku, obvykle přibližně 2,5 %, protože příliš vysokým podílem temperového grafitu, který by byl vyloučen, by se vyvolalo snížení pevnosti litiny. [6]

2.2.4.2 Cementitické litiny

Cementitické neboli karbidické litiny mají vysokou tvrdost a otěruvzdornost. Grafit je v karbidických litinách částečně či zcela vázán jako karbid železa, chromu, manganu molybdenu nebo dalších karbidotvorných prvků. [4]

Při rozdělení litin používáme strukturní hledisko, kdy litiny s cementitickým eutektikem označujeme jako litiny bílé. Přejíčovým typem mezi karbidickými a

grafitickými litinami jsou litiny tvrzené, které mají oba typy eutektika, tedy cementické i grafitické. [6]

Bílá litina

Struktura bílé litiny má metastabilní rovnováhu a je tvořena směsí cementitu a perlitu. Ten vznikl rozpadem austenitu. V důsledku přítomnosti volného cementitu v litině, dosahuje tato vysoké tvrdosti avšak zároveň i značné křehkosti. I z tohoto důvodu je použití bílé litiny značně omezené. Dobrou odolnost proti opotřebením získává ve tvaru jednoduchých odlitků, které lze následně využít jako např. lopatky pískometů či koule kulových mlýnů. Pro zvýšení odolnosti proti opotřebením může litina obsahovat malá množství karbidotvorných prvků. [8]

Mezi takové prvky můžeme zařadit např. mangan či chrom. Bílá litina, která není legovaná, slouží jako výchozí produkt k výrobě temperované litiny. [6]

Tvrzená litina

Tvrzená nebo také skořepinová litina je vyráběna s cílem dosáhnout na jejím povrchu takové rychlosti ochlazování aby se vytvořila za většího přechlazení vrstva bílé litiny s metastabilním ledeburitem za plného potlačení tvorby grafitového eutektika. Tvrzená litina je tedy takový druh materiálu, u něhož je plně zvládnut proces krystalizace za zvláštních podmínek ochlazování. [6]

Použitím materiálu o velké tepelné vodivosti na výrobu příslušné části formy je možné dosáhnout zvětšení ochlazovací rychlosti. Formy bývají nejčastěji zhotoveny z šedé litiny. Zatímco povrch odlitku se díky kovové formě ochlazuje velmi rychle, má metastabilní strukturu a dosahuje značné tvrdosti a odolnosti proti opotřebením, jádro odlitku, které tuhne v pískové formě má strukturu, která odpovídá stabilní rovnováze a je proto měkčí a křehčí. Chemické složení litiny, ale také tloušťka stěny kokily a její tepelná vodivost ovlivňují hloubku tvrzené vrstvy. Tvrzenou litinu je možné použít tam, kde jsou odlitky vystaveny nepříznivým

provozním podmínkám, zvláště pak otěru za sucha. Používají se tedy např. na válcovací a mlecí válce, součásti drtičů či železniční kola. [8]

2.2.5 Legování litin

Podobně jako vlastnosti ocelí, lze i vlastnosti litin měnit přidáním určitých přísad. Legováním se dosahuje větší pevnosti, tvrdosti, houževnatosti nebo lepší korozní odolnosti a žáruvzdornosti u litin šedých, u litiny bílé se pak legováním zvyšuje zejména odolnost proti opotřebení. Zvýšení mechanických vlastností v důsledku úpravy chemického složení u grafitických litin má význam zejména u litiny s kuličkovým grafitem či temperované litiny neboť grafit zde má příznivou morfologii. [8]

Legované litiny můžeme rozdělit buď podle vlastností, které chceme legováním zlepšit, či podle rozhodujícího legujícího prvku. Při rozdělení podle přísady, která převažuje, dělíme legované litiny do čtyř hlavních skupin na litiny legované hliníkem, křemíkem, chromem nebo niklem.

Litiny legované hliníkem se vyznačují nízkou hustotou a vysokým elektrickým odporem. Zvláště v prostředí síry a jejích sloučenin mají vysokou korozivzdornost, odolnost proti okujím a oxidaci. Rozsah legování se pohybuje od 1 do 30 % obsahu hliníku, kdy s obsahem hliníku do přibližně 6 % je struktura tvořena grafitem a perlitem, v rozsahu 6 až 20 % litiny tuhnou bíle a při vysokém obsahu uhlíku v litině můžeme pozorovat feriticko-karbidickou strukturu. Velmi rozdílné vlastnosti materiálu jsou dány jeho složením. V praxi se dají používat jen litiny, které obsahují velmi vysoký nebo naopak relativně nízký podíl legujícího prvku, tedy od 1 do 9 % či od 20 do 25 % obsahu hliníku, protože litiny které obsahují podíl hliníku v rozmezí 10 až 16 %, jsou velmi křehké.

Křemíkem se litiny legují pro zvýšení žáruvzdornosti. Základní kovová hmota má vzhledem k vysokému obsahu křemíku feritickou strukturu. Lupínkový grafit

musí být pro zajištění vysoké žáruvzdornosti vyloučen mezidendricky velmi hrubé částice, které tvoří primární grafit, jsou nevýhodné, protože usnadňují pronikání kyslíku do vnitra materiálu, čímž dochází k podpoře vnitřní oxidace a ta pak vede k tzv. růstu litiny. Litina s kuličkovým grafitem, která je legována křemíkem, je vhodnější, než ta s lupínkovým, protože má lepší mechanické vlastnosti a větší odolnost proti okujím či objemovým změnám. Při obsahu křemíku od 4 do 7 % jsou litiny žáruvzdorné až do teploty 850 °C. Aby se žáruvzdornost zvýšila, legují se dále přísadou chromu a je možné je použít např. jako výstelky či víka pecí, roštnice nebo cementační nádoby. Druhy s vyšším podílem křemíku tzn. 10 až 18 % mají vysokou chemickou odolnost a to zejména proti kyselině fosforečné, sírové chromové a solné. Litina s 15 % křemíku bývá často využívána na armatury, kotle v chemickém průmyslu nebo odlitky čerpadel kyselin.

Legování litin chromem při obsahu vyšším než jsou 2 až 3 %, podporuje vylučování uhlíku ve formě karbidů, což má za následek, že litiny tuhnou bíle. Legování litin chromem vytváří materiál, který má vysokou odolnost proti opotřebení, korozi a je žáruvzdorný do vysokých teplot. Základní kovová hmota je u nízkolegovaných chromových litin perlitická. Přidáním niklu a hlavně molybdenu se tyto litiny stanou martenziticky kalitelnými. Při obsahu chromu od 8 do 28 % hovoříme o vysokolegovaných chromových litinách, které mají vysokou odolnost proti opotřebení v těžkých provozních podmínkách, kde dochází k suchému tření, či abrazivnímu opotřebení. Tento typ se opět dále leguje zejména molybdenem, aby došlo k přeměně austenitu na martenzit, ale molybden zároveň příznivě ovlivňuje houževnatost litin. Martenzitické chrom-molybdenové litiny se proto pro jejich vysokou odolnost proti opotřebení a dobrou houževnatost využívají pro tvorbu odlitků např. pro třídící, úpravářská, míchací či drtící zařízení.

Legování litin niklem zvyšuje jejich odolnost proti opotřebení a korozi, zvyšuje žáruvzdornost a zjemňuje částice grafitu v litinách s lupínkovým grafitem. Bílé litiny s obsahem niklu do 6 % patří do skupiny materiálů s vyšší odolností proti abrazivnímu opotřebení pevnými látkami či minerály. Jejich výroba je jednodušší

než výroba chromových litin a mnohdy mají lepší poměr mezi náklady a výkonem. Niklové litiny s lupínkovým či kuličkovým grafitem, které mají austenitickou základní kovovou hmotu, se vyznačují dobrou korozivzdorností zejména vůči zásadám, mořské vodě solným roztokům a zředěným kyselinám a vykazují vyšší odolnost vůči erozi. Mají také dobrou žáruvzdornost a odolnost proti tepelným rázům. Kvůli austenitické struktuře jsou vhodné pro odlitky chladírenské techniky a to při použití až do teploty $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. [6]

Podle vlastností pak legované litiny rozdělujeme do čtyř základních skupin na litiny se zvýšenými mechanickými vlastnostmi, litiny odolné proti opotřebení, litiny žáruvzdorné a litiny korozivzdorné.

Litiny se zvýšenými mechanickými vlastnostmi mají dobrou prokalitelnost a dají se zušlechťovat, odlévají se z nich např. vačkové hřídele nebo ozubená kola. Obvykle jde o nízko nebo středně legované grafitické litiny, u nichž je podle druhu a množství přísad struktura matrice tvořena po odlití a následném tepelném zpracování ausferitem a martenzitem či jemným perlitem.

Litiny odolné proti opotřebení se využívají ve velmi těžkých provozních podmínkách, kdy dochází k suchému tření nebo abrazivnímu opotřebení. Jsou tedy určeny např. k výrobě součástí tryskacích zařízení nebo mlecích agregátů. Dostatečnou odolností pro takové využití se vyznačují středně či vysoce legované bílé litiny, které mají po tepelném zpracování ve struktuře speciální karbidy. Ty jsou součástí karbidického eutektika a matrice takových litin je martenzitická se zbytkovým austenitem.

Litiny žáruvzdorné mají vlastnosti ovlivněny množstvím a druhem legujících přísad a dají se využít pro výrobu cementačních nádob či armatur pecí a to pro pracovní teploty dosahující 850 až $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Litiny korozivzdorné bývají ve většině litiny grafitické, které mají austenitickou matici. Příkladem litiny, která prokazuje vysokou odolnost proti

korozí v silných neoxidujících kyselinách, může být např. grafitická litina s obsahem křemíku kolem 15 %. [8]

3 Tepelné zpracování litin

Litinové odlitky se dají tepelně zpracovávat v podstatě stejně jako oceli. Užívá se ale i dalších postupů, jejichž základem je grafitizace cementitu a to vzhledem k vysokému obsahu uhlíku a křemíku. Tepelné zpracování odlitků z bílé litiny a litin grafitických se od sebe výrazně odlišuje podle způsobu zpracování a dosažených strukturních změn. U odlitků z bílé litiny se usiluje o zvýšení tvrdosti při zachování cementitické složky nebo je cílem tepelného zpracování získat grafitickou temperovanou litinu rozpadem cementitu. Kalením se u odlitků z bílé litiny zvyšuje tvrdost a odolnost oproti opotřebení přeměnou perlitu na martenzit. Temperování rozkládá cementit a křehká bílá litina se mění v LKG temperovanou. Tepelné zpracování grafitických litin se příliš neliší od tepelného zpracování ocelí. Stejně jako u ocelí zde má velký význam austenitizace a přeměna přechlazeného austenitu. Rozdíl mezi ocelemi a grafitickými litinami a jejich tepelném zpracování je v tom, že vzrůstající teplotou roste koncentrace uhlíku v austenitu postupným rozpouštěním grafitu. Nejrychlejší průběh austenitizace mají perlitické litiny. Ty jsou zároveň vhodnější pro kalení než litiny s podílem feritu. Mezi další druhy tepelného zpracování u grafitických litin řadíme kromě kalení různé druhy žihání, zušlechťování nebo některé druhy chemicko-tepelného zpracování. [8]

3.1 Kalení litin

Kalení litin spočívá v ohřevu na kalící teplotu, výdrži na této teplotě po určitý čas a poté velmi rychlém ochlazení buď ve vodě případně v oleji. Tímto procesem dochází k přeměně austenitu na martenzit nebo bainit v závislosti na rychlosti ochlazování. Kalící teplota se obvykle pohybuje v rozmezí 50 – 80 °C nad teplotou

$A_{1,2}$, kde je zaručena potřebná rozpustnost uhlíku v austenitu. Velký vliv na toto teplotní pole má křemík, jelikož s jeho vzrůstajícím obsahovým procentem je třeba volit vyšší kalící teploty za účelem dosažení potřebné rozpustnosti uhlíku v austenitu. [6]

Grafitické litiny dosahují kalením na rozdíl od ocelí nižší výsledné tvrdosti. Ta je snižována přítomností grafitu v litině. Litiny s lupínkovým grafitem jsou po kalícím procesu náchylné k praskání a obvykle nedosahují tvrdosti větší než 50 HRC. U litin s kuličkovým grafitem jsme schopni dosáhnout tvrdosti vyšší – až 55 HRC. [6,8]

Nejdůležitějším kritériem pro kalení je prokalitelnost. Tato vlastnost udává, do jaké hloubky je materiál schopen utvoření 50 % martenzitické struktury. U běžných litin je prokalitelnost na poměrně nízké úrovni a většina přísad ji, podobně jako v případě ocelí, zvyšuje. Nejvhodnější pro kalení jsou litiny s perlitickou matricí, v níž austenitizace probíhá nejrychleji. [8]

Dalším rozdílem při kalení litin bývá oproti ocelím pomalejší rychlost ohřevu. Po dosažení požadované kalící teploty se následným rychlým ochlazením v předem zvoleném ochlazovacím médiu, což bývá nejčastěji voda či olej, mění austenitická struktura na strukturu bainitickou případně martenzitickou. Ihned po kalení musí následovat operace zvaná popouštění, která má za cíl eliminovat negativní důsledky kalení a to hlavně v podobě snížení vnitřních pnutí. [6,8]

Martenzitické kalení běžně užíváme u grafitických i bílých litin. Cílem tohoto procesu je dosažení 50 % martenzitické struktury. Druh litiny má rozhodující vliv na parametry tohoto procesu ať už se jedná o teplotu, čas či kalící prostředí. Většinou je pro martenzitické kalení využíváno teplotního rozpětí 50-80 °C nad $A_{1,2}$ jelikož právě v tomto rozpětí je zaručena ideální rozpustnost uhlíku v austenitu. Při vyšších teplotách narůstá podíl zbytkového austenitu a tvrdost výrazně klesá. [6]

V případě kalení bílých litin považujeme martenzitický případ kalení za rozhodující proces ovlivňující jejich výsledné vlastnosti, ať už jde o pevnost či tvrdost, nicméně nejvýznamnějším přínosem je otěruvzdornost. [6]

3.2 Povrchové kalení

Povrchové kalení je speciálním druhem kalení, při kterém se zakaluje pouze povrch součásti, přičemž jádro zůstává nadále houževnaté. Provádíme ho za účelem zvýšení odolnosti proti opotřebení vlivem zakalené povrchové vrstvy. [4]

Při tomto procesu dochází k velmi rychlému místnímu ohřevu pouze povrchové oblasti součásti. Parametr rychlosti ohřevu je velmi důležitý, proto musíme volit vhodný zdroj tepla, schopný vyvinout potřebnou energii po určitý čas. Čas potřebný k povrchovému zahřátí součásti je obvykle velmi krátký. [6,8]

Ochlazovacím médiem bývá ve většině případů voda či olej, které zajistí potřebnou ochlazovací mohutnost a stejně jako v případě objemového kalení bývá nutno povrchově zakalené součásti posléze popouštět. [6,8,10]

Vhodná výchozí struktura pro povrchové kalení je struktura perlitická s nízkým obsahem feritu do maximálně 15 %, neobsahující ledeburitický cementit. V případě drobného rovnoměrně rozmístěného grafitu, lze k povrchovému kalení využít litiny s lupínkovým grafitem, dále pak jsou pro tuto metodu vhodné litiny s kuličkovým grafitem. [6]

Dle volené technologie dělíme povrchové kalení následovně:

- Povrchové kalení plamenem
- Povrchové kalení pomocí indukce
- Koncentrovanými zdroji energie

3.2.1 Povrchové kalení plamenem

Povrchové kalení plamenem je děleno na jednorázové a postupné. Při jednorázovém dosahujeme obvykle zhruba dvojnásobné tloušťky zakalené vrstvy – cca 3 mm oproti 1,5 mm v případě postupného. Materiál můžeme zahřívat buď

přímo a to vysokoteplotním plamenem či nepřímo ohřívat vysokými rychlostmi proudícími plynnými spaliny. V případě přímého ohřevu se pak nejčastěji využívá kyslíko-acetylenového plamene. Výhodou povrchového kalení plamenem jsou minimální nároky na zařízení a nízká ekonomická náročnost celého postupu. Nevýhodou je pak značná nerovnoměrnost zakalené struktury. Využití této metody kalení je tedy vhodné spíše pro kusovou případně malosériovou výrobu. [6,10]

3.2.2 Indukční povrchové kalení

Indukční povrchové kalení spočívá v ohřevu součásti za pomoci tzv. Foucaultových vířivých proudů. Ty vznikají v induktoru tvořeného cívkou či smyčkou za pomoci střídavého proudu, obvykle střední či vysoké frekvence což odpovídá 1 až 10 kHz nebo 150 kHz až 2 MHz a vysoké intenzity, jež vytváří střídavé magnetické pole. Intenzita magnetického pole i vířivých proudů je nejvyšší na povrchu součásti. Z tohoto důvodu je povrch součásti tou nejrychleji ohřivanou částí. Tloušťka povrchově ohřáté vrstvy je závislá na frekvenci střídavého proudu, rychlosti a době ohřevu, obvyklé rozmezí je mezi 1 a 6 mm.

Ohřev součásti je opět prováděn buď jednorázově či postupně. Při jednorázovém kalení je na kalicí teplotu ohříván celý povrch součásti, který má být zakalen a následně je ponořen do chladicí lázně. Při postupném kalení se zakaluje pouze část materiálu, která je hned za induktorem ochlazena pomocí sprchy. Nevýhodou postupného kalení je tzv. šev, neboli špatná návaznost postupně kalených vrstev, který vzniká buď v důsledku špatného napojení kalených částí, případně jejich postupným překrýváním.

Indukční povrchové kalení bývá z finančního hlediska na zavedení dané technologie velice náročné, a proto bývá užíváno při potřebě zakalení velkých sérií výrobků, v ideálním případě s menší zakalenou plochou. Pro malosériové použití a pro velké výrobky bývá tento způsob silně nerentabilní. [6,10]

3.2.3 Povrchové kalení koncentrovanými zdroji energie

Jedná se o způsoby povrchového ohřevu energetickými zdroji s usměrněným přenosem tepla a velmi vysokým tepelným výkonem. V praxi jsou využívány dva způsoby, a to laserový paprsek a elektronový paprsek. [10]

3.2.3.1 Laserové povrchové kalení

Laserovým paprskem lze vytvrzovat veškeré běžně kalitelné oceli, také oceli nízkouhlíkové a všechny druhy litin. Laserového kalení bývá využíváno u součástí, u kterých je vyžadována co největší odolnost povrchu proti opotřebení. Zpravidla jde o části motorů, ozubená kol či lopatky turbín. Jeho využití tedy nachází uplatnění v podstatě ve veškerých průmyslových odvětvích.

Povrchové kalení laserem bývá velmi často využíváno kvůli svému enormnímu potenciálu. Laserový paprsek je schopen bezdotykově a velice rychle dodávat součásti velké množství energie a zahřívat povrch rychlostí až 10^6 °C za sekundu.

V důsledku velkých rychlostí jak zahřívání, tak i ochlazování dochází ke změnám teplot a kinetiky fázových přeměn a tím i ke změně fázových diagramů.

Samotný princip laserového ohřevu spočívá v zaměření laserového paprsku na požadovanou pozici, posléze v plynulém pohybu v požadované tepelně ovlivněné oblasti a v následném „samoochlazení“ okolním materiálem. Samoochlazovací efekt je velice důležitý a dává výhodu v tom, že oproti ostatním metodám není nutné používat ochlazovací médium. Kvůli tomu dochází k vyrovnávání teplot rovnoměrně a je menší pravděpodobnost vzniku vad materiálu, jako jsou praskliny. V rámci tohoto procesu je také důležité si hlídat tloušťku materiálu, ke správnému odvodu tepla by měla být nejméně desetinásobná oproti tloušťce kalené vrstvy, pokud tato

podmínka splněna není, je nutné přistoupit k chladícím mediím jako proudící vzduch či voda.

Nejdůležitějšími parametry v oblasti laserového kalení jsou čas, po který laserový paprsek dopadá na povrch a samotná hustota energie svazku dopadajícího na povrch. Tyto hodnoty ve výsledku ovlivňují velikost i tvar tepelného ovlivnění i výsledného vytvrzení.

Laserová stopa má obvykle šířku do 20 mm a tloušťka vrstvy se pak pohybuje mezi 0,2 mm do 0,8 mm. Tyto hodnoty závisí na prostředí a podmínkách záření a samozřejmě také na vlastnostech samotného ovlivňovaného materiálu. V případě potřeby ovlivnit velkou oblast je nutno pokládat jednotlivé stopy několikanásobně, a to buď způsobem vedle sebe či jejich vzájemným křížením. Při využití tohoto postupuje třeba postupovat velice pečlivě, neboť se jednotlivé stopy mezi sebou vzájemně ovlivňují.

Laserové kalení můžeme provést třemi různými způsoby dle tepelného ovlivnění materiálu. Prvním způsobem je kalení, při kterém nedosahujeme teploty tavení základního materiálu a následně dochází k samoochlazení. Tento způsob bývá v praxi nejvíce využíván, jelikož umožňuje dosažení potřebného zpevňovacího efektu do hloubky několika desetin milimetrů a zanedbatelných deformací a minimálních pnutí. Druhým způsobem je lokální natavení tepelně ovlivněné oblasti. Výhoda tohoto procesu spočívá v rozpuštění i běžně ne snadno rozpustitelných fází a výsledkem je odolná jemnozrnná struktura s možností přerozdělení legujících prvků v kalené vrstvě. Nevýhodou je pak výraznější tepelně ovlivněná oblast a vznikající pnutí. Třetí možností je legování povrchu zároveň s pohybem laserového paprsku, a to buď v důsledku přímého legování, nebo je možné využít plátování. Tato metoda je výhodná, když prvotní materiál nemá vyhovující chemické složení pro požadované využití.

Výhody laserového povrchového kalení tedy značně převládají nad nevýhodami. Velkým mínusem této metody je ovšem jeho ekonomické hledisko, lasery jsou velice drahé a jejich následný provoz je také velmi nákladný. Laserové

povrchové kalení i přes ekonomickou náročnost často nachází v automobilovém a leteckém průmyslu. Díky produktivitě a flexibilitě tohoto procesu často nahrazuje indukční povrchové kalení v mnoha aplikacích. [6,10,11,12]

Druhy laserů

Pojem Laser je zkratkou anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Laser tedy zesiluje světlo vynucenou emisí záření.

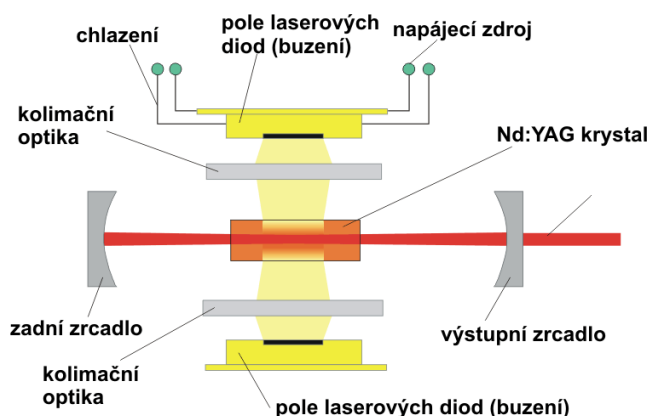
Lasery dělíme dle prostředí, ve kterém dochází k zesílení světla na tuhé, polovodičové, kapalně a plynné. Ovšem pro skupinu technologických laserů platí dělení pouze na dvě skupiny a to – lasery tuhé, též pevnolátkové a lasery plynové. Polovodičové a kapalně nebývají využívány. [10]

Tuhé lasery

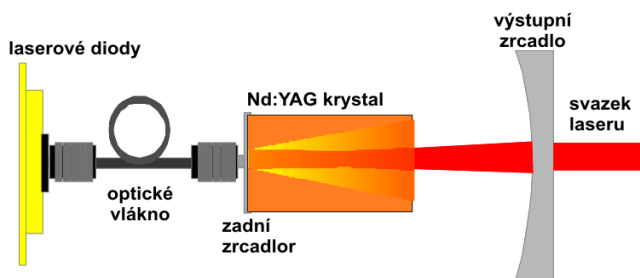
Mezi tuhé lasery řadíme lasery typu YAG respektive tři jeho typy a to - tyčový, vláknový a diskový laser. Nejpodstatnější rozdíl mezi těmito typy a tedy celý princip tohoto dělení spočívá v podobě uspořádání aktivního prostředí. Vlnová délka těchto laserů se pohybuje kolem 1000 nm. Aktivním prostředím je pak tzv. YAG krystal (zkratka pro Yttrium Aluminium Garnet) doprovázený ionty ytterbia (Yb) nebo neodymu (Nd). U Nd:YAG se jedná o tyčinku o průměru zhruba 1 mm a délce přibližně 20 cm, vláknový typ obsahuje dlouhé optické vlákno o průměru mezi 50 a 300 μm a délce 1 m a diskový laser využívá tenký disk o průměru 10 mm a tloušťce 0,25 mm. Nesporná výhoda těchto laserů spočívá v možnosti vedení jejich záření optickým vláknem, což značně usnadňuje přesun záření na potřebné místo a přesnost celého procesu je díky tomu také na velmi dobré úrovni. [6,10,13]

Nd:YAG je pevnolátkový laser s nejdelší tradicí, co se průmyslového využití týče. Využívá se ve dvou provedeních a to buď jako výbojkami buzený laser, zkratka LPSS nebo diodami buzený laser, zkratka DPSS, který je z těchto dvou typů účinnější a kvalitnější. Buzení se dle umístění rezonátoru rozlišuje na boční – Obr. 6 a zadní - Obr. 7. Výhodou zadního uspořádání je, že diody mohou být mimo rezonátor, čímž

jsme schopni dosáhnout lepší kvality svazku, ale ne takového výkonu jako u bočního vedení. V případě bočního vedení jsme sice schopni dosáhnout vyšších výkonů, nicméně na úkor kvality svazku. LPSS je tedy méně účinný než DPSS a to z důvodu mizejícího potenciálu prostřednictvím nevyužité energie výbojky, která se mění na teplo a proto je zde nutnost chlazení, ovšem pomocí pulsů jsme schopni přesunout větší množství energie, tudíž pro potřeby povrchového kalení je tento laser vhodnější i přes jeho nižší účinnost a vyšší náklady. [13,14,15]



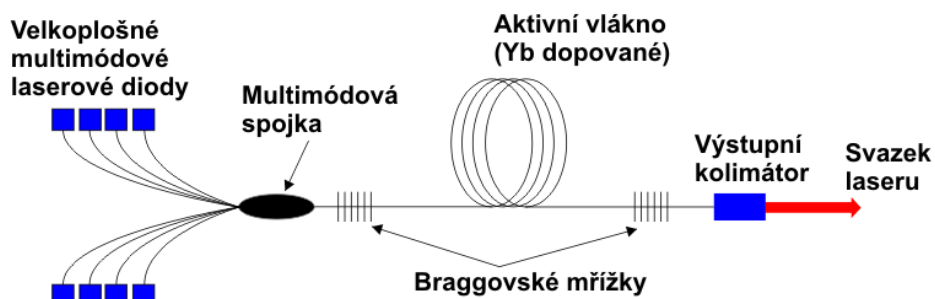
Obrázek 6 - DPSS s bočním buzením [13]



Obrázek 7 - DPSS se zadním buzením [13]

Prostředí diskového laseru je tvořeno malým diskem namísto tyčinky, jak je tomu u Nd:YAG laseru. Výhodou tohoto typu laseru je rovnoměrný teplotní profil po celém povrchu disku, který umožňuje dosažení velkého výkonu a dobré kvality výsledného svazku. Jeho nevýhodou je pak nízká životnost a vyšší ztráty spojené s nižší účinností.

Aktuálně nejmodernějším typem pevnolátkového laseru je laser vláknový – Obr. 8. Využívá velmi dlouhého optického vlákna doplněného o ytterbium. Principem vláknového laseru je vytváření buzení pomocí laserových diod, které je následně vedeno skrz optickou spojku do samotného optického vlákna, jež je zakončeno optickým kolimátorem, přes strukturu tvořenou tzv. Braggovskými mřížkami. Nespornou výhodou tohoto typu laseru je jeho dlouhá životnost, která činí až 100 000 hodin, dále jeho robustnost, jednoduchost a modularita. Má velmi dobrou účinnost a také malé nároky na prostor a údržbu a z tohoto důvodu má nejnižší provozní náklady ze všech tuhých laserů. [13,14,15]



Obrázek 8 - Princip vláknového laseru [13]

Plynové lasery

Plynové lasery můžeme rozdělit na tři základní skupiny. Jsou to lasery atomární, kam patří např. Ne-He laser využívaný ve čtečkách čárových kódů, dále lasery iontové kam spadá např. laser Ar²⁺ vhodný pro tvorbu litografií a třetí poslední skupinou jsou lasery molekulové, které jsou nevhodnější pro povrchové kalení. Právě do této skupiny patří i CO₂ laser, který je průmyslově využíván nejčastěji. Nevýhoda plynných laserů je v nemožnosti vedení jejich svazku optickým vláknem, pro jejich vedení musí být využívána soustava zrcadel, což s sebou nese jistá úskalí v podobě jejich pravidelné kalibrace a údržby.

Aktivní prostředí CO₂ laserů je tvořeno směsí plynů, obsahující CO₂, obvykle s dusíkem a heliem v poměru 1:2:8 nebo 1:4:5. Buzení těchto laserů bývá prováděno buď radio-frekvenčně (RF) nebo elektrickým výbojem (DC). Rezonátor těchto laserů může být buď hermeticky uzavřen – tento případ se nazývá sealedoff

laser, případně může plyn rezonátorem neustále proudit – tento případ je nezbytnou podmínkou vysoce výkonných laserů. Rozlišujeme tři základní typy CO₂ laserů, a to dle proudění plynné směsi na lasery s podélným prouděním, příčným prouděním a lasery deskové.

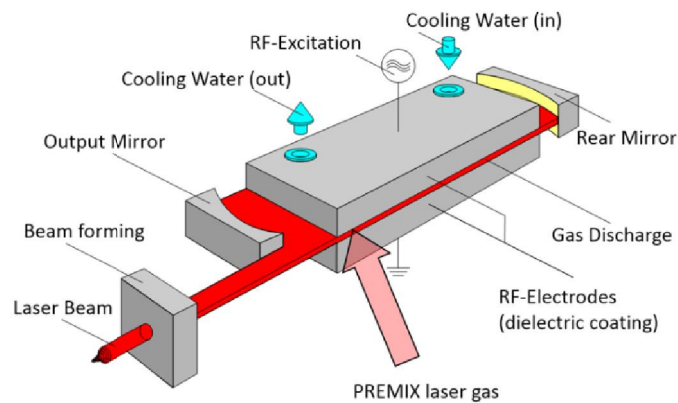
Lasery s podélným prouděním se vyznačují nejvyššími výkony, ale také největším rozsahem výkonů a to mezi 10 W až 20 kW. Do výkonu 10 kW bývají stejnosměrně buzeny, nad 10+ kW je nutné radiofrekvenční buzení. Plynná směs je doplňována z externího zásobníku a pro dobrou výslednou kvalitu svazku je třeba zajistit její velmi rychlé proudění. Tyto lasery bývají pro vysoký výkon a velmi dobrou kvalitu svazku používány hlavně pro řezání

Lasery s příčným prouděním dosahují oproti laserům s podélným prouděním nižších maximálních výkonů. Výsledná kvalita svazku je také na nižší úrovni. Plyn zde proudí kolmo k ose rezonátoru nízkou rychlostí a je buzen vysokofrekvenčními proudy. Vzhledem k nižším výkonům a nižší kvalitě svazku jsou lasery s příčným prouděním užívány např. pro kalení, povlakování nebo svařování. Jejich největší výhodou oproti laserům s podélným prouděním spočívá v nižší energetické náročnosti a velmi malé spotřebě plynné směsi. [13,14,15]

Deskový laser

Deskové lasery vynikají kvalitou výstupního svazku. Jedná se o nejnovější typ plynných laserů. Jsou limitovány výkonem, dosahují maximálně 2,5 kW. U laserů tohoto typu není třeba externí zásobárny plynné směsi, jelikož mají vlastní zásobník.

Generovaný svazek má obdélníkový průřez. Je generován mezi dvěma navzájem rovnoběžnými vysokofrekvenčními elektrodami, které jsou chlazeny vodou. Rezonátor je tvořen dvěma válcovými zrcadly – viz Obr. 9. [13,14,15]



Obrázek 9 - Schéma deskového laseru [13]

3.2.3.2 Elektronový svazek

Ohřev povrchu pomocí elektronového svazku funguje na principu emitace elektronů z wolframového katodického vlákna v elektronovém dělu, přičemž napětí mezi katodou a anodou je následně urychluje.

Soustavou elektromagnetických čoček je tento paprsek usměrněn na povrch součásti, přičemž pohyb paprsku po povrchu je uskutečňován vychylovací elektrodou. Svazek dopadající na povrch neohřívá přímo tuto povrchovou vrstvu, ale vrstvu těsně pod povrchem. Elektronový svazek má obvykle průměr menší než 1 mm.

Celé zařízení musí pracovat ve vakuu. Hustota výkonu těchto elektronových děl bývá velká, řádově mezi 10 a 10^4 MW/m², přičemž přibližně 75% tohoto výkonu je při styku s povrchem přeměněno na teplo. Maximální hloubka, které je možné pomocí elektronového svazku dosáhnout je přibližně 1,5 mm. [10]

3.3 Izotermicky zpracované litiny

V případě izotermického zušlechťování získáváme litiny s převážně ausferitickou strukturou. V první řadě probíhá austenitizace v rozmezí teplot 50-80 °

nad $A_{1,2}$ a poté se materiál ochlazuje na teplotu, při které probíhá bainitická přeměna. Po několikahodinové výdrži na této teplotě v předem připravené lázni se materiál volně ochlazuje na vzduchu. Hlavní rozdíl oproti klasické kalící metodě je v tom, že po izotermickém zušlechťování není nutno litiny popouštět, hlavní výhodou této metody je snížení vnitřních pnutí vedoucích k praskání materiálu. Izotermickým zušlechťováním opět dochází ke zlepšení pevnosti a odolnosti proti opotřebení. [6]

Tento způsob tepelného zpracování bývá nejčastěji využíván u litiny s kuličkovým grafitem, kdy jsme u této litiny schopni dosáhnout dobrých mechanických vlastností – pevnosti v tahu mezi 800 a 1400 MPa při tažnosti až 8 %. [4]

Tímto způsobem zpracovaná litina s kuličkovým grafitem je posléze z anglického „Austempered Ductile Iron“ nazývána ADI. Obdobným způsobem je nazývána litina s lupínkovým grafitem AGI z anglického „Austempered Gray Iron“. Takto zpracované odlitky mohou kvůli svým vlastnostem nahradit i odlitky z oceli a bývají proto využívány tam, kde je třeba dlouhodobá životnost, například v automobilovém průmyslu jako vačkové hřídele, klikové hřídele, ozubená kola, prvky zavěšení nebo součásti brzdových systémů. [16]

4 Zkoušky tvrdosti

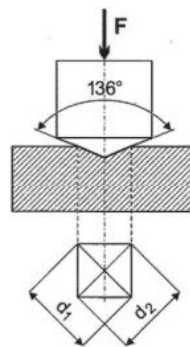
Tvrdot je jednou ze základních mechanických vlastností materiálu. Bývá definována jako odpor kladený materiálem proti vniku cizího tělesa. [5]

U zkoušek tvrdosti rozlišujeme pojem makrotvrdot a mikrotvrdot. V případě zkoušek makrotvrdoti je zátěžná síla vyšší, obvykle se pohybuje nad hranicí 10 N, zkoušky mikrotvrdoti pak mají zátěžnou sílu pod touto hranicí. Pro měření tvrdosti povrchových vrstev jsou vhodné dva druhy zkoušek a to zkouška dle Vickerse a zkouška dle Knoop. Rozdíl mezi jednotlivými zkouškami spočívá v indentorech neboli tělesech, která vnikají do měřené součásti. Na samotný

indentor bývají kladeny ty nejvyšší materiálové nároky, indentor nesmí být trvale deformovatelný a musí být velice tvrdý, aby byl schopen způsobit trvalou deformaci materiálu, jehož tvrdost chceme změřit. Jde o velmi přesné zkoušky pro stanovení tvrdosti materiálu, jejichž výhodou je nízká ekonomická náročnost. Vzhledem k tomu, že se při těchto zkouškách využívají menší zátěžné síly, je možné měřit i nejmenší části či velmi tenké vrstvy. [5,17]

4.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Zkouška dle Vickerse spočívá ve vtláčování diamantového jehlanu o čtyřech rovnoramenných bocích a vrcholovém úhlu 136° - viz Obr. 10.



Obrázek 10 - Zatížení a značení vtisku u zkoušky dle Vickerse[5]

Tento jehlan je zatížen silou F a vtláčován do povrchu zkušebního tělesa, po následném odlehčení jsou změřeny úhlopříčky vniku, ze kterých je vypočítán jejich aritmetický průměr a posléze je vypočtená hodnota dosazena do rovnice (2):

$$HV = 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (2)$$

Rozsahy doporučených zatížení v rámci zkoušky dle Vickerse jsou uvedeny v následující tabulce 1. [5]

Tabulka 1: Rozsahy doporučených zatížení pro Vickersovu zkoušku

Oblast zkušebního zatížení F [N]	Označení dané tvrdosti	Dříve užívané slovní značení
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	<i>HV 0,2 až HV 5</i>	Zkouška tvrdosti dle Vickerse pro nízká zatížení
$0,098 \leq F < 1,961$	<i>HV 0,01 až HV 0,2</i>	Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse

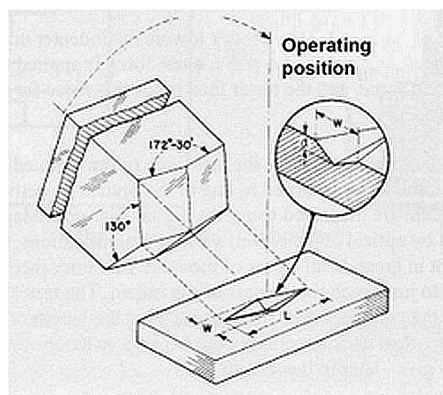
Z tabulky 1 je zřejmé, že pro měření mikrotvrdosti, je využíváno výhradně sil menších než 2 N. [5]

Výsledná tvrdost dle Vickerse je označena písmeny HV a zátěžnou silou v kilopondech, kterou je však nutno přenásobit hodnotou gravitačního zrychlení 9,807, tudíž 1 kilopond = 9,807 Newtonů. V případě jiného než doporučeného času 10 – 15 s se za lomítkem uvádí ještě doba zatěžování v sekundách. Vickersův způsob měření je nejrozšířenějším způsobem měření tvrdosti hlavně pro nejlepší přesnost v rámci způsobů měření tvrdosti, ovšem nevýhodou mohou být nároky na kvalitu a homogenitu povrchu. Vzhledem k menším silám a zasažení malého objemu povrchu je nejpřesnější v případě tvrdších materiálů a u těch méně tvrdých může způsobovat nepřesnosti. [5,17]

Zkouška dle Vickerse je podrobněji popsána normou ČSN EN ISO 6507-1. [18]

4.2 Zkouška tvrdosti podle Knoop

Hlavní rozdíl zkoušky tvrdosti podle Knoop je v indentoru, tedy ve vnikacím tělese. Zatímco v případě Vickerse má diamantový jehlan čtvercový průřez, v případě Knoop se jedná o průřez kosočtvercový a opět jde o diamantový jehlan. S tímto průřezem souvisí také rozdílné vrcholové úhly tohoto jehlanu, v tomto případě se jedná o 130° v souvislosti s kratší úhlopříčkou a $172,5^\circ$ pro úhlopříčku delší – viz Obr 11. [19]



Obrázek 11 - Indentor pro zkoušku dle Knoop [19]

Dalším rozdílem je, že zkouška dle Knoop je již od samého počátku zkouška mikrotvrdosti. Zatížení nepřesahuje 9,807 N tedy 1 kilopond a je proto vhodná pro velmi tenké vrstvy. Nevýhodou této zkoušky vzhledem k velmi malé ploše vtisku je potřebná jakost povrchu vyhodnocovaného materiálu. [19]

Tvrdost dle Knoop bývá označována HK a výpočet její hodnoty vypadá následovně (3):

$$HK = 0,102 \frac{F}{S} = 0,102 \frac{F}{CD^2} = 1,451 \frac{F}{D^2} \quad (3)$$

V rozměru D je další rozdíl oproti Vickersově zkoušce, rozměr D totiž značí pouze délku delší úhlopříčky, odtud tedy vychází zpřesnění této metody, jelikož delší úhlopříčka se lépe měří. Konstanta C je indentorová konstanta, která bere v potaz rozdílné vrcholové úhly a je vypočtena následujícím způsobem (4):

$$C = \frac{\tan \frac{B}{2}}{2 \tan \frac{A}{2}} = \frac{\tan \frac{130^\circ}{2}}{2 \tan \frac{172,5^\circ}{2}} = 0,07028 \quad (4)$$

Značení Knoopovy zkoušky je obdobné jako značení zkoušky dle Vickerse. Mikrotvrдость je značena písmeny HV a následuje síla v kilopondech, přičemž nepřesahuje hodnotu 1. Pokud se doba zatížení liší od 10 až 15 sekund, píšeme za lomítko zátěžnou dobu, tedy například 500 HK 0,2/20 je tvrdost dle Knoopu 500 při zkušebním zatížení 1,9614 N při zátěžné době 20 s.

Zkouška mikrotvrđosti podle Knoopu je podrobněji rozebrána v normě ČSN EN ISO 4545-1. [19]

4.3 Metodika zkoušek mikrotvrđosti

Metodika je u obou těchto zkoušek takřka totožná. Prvotní důraz je kladen na zkušební vzorek, jehož povrch musí být hladký rovný, bez jakýchkoliv vad jako jsou okuje, prachové částice či mastnota. Vyhodnocovaný vzorek tedy nabývá podoby metalografického výbrusu – materiál je zbroušen a posléze leštěn na požadovanou jakost. V případě tvrzených vrstev musíme hlídat také tloušťku vzorku, která musí být minimálně $1,5 \times$ úhlopříčka vtisku. [20]

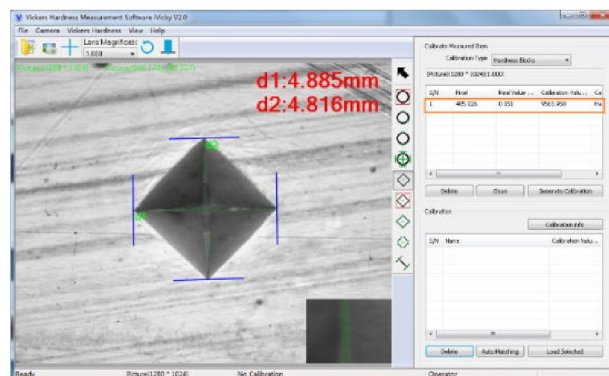
Pro správné provedení zkoušky je třeba zkušební vzorek umístit na pevnou podložku, aby při zatížení nedocházelo k pohybu. Indentor je do tělesa zatlačován předem zvolenou silou dle zvolené metodiky a to kolmo k povrchu zkušebního tělesa. Jednotlivé vtisky musí být od sebe vzdáleny minimálně trojnásobek průměrné hodnoty délky uhlopříček v případě Vickerse a minimálně trojnásobek délky kratší uhlopříčky v případě Knoopu. Tato podmínka platí pro ocel, měď a slitiny mědi, v případě lehkých kovů se jedná o šestinásobek. Doba plného zatížení by se měla pohybovat mezi 10 a 15 s. [20]

Měření probíhá v současnosti většinou poloautomatizovaně. Nejdůležitější na tomto procesu je správné změření délek úhlopříček. Toto měření probíhá na digitálním mikrotvrdoměru – viz Obr. 12, s jehož pomocí je možné dosáhnout velmi dobré přesnosti při měření. [20]



Obrázek 12 - Digitální Vickersův mikrotvrdoměr [21]

Samotný postup měření úhlopříček je dobře patrný z následujícího znázornění – Obr. 13. V rámci tohoto měření už vše ostatní vyhodnocuje software, úkolem člověka je pouze správné zaostření a správné zaměření vrcholů stopy po indentaci. [20]



Obrázek 13 - Měření úhlopříček vtisku ve speciálním softwaru [22]

4.4 Nanotvrdość

Snířováním zátěžných sil se dostáváme do oblasti nanotvrdości. Pro měření nanotvrdości jsou využívány miniaturní nanoindentory, vyrobené především z diamantu. Nejčastěji vyuřivaným tvarem je trojboký Berkovichův jehlan případně nanokulička. V rámci působících zátěžných sil se nacházíme v nanooblasti, tedy oblasti 1 nN.

Výhodou nanokuličky je možnost sledování postupného nárůstu deformací, ale z důvodu obtížně výroby je více využíváno Berkovichova jehlanu. Výhoda Berkovichova jehlanu je v jeho geometrii a elastické odezvě. Vzhledem k ostrému zakončení Berkovichova jehlanu vznikají navíc v křehkých materiálech mikrotrhliny, které dopomáhají k vyhodnocování lomové houževnatosti.

Princip měření nanotvrdości je obdobný jako v případě zkoušek mikrotvrdości, kdy indentor je vtlačován do materiálu kolmo k jeho povrchu a vytváří vtisk. Hlavním parametrem je hloubka vtisku v závislosti na síle měřené v průběhu zatěžování a odlehčování. Výhodou těchto zkoušek je možnost měření tvrdości miniaturních součástí, velmi tenkých vrstev nebo samotných strukturních složek.

Instrumentace zkoušky umožňuje řízení a zaznamenávání zátěžové křivky a následně vyhodnotit z plastické složky nanotvrdość a z elastické složky Youngův modul prožnosti. U polymerů je možné zjiřřovat creepové chování. [23]

5 Experimentální část

Praktická část se zabývá ověřením vlivu povrchového kalení laserem na vybrané vzorky grafitických litin. Laserové povrchové kalení bývá velmi často využíváno v oblastech, kde je třeba docílit dlouhodobé odolnosti povrchu. Povrchově se obvykle kalí oceli, ovšem v poslední době je tento způsob tepelného zpracování často využíván také u litin, hlavně u litin s kuličkovým grafitem, jelikož jejich vlastnosti jsou pro průmyslové využití vhodnější. Cílem této práce bylo porovnat vliv povrchového kalení laserem na mikrostrukturu povrchové vrstvy a průběh mikrotvrdosti vzorků vybraných litin s lupínkovým a kuličkovým grafitem.

5.1 Materiál použitý v rámci experimentální části

V experimentální části bylo hodnoceno pět vzorků grafitických litin po laserovém povrchovém kalení. Jedná se o vzorky odebrané z Y bloků nebo hlav zkušebních tyčí pro zkoušku tahem. Litiny byly vyrobeny se specifikací po odlití a následně bylo u některých provedeno izotermické zušlechtnění. Tři analyzované vzorky byly litiny s lupínkovým grafitem EN GJL-200, přičemž ve dvou případech byly vzorky následně izotermicky zušlechtěny, tedy EN GJL-200 AGI, ve třetím případě šlo o tepelně nezpracovanou litinu s lupínkovým grafitem EN GJL-200. Čtvrtý vzorek byl vzorek izotermicky zpracované litiny s lupínkovým grafitem legovaný cínem EN GJL-250 Sn AGI. Poslední materiál byla litina s kuličkovým grafitem legována mědí a niklem a následně izotermicky zpracovaná EN GJS-700 CuNi ADI. Parametry izotermického zpracování nejsou uvedeny s ohledem na dodavatele vzorků a jeho výzkum.

5.1.1 Chemické složení

Chemické složení použitých litin je shrnuto v Tabulce 2.

Tabulka 2: Chemické složení použitých litin

Litina (vzorek)	Obsah prvku [%]							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Sn
EN GJL-200 (1,2,3)	3,3	2,15	0,75	0,08	0,08	-	-	-
EN GJL-250 Sn (4)	3,32	1,93	0,67	0,061	0,075	0,11	-	0,08
EN GJS-700 CuNi (5)	3,48	2,8	0,12	0,04	0,008	0,98	1,97	-

5.1.2 Technologický postup laserového kalení

Všechny vzorky byly zakaleny na pracovišti RAPTECH s.r.o. jedním přejezdem laserového paprsku po rovinné ploše. Řízení procesu probíhalo za pomoci pyrometru, kterým byl kontrolován výkon paprsku takovým způsobem, aby byla dodržena stanovená teplota povrchu vzorku. Parametry laserového paprsku byly u všech pěti vzorků stejné – viz Tabulka 3.

Tabulka 3 - Parametry laserového povrchového kalení

Teplota	1050 °C
Velikost laserového spotu	5×5 - 5×24 mm (dle velikosti vzorku)
Povrchová rychlost paprsku	3 mm/s
Ochlazovací médium	Vzduch pokojové teploty

5.2 Příprava vzorků pro experimentální část

Před samotným vyhodnocováním mikrostruktury a zkoušením mikrotvrdosti bylo nutné vzorky - Obr. 14 - správným způsobem předpřipavit.



Obrázek 14 – Povrchově zakalený litinový vzorek

Vzorky byly rozřezány takovým způsobem, aby bylo možné v řezu pozorovat povrchově zakalenou vrstvu. Toto řezání bylo provedeno na metalografické rozbrušovací pile značky LECO – viz Obr. 15.



Obrázek 15 - Metalografická rozbrušovací pila značky LECO [24]

Důležitým aspektem byl výběr správného řezného kotouče. V tomto případě byl vybrán řezný kotouč vhodný pro grafitické litiny, konkrétně kotouč o průměru 250 mm a tloušťce 1,5 mm označení 810-313-010. Řez byl proveden kolmo na zakalenou vrstvu a kotouč směřoval ve směru laserové stopy. Důležité při řezání těchto vzorků bylo samozřejmě také správné upnutí materiálu, pomalý posuv řezacího kotouče a v neposlední řadě také správně nastavené chlazení vzorku i kotouče.

Po rozřezání byly na vzorcích stopy po řezacím kotouči, a z tohoto důvodu musela následovat další kroky metalografické přípravy povrchu. Pro usnadnění manipulace se vzorky byly tyto zatepla zalisovány do bakelitu. Toto lisování bylo provedeno na automatizovaném metalografickém lisu značky LECO – viz Obr. 16.



Obrázek 16 - Metalografický lis značky LECO [24]

Tento proces je automatizovaný, na metalografickém lisu je třeba nastavit správné parametry, tedy teplotu a čas, vložit vzorek a zasypat bakelitem v granulové podobě. Manipulace se vzorkem je značně usnadněna, protože je zalisován v plastovém válečku.

Dále byly provedeny operace broušení a leštění. Broušení i leštění probíhalo na stejném stroji. Broušení bylo provedeno za pomoci čtyř brusných papírů od nejvyšší hrubosti k nejnižší, aby se nejdříve odstranily nejhrubší nerovnosti a posléze se už pouze zjemňoval povrch. Leštění bylo nejdříve provedeno pomocí diamantové suspenze s částicemi o velikosti 3 μm posléze doleštěno koloidní silikou SiO_2 s částicemi o velikosti 0,05 μm . Tyto úpravy byly prováděny na leštičce LECO GPX300 – viz Obr. 17.



Obrázek 17 - Leštička LECO GPX300 [24]

Po vyleštění materiálu bylo na mikroskopu zkontrolováno, zda je jakost povrchu dostatečná a bylo přistoupeno k naleptání vzorku ve 2% Nitalu, neboli roztoku kyseliny dusičné v ethanolu. Tento proces naleptal strukturu a zviditelnil tak jednotlivé strukturní složky. Po naleptání byly vzorky opláchnuty a vysušeny.

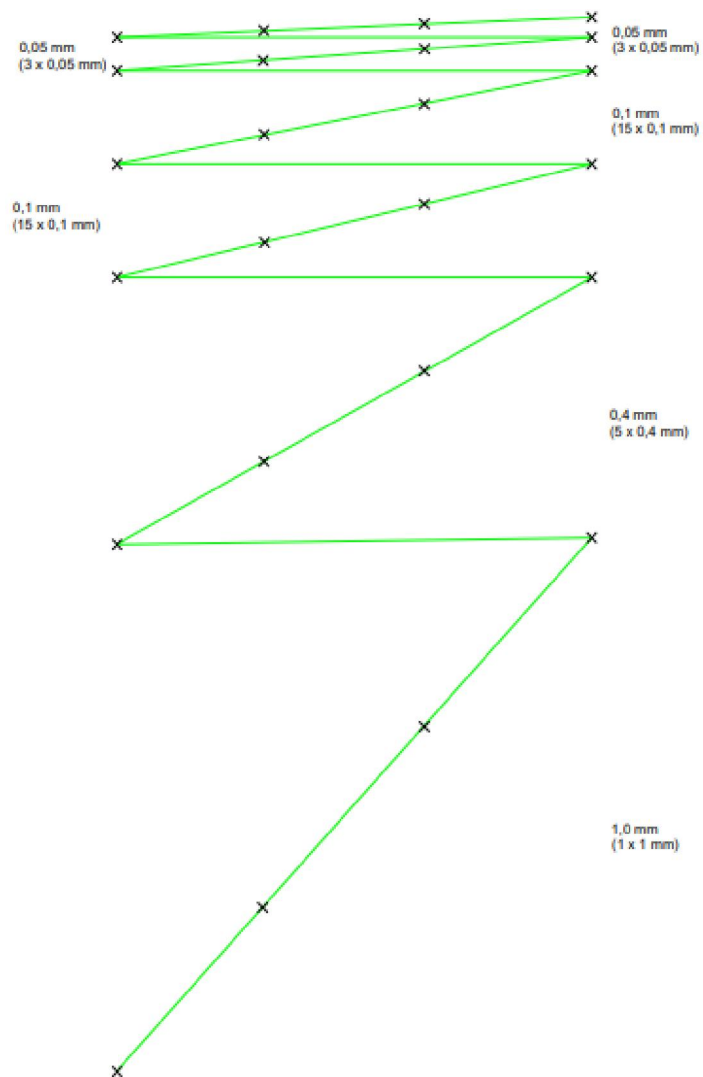
Mikrostruktura vzorků byla sledována na metalografickém mikroskopu Neophot 32 – viz Obr. 18, který je vybaven CCD kamerovým snímačem. Vzorky byly foceny při různých zvětšeních. Snímky z tohoto snímače byly převáděny do softwaru NIS ElementsAR ve kterém byly ukládány.



Obrázek 18 - Metalografický mikroskop Neophot 32 [25]

Po pozorování mikrostruktury proběhlo u všech vzorků měření a vyhodnocování mikrotvrdotí. Toto měření probíhalo pomocí Vickersovy metody a vždy bylo vyhodnocováno 96 vtisků indentoru metodou HV 0,1, tedy zátěžnou silou 0,98N.

Rozložení jednotlivých vtisků bylo za účelem zpřesnění měření v rámci povrchových a podpovrchových vrstev voleno nerovnoměrně. Více vpichů bylo provedeno při povrchu a v jádru, kde již nebudou výrazné rozdíly v tvrdostech, bylo provedeno vpichů méně. Celý postup měření, kdy v horní části se nachází povrchová vrstva, je znázorněn na schématu jednotlivých vpichů – viz Obr. 19.

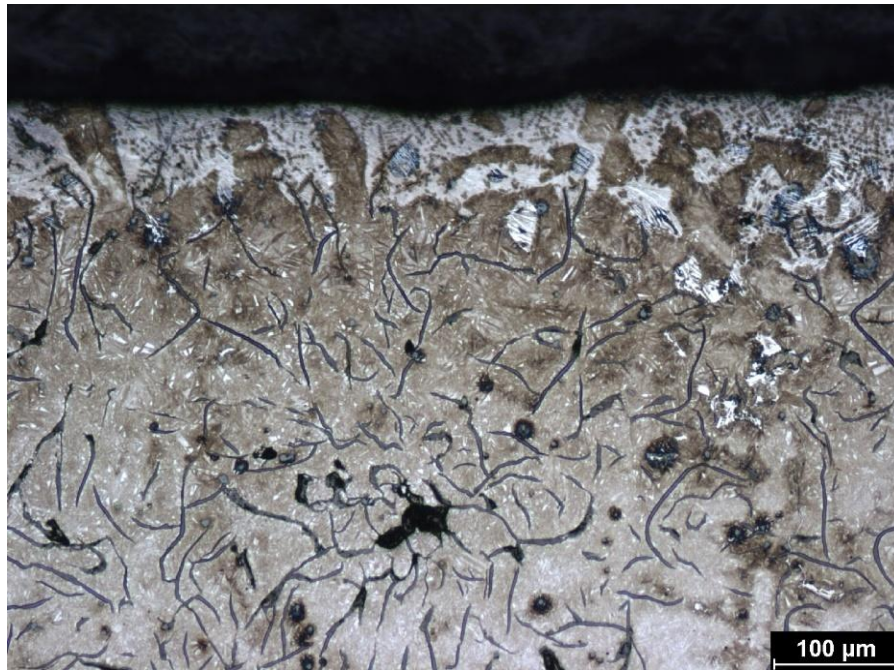


Obrázek 19 - Schematické znázornění postupu při měření mikrotvrdostí
(povrch nahoře)

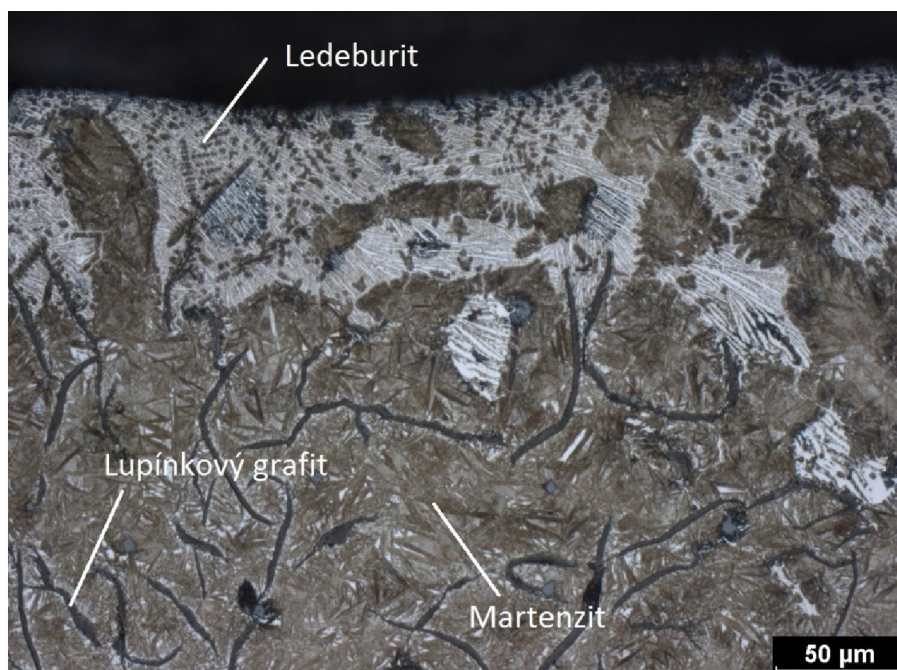
5.3 Mikrostruktura a měření mikrotvrdostí

5.3.1 Litina s lupínkovým grafitem EN GJL-200

Na povrchu laserově zakalené litiny s lupínkovým grafitem – Obr. 20 došlo zřejmě k částečnému natavení povrchu a vlivem rychlosti ochlazování došlo ke krystalizaci dle metastabilního diagramu a vzniku ledeburitické vrstvy, která je velmi tvrdá, ovšem také velice křehká. Pod touto vrstvou vznikla vrstva martenzitu – Obr. 21. V případě, že by nebyly použity stejné parametry laseru u všech vzorků, by bylo vhodné změnit parametry kalení takovým způsobem, aby nedocházelo k natavení povrchu a tvořil se čistý martenzit.

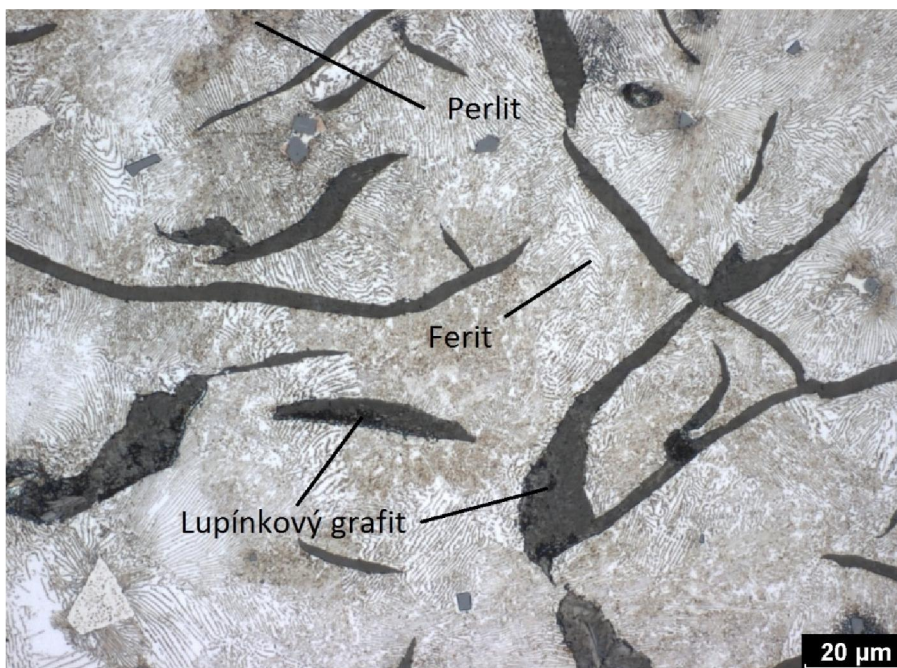


Obrázek 20 - Struktura laserově zakalené LLG při stonásobném zvětšení



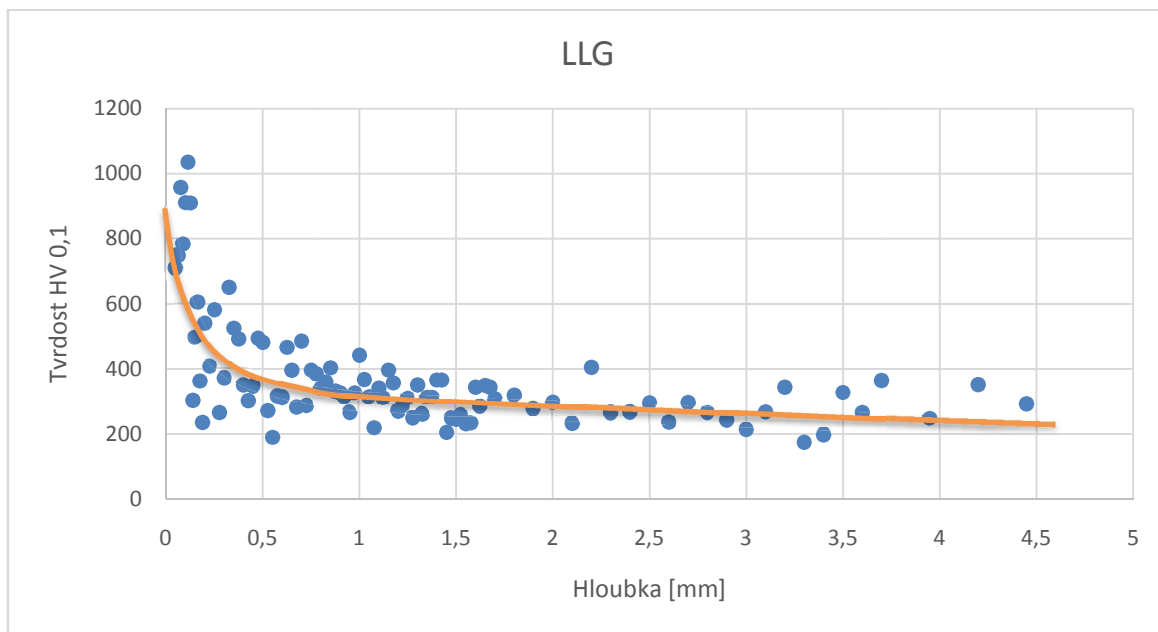
Obrázek 21 - Detail povrchové vrstvy, znatelná vrstva martenzitu a ledeburitu

Jádro LLG je tvořeno perlitem, feritem a lupínkovým grafitem, přičemž perlitická fáze výrazně převažuje nad feritickou v poměru 80:20 – viz Obr. 22.



Obrázek 22 - Struktura jádra LLG - detail

Z naměřených hodnot mikrotvrdostí je u LLG zřejmé, že zakalená vrstva je velice tenká a poměrně tvrdá, zhruba okolo 0,3 mm dochází k přechodu ke struktuře jádra, přičemž s narůstající hloubkou tvrdost strmě klesá – viz Obr. 23.



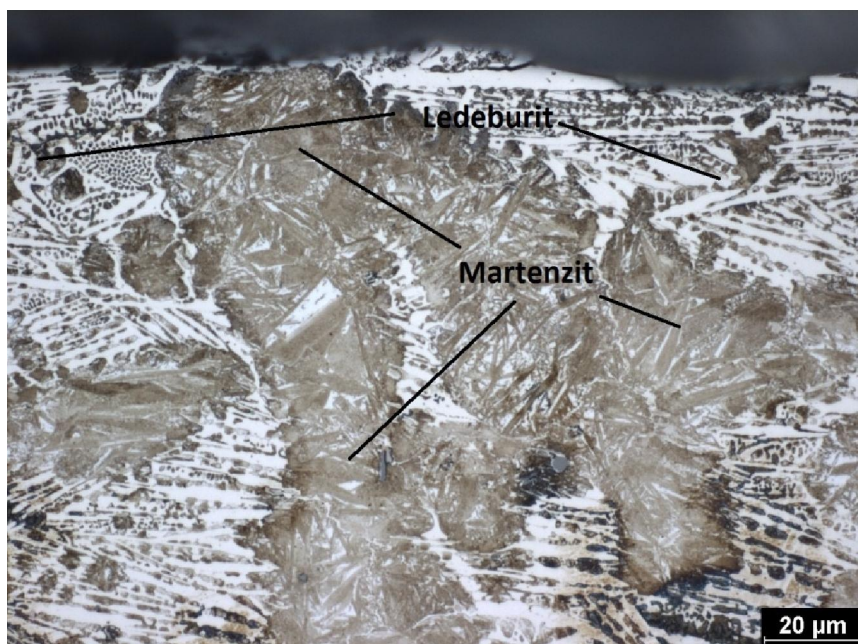
Obrázek 23 - Průběh mikrotvrdosti v závislosti na hloubce pro litinu s lupínkovým grafitem

5.3.2 Litina EN GJL-200 AGI

Na povrchu vzorku litiny EN GJL-200 AGI je patrná povrchově zakalená vrstva - Obr. 24, která je podobně jako u litiny s lupínkovým grafitem tvořena martenzitem a ledeburitem, opět by pravděpodobně bylo vhodné optimalizovat laserové parametry, jelikož žádoucí je souvislá vrstva martenzitu. Souvislá vrstva martenzitu až k povrchu se však v rámci tohoto vzorku na několika místech - viz Obr. 25 - vyskytuje, v tomto místě budou vlastnosti jako tvrdost a odolnost proti otěru pravděpodobně nejlepší.

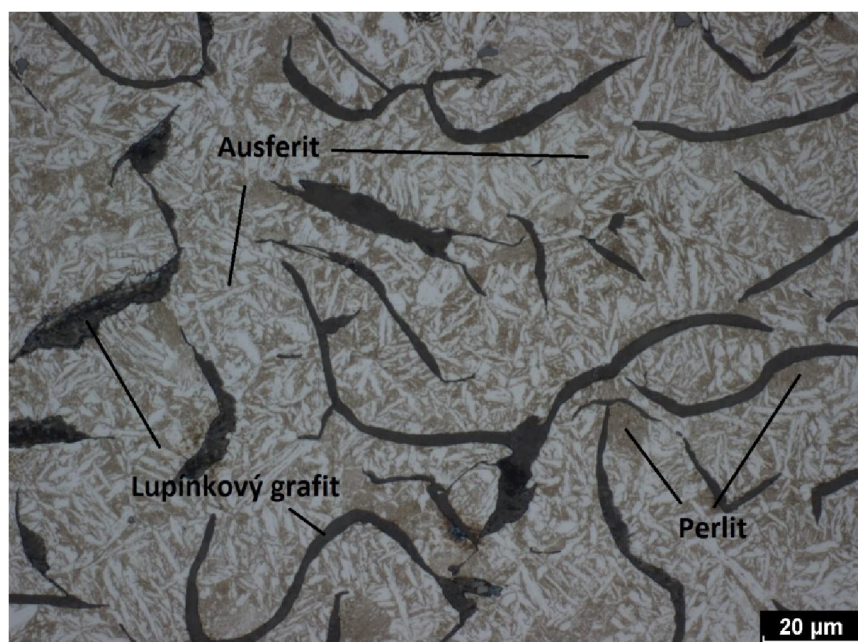


Obrázek 24 - Struktura laserově zakalené litiny EN GJL-200 AGI



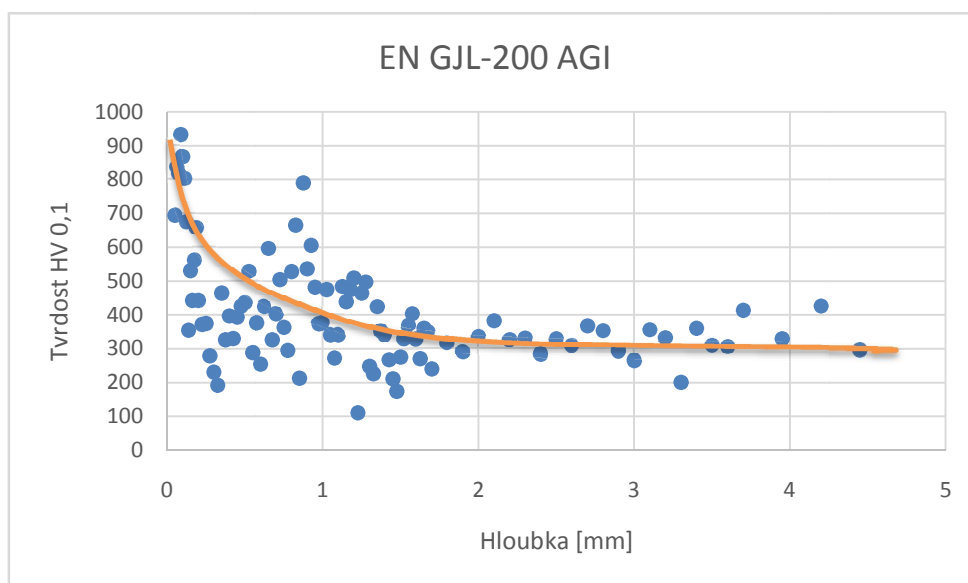
Obrázek 25 - Detail povrchově zakalené vrstvy, znatelný martenzit a ledeburit

Struktura jádra je v tomto případě po izotermickém zpracování převážně ausferitická, místy perlitická s lupínkovým grafitem – viz Obr. 26.



Obrázek 26 - Detail ausferitické struktury v jádru litiny EN GJL-200 AGI

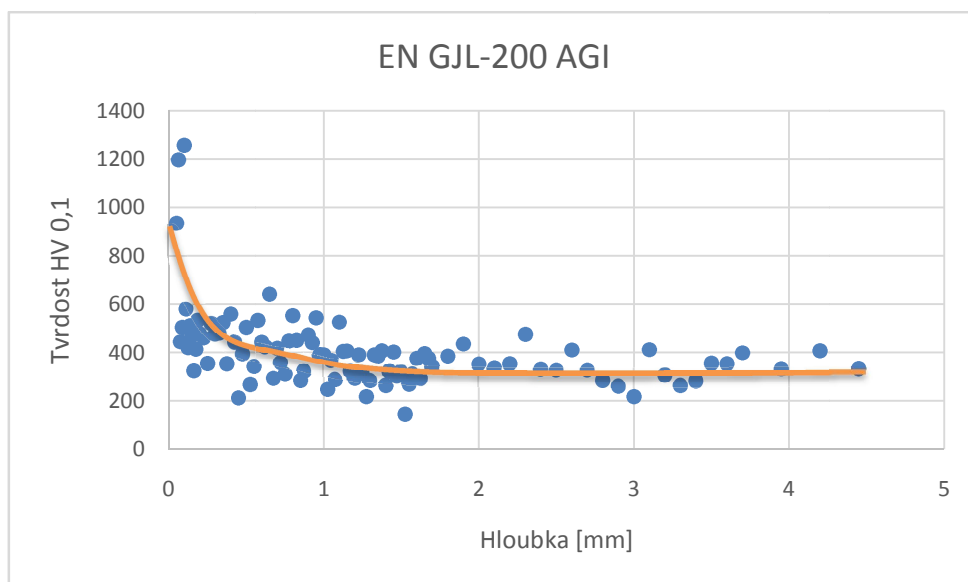
Z naměřených tvrdostí v případě litiny AGI EN GJL-200 je zřejmé, že povrchově zakalená vrstva dosahuje přibližně stejné hloubky jako v případě litiny s lupínkovým grafitem – viz Obr. 27. Vrstva dosahuje tloušťky přibližně 0,3 mm. Tvrdost ausferitu v jádře je mírně vyšší než v případě perlitické struktury v předchozím případě litiny s lupínkovým grafitem.



Obrázek 27 - Průběh mikrotvrdosti v závislosti na hloubce pro vzorek EN GJL-200 AGI

Pro ověření vzorku EN GJL-200 AGI proběhlo druhé vyhodnocení mikrotvrdotí na jiném vzorku stejné litiny.

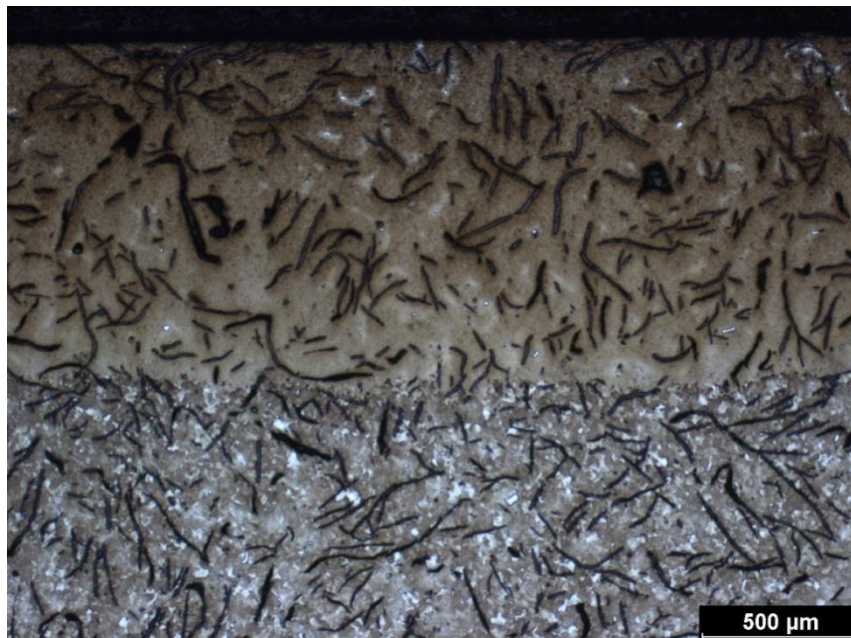
Mikrotvrdot je obdobná jako v případě předchozího vzorku, zakalená vrstva opět dosahuje hloubky přibližně 0,3 mm, přičemž s přechodem ke struktuře jádra se mikrotvrdot ustálí přibližně kolem hodnoty 350 HV_{0,1} – viz Obr. 28.



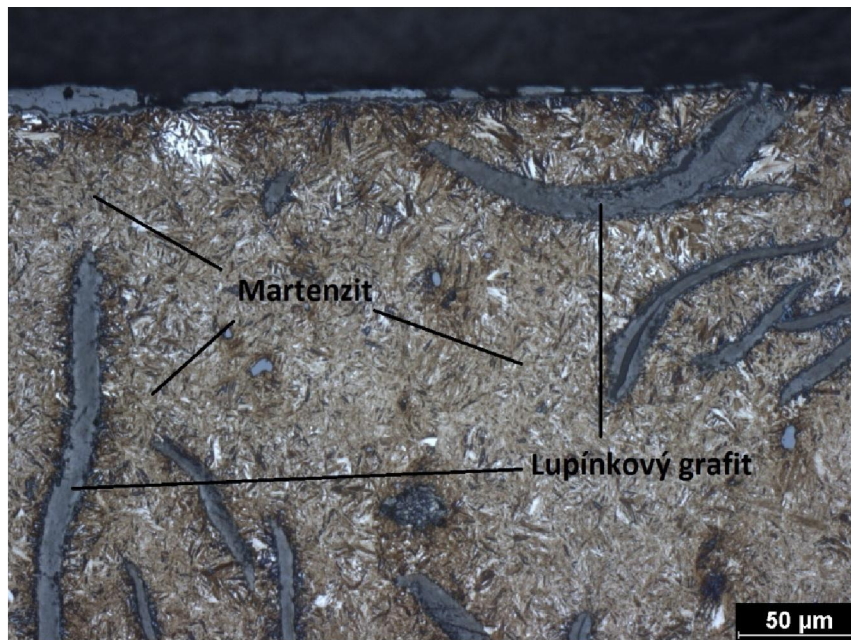
Obrázek 28 - Průběh mikrotvrdoti v závislosti na hloubce pro vzorek EN GJL-200 AGI

5.3.3 Litina EN GJL-250 Sn AGI

Na povrchu této izotermicky zpracované litiny s lupínkovým grafitem je po provedení laserového zakalení povrchu evidentní přítomnost jemnozrné martenzitické vrstvy – viz Obr. 29. Tato vrstva je při bližším pohledu souvislá až k povrchu vzorku – Obr. 30. Přítomnost pouze martenzitu je žádoucí a tvrdost a odolnost proti otěru budou s největší pravděpodobností nejlepší.

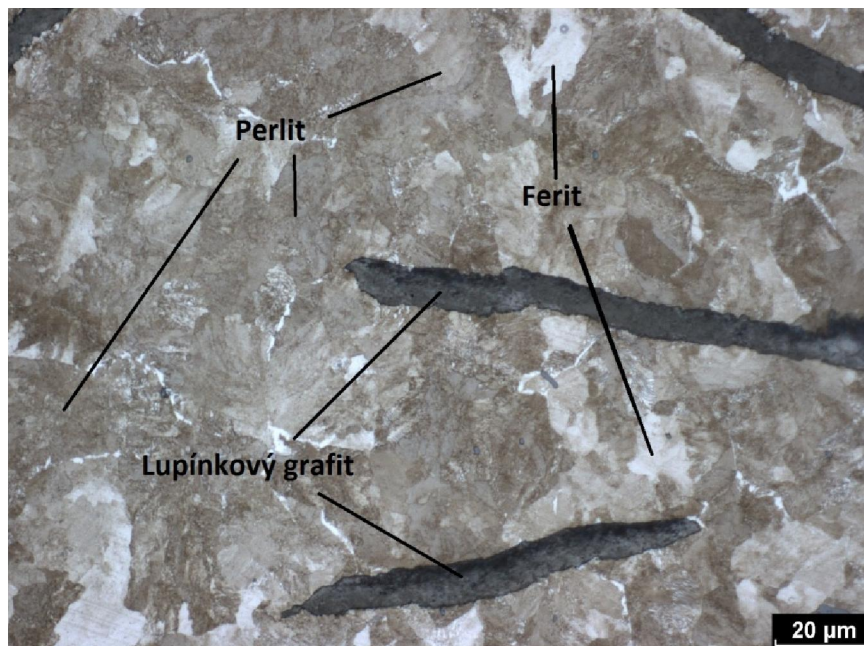


Obrázek 29 - Struktura laserově zakalené litiny EN GJL-250 Sn AGI



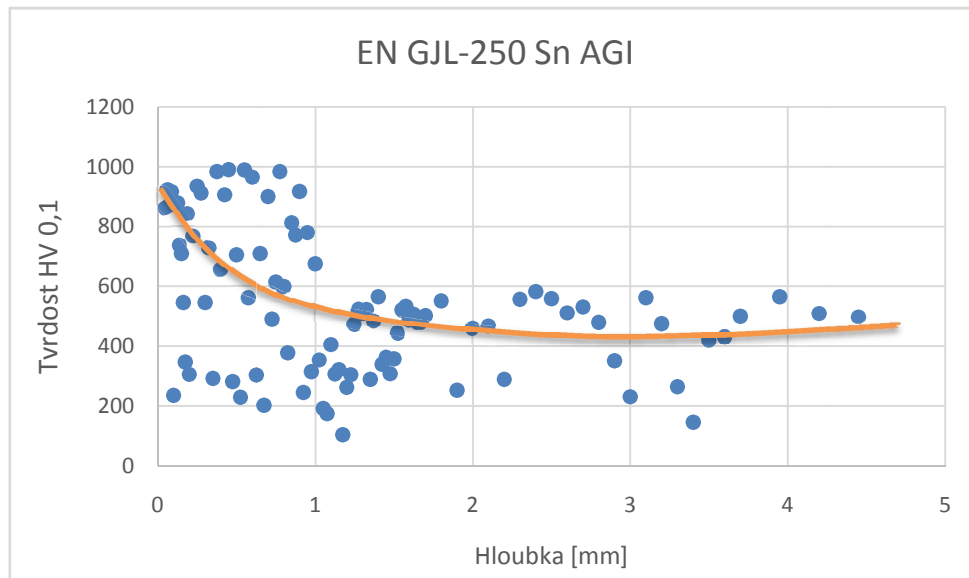
Obrázek 30 - Detail martenzitické struktury na povrchu vzorku EN GJL-250 Sn AGI

Struktura jádra je v případě vzorku EN GJL-250 Sn AGI převážně perlitická s menším podílem feritu – do 15 % – viz Obr. 31. Perlitická struktura souvisí s legurou cínu, jelikož cín dopomáhá k tvorbě perlitické matrice. [26]



Obrázek 31 - Detail struktury jádra vzorku EN GJL-250 Sn AGI

Z průběhu mikrotvrdoostí je zřejmé, že zakalená vrstva dosahuje do větší hloubky, přičemž okolo 0,7 mm dochází k přechodu ke struktuře jádra – viz Obr. 32.



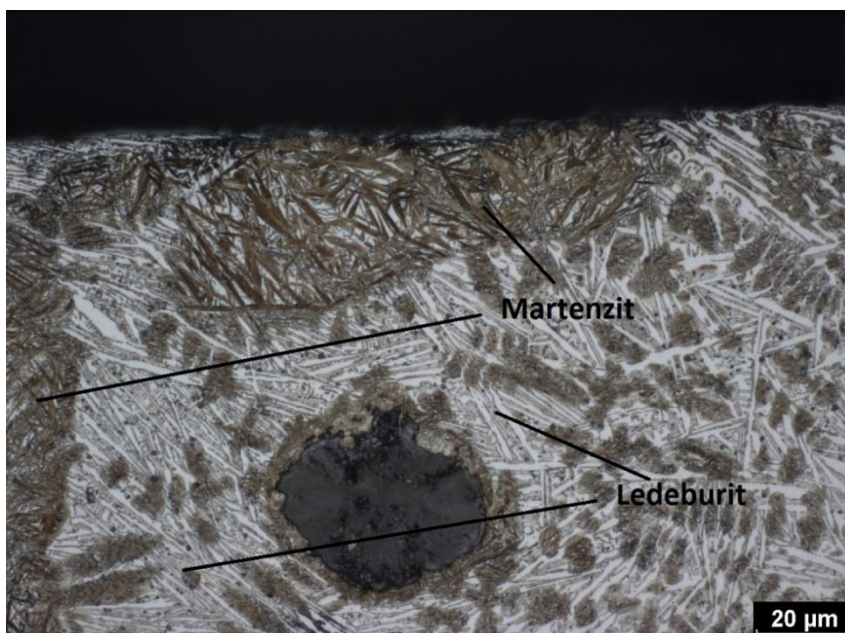
Obrázek 32 - Průběh mikrotvrdoostí v závislosti na hloubce pro vzorek EN GJL-250 Sn AGI

5.3.4 Litina EN GJS-700 CuNi ADI

Litina typu ADI je izotermicky zpracovaná litina s kuličkovým grafitem. Na povrchu tohoto vzorku je po povrchovém kalení patrná vrstva martenzitu a ledeburitu – viz Obr. 33. Místy se na povrchu vyskytuje martenzit a místy ledeburit – viz Obr. 34. Opět by bylo s největší pravděpodobností vhodné optimalizovat parametry kalení, aby byla eliminována přítomnost ledeburitu ve prospěch martenzitu.

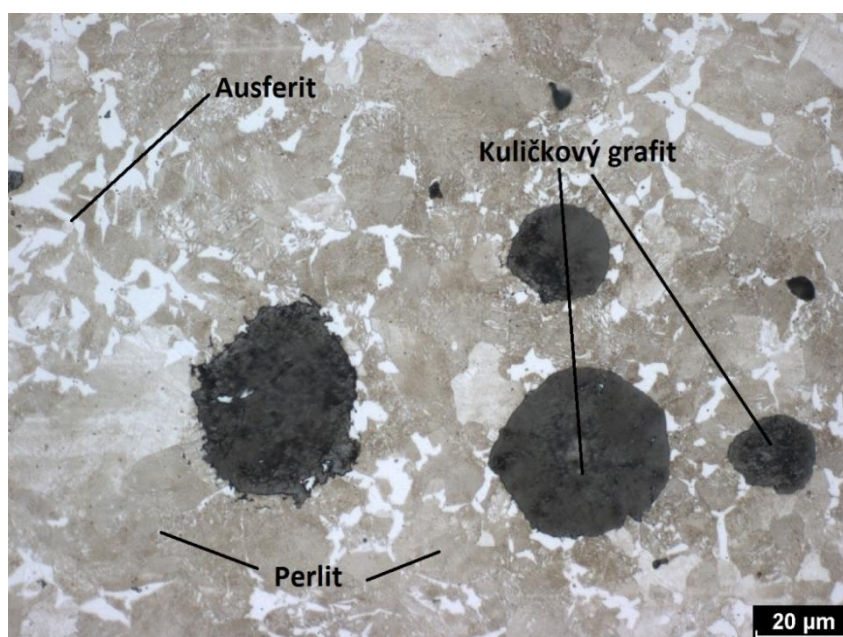


Obrázek 33 - Struktura povrchu vzorku ADI po laserovém povrchovém kalení



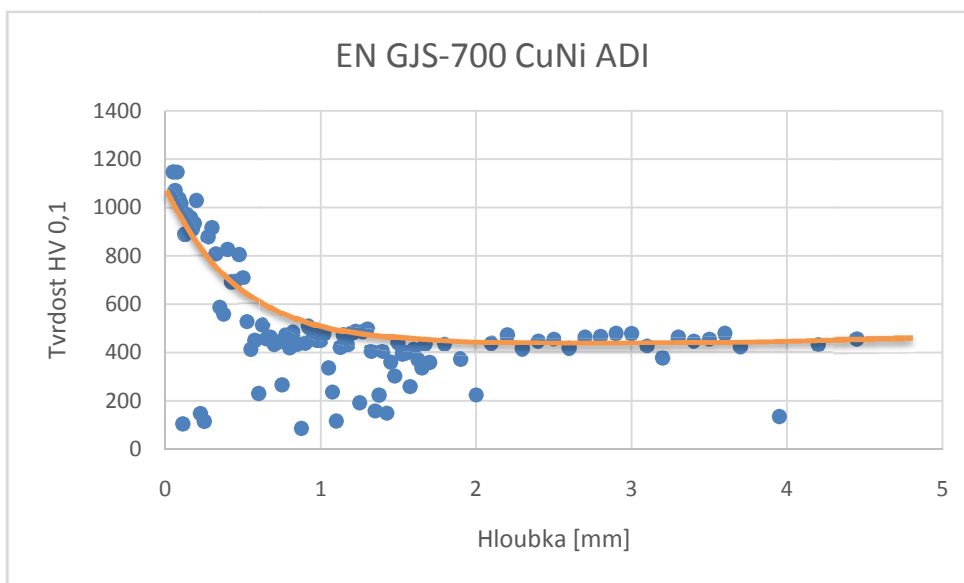
Obrázek 34 - Detail martenzitické a ledeburitické struktury u ADI litiny

Struktura jádra je v případě vzorku ADI složena z perlitu, ausferitu a kuličkového grafitu – viz Obr. 35. K částečně perlitické struktuře v jádře tohoto vzorku dopomáhají legury mědi a niklu, jelikož materiál ovlivňují obdobným způsobem jako křemík. V případě litin s kuličkovým grafitem též vedou ke vzniku více grafitických částic. [26]



Obrázek 35 - Struktura jádra vzorku EN GJS-700 CuNi ADI

V případě litiny ADI došlo podobně jako v případě vzorku EN GJL-250 Sn AGI k zakalení do větší hloubky, přibližně 0,7 mm. Tvrdost jádra je v případě této litiny podobná jako u vzorku předchozího a to přibližně kolem hodnoty 430 HV_{0,1} – viz Obr. 36.



Obrázek 36 - Závislost mikrotvrdosti a hloubky pro litinu typu ADI

5.4 Diskuze výsledků

Shrnuté naměřené hodnoty jsou znázorněny v Tabulce 4.

Tabulka 4: Shrnutí naměřených výsledků

Litina	Povrchová tvrdost [HV _{0,1}]	Tvrdost jádra [HV _{0,1}]	Tloušťka zakalené vrstvy [mm]	Nárůst tvrdosti [HV _{0,1}]
EN GJL-200	900	300	0,3	600
EN GJL-200 AGI	950	350	0,3	600
EN GJL-250 Sn AGI	950	450	0,7	500
EN GJS-700 CuNi ADI	1050	430	0,6	620

U litin s lupínkovým grafitem bylo dosaženo povrchového nárůstu na hodnoty dvojnásobku až trojnásobku tvrdosti jádra.

V případě litiny EN GJL-200 vzrostla tvrdost z 300 HV_{0,1} na 900 HV_{0,1}, tedy nárůst na trojnásobnou hodnotu. Tvrzená vrstva dosahuje do hloubky 0,3 mm, přičemž do 0,1 mm se jedná o vrstvu převážně ledeburitickou, posléze do 0,3 mm jde o martenzit.

Obdobné hloubky tvrzené vrstvy bylo dosaženo u vzorku litiny EN GJL-200 AGI, též došlo k bezmála trojnásobnému nárůstu tvrdosti z hodnoty 350 HV_{0,1} na 950 HV_{0,1}. Do 0,1 mm převažuje ledeburit a lokálně se vyskytuje až do hloubky 0,2 mm.

U izotermicky zpracované litiny legované cínem EN GJL-250 Sn AGI došlo k nárůstu ze 450 HV_{0,1} na 950 HV_{0,1}. Tvrzená vrstva v tomto případě dosahuje největší tloušťky 0,7 mm a je tvořena pouze jemným martenzitem.

Tyto hodnoty odpovídají výzkumu korejských kolegů z roku 2002, kteří zkoumali vliv laserového povrchového kalení na pístní kroužek z litiny s lupínkovým grafitem. V jejich výzkumu bylo taktéž dosaženo hloubky zakalené vrstvy 0,3 mm, avšak v našem případě docházelo k prudšímu poklesu mikrotvrdosti směrem k jádru vzorku. [27]

U vzorku izotermicky zpracované litiny s kuličkovým grafitem EN GJS-700 CuNi ADI došlo k růstu tvrdosti z hodnoty 430 HV_{0,1} na 1050 HV_{0,1}, tloušťka vytvrzené vrstvy je v tomto případě 0,6 mm. Do 0,1 mm převažuje ledeburit, do 0,2 mm jde o ledeburiticko-martenzitickou vrstvu a dále už se jedná o martenzit.

Pro obdobnou izotermicky zpracovanou litinu s kuličkovým grafitem je k dispozici výzkum španělských kolegů z roku 2011. V rámci tohoto výzkumu byly hodnoceny vzorky litiny EN GJS-800 ADI, kdy průběh tvrdosti i hloubka zakalené vrstvy byly obdobné, ovšem v našem případě byla změřena vyšší tvrdost povrchu vzorku 1050 HV oproti 850 HV v případě autorů práce. [28]

6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo popsat základní druhy litin a přiblížit jednotlivé druhy zlepšování jejich vlastností – legování a tepelné zpracování. V případě tepelného zpracování byla věnována zvláštní pozornost povrchovému kalení, hlavně pomocí laserů. Tento způsob vytvrzování povrchových oblastí materiálu je v poslední době velmi často využíván, jelikož po jeho užití povrchu značně vzroste tvrdost a otěruvzdornost. Povrchově se však obvykle kalí litiny s kuličkovým grafitem.

V rámci této bakalářské práce proběhlo vyhodnocování tvrdostí a mikrostruktury po laserovém povrchovém kalení u čtyř vzorků litin s lupínkovým grafitem, které se běžně povrchově nekalí a jednoho vzorku s kuličkovým grafitem u kterého je tento postup běžnější.

U tří ze čtyř vzorků litin s lupínkovým grafitem došlo vzhledem k malé velikosti vzorku k částečnému natavení povrchu a ke vzniku ledeburitické vrstvy na povrchu a až pod touto vrstvou se nacházela vrstva martenzitická, tento fakt však negativně neovlivnil nárůst tvrdosti, jelikož ledeburit má také vysokou tvrdost a v kombinaci s martenzitem jsou dosažené povrchové tvrdosti velmi vysoké.

V případě vzorků litiny EN GJL-200 došlo, ať už u izotermicky zpracovaného či nezpracovaného vzorku k stejným vzrůstům tvrdosti, avšak u izotermicky zpracované litiny je celková tvrdost vyšší.

V případě čtvrtého vzorku legovaného mědí a cínem, byla vytvořena jemnozrná martenzitická vrstva do hloubky 0,7 mm, ovšem vzhledem k nejvyšší tvrdosti jádra ze všech porovnávaných litin, byl u tohoto vzorku absolutní nárůst tvrdosti nejmenší. Hloubka zakalené vrstvy byla naopak největší.

Podobného nárůstu tvrdosti jako u izotermicky zpracované litiny s kuličkovým grafitem bylo dosaženo i u litin s lupínkovým grafitem.

Výhodou všech vyhodnocovaných litin je matrice, která snadno austenitizuje a tedy následné rychlé ochlazení zajistí martenzitickou strukturu bez přítomnosti proeutektoidních fází.

Celkově je dle výsledků experimentální části evidentní přínos laserového povrchového kalení, jelikož oproti nezakalenému jádru má povrch i několikanásobnou tvrdost. Po dalším zkoumání a optimalizaci procesu, ať už množstvím legujících prvků či změnou parametrů laserového kalení, by se vlastnosti litin s lupínkovým grafitem daly dále zlepšovat a možnosti jejich využití by se mohly značně rozšířit. Zde se nabízí pokračování výzkumu formou vyhodnocování vhodnosti či nevhodnosti přítomnosti ledeburitu v povrchově kalené vrstvě. Potenciál tohoto procesu je v každém případě enormní.

7 Bibliografie

- [1] HAMPL, Jiří. Metalurgie slévárenských slitin: studijní opora. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3585-3.
- [2] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. Teorie slévání. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04395-0.
- [3] MICHNA, Š., NOVÁ, I.: Technologie zpracování kovových materiálů. 1. vyd. Adin Prešov, 2008, ISBN 978-80-89244-38-6
- [4] ROUČKA, Jaromír. Metalurgie litin. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1263-1.
- [5] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. Nauka o materiálu I. a II.: cvičení. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [6] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. Brno: CERM, 1999. ISBN 80-7204-130-4.
- [7] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. Perspektivní materiály. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [8] SKÁLOVÁ, Jana, Vladislav MOTYČKA a Jaroslav KOUTSKÝ. Nauka o materiálech. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-677-0.
- [9] PODRÁBSKÝ, Tomáš, POSPÍŠILOVÁ, Simona. Struktura a vlastnosti grafitických litin [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství 2006. [cit. 2021-07-12]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/savgl/index.php>
- [10] MACEK, Karel, Petr ZUNA a Jiří JANOVEC. Tepelné zpracování kovových materiálů. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04186-4.
- [11] MUŽÍK T.: Kalení laserem, Sborník rychlé ohřevy v TZ, indukční kalení, elektronový paprsek, 25.4.2019, Praha.
- [12] STOLAR P.: Materiálové základy rychlých ohřevů, Sborník rychlé ohřevy v TZ, indukční kalení elektronový paprsek, 25.4.2019, Praha.
- [13] Hlavní typy laserů používaných v průmyslu [online]. Copyright © 2021 Megaflex. [cit. 12.07.2021]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
- [14] Kalení efektivně a ekologicky pomocí laseru - LASCAM systems. [online]. Copyright © LASCAM systems s.r.o. [cit. 12.07.2021]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/kaleni-laserem/>

- [15] Možné dělení typů a druhů laserů - Leonardo technology s.r.o. - Automatizace průmyslového značení. Leonardo technology s.r.o. - Automatizace průmyslového značení [online]. Copyright © 2002 [cit. 12.07.2021]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>
- [16] Process of heat treatment of ADI cast iron | Download Scientific Diagram. ResearchGate | Find and share research [online]. Copyright © 2008 [cit. 12.07.2021]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Process-of-heat-treatment-of-ADI-cast-iron_fig2_228533241
- [17] PTÁČEK, L., KOLEKTIV. Nauka o materiálu I. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-7204-283-1.
- [18] Měření tvrdosti v kostce - metoda Vickers - Metalco Testing s.r.o.. Metalco Testing - Váš partner pro testování materiálů [online]. Copyright © Metalco Testing s.r.o., všechna práva vyhrazena [cit. 29.03.2021]. Dostupné z: <https://www.metalco.cz/mereni-tvrdosti-v-kostce-metoda-vickers/>
- [19] Zkouška tvrdosti podle Knoopa | HanykoPrahaHanyko Praha. Zařízení pro zkoušení materiálůHanyko Praha | Vše pro zkoušení materiálů. [online]. Copyright © [cit. 13.05.2021]. Dostupné z: <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrdost-a-jak-se-meri/zkouska-tvrdosti-podle-knoopa/>
- [20] Buehler – Metallography Equipment & Supplies for Sample Preparation [online]. Copyright © [cit. 14.05.2021]. Dostupné z: https://www.buehler.com/assets/solutions/technotes/vol1_issue6.pdf
- [21] VickersHardness Tester | Qualitest. Qualitest | WorldofTest.com | QualityControl& Testing Equipment and MaterialsTesters [online]. Copyright © 1999 [cit. 14.05.2021]. Dostupné z: <https://www.worldoftest.com/vickers-hardness-tester>
- [22] ChinaVickersKnoopHardness Test Measurement Software - China Software, Hardness Test. ChinaHardness Tester manufacturer, Profile Projector, Video MeasuringMachinesupplier - Sinowon Innovation Metrology Manufacture Limited [online]. Copyright © 1998 [cit. 14.05.2021]. Dostupné z: <https://sinowon2014.en.made-in-china.com/product/VbBxiLyKASTP/China-Vickers-Knoop-Hardness-Test-Measurement-Software.html>
- [23] Nanohardness. ScienceDirect.com | Science, health and medicaljournals, full text articles and books. [online]. Copyright © [cit. 13.05.2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/nanohardness#:~:text=Nanohardness%20testing%20refers%20to%20hardness,the%20range%200.1%E2%80%93100%20mN.>

[24] Analytické, vědecké a laboratorní přístroje | LECO. Analytické, vědecké a laboratorní přístroje | LECO [online]. Copyright © 2019. Všechna práva vyhrazena. [cit. 14.07.2021]. Dostupné z: <https://cz.leco.com/>

[25] Quality and Environment | Kovolit. Redirecting to <https://www.kovolit.cz/cs> [online]. Copyright © 2017 Copyright Kovolit a.s. [cit. 14.07.2021]. Dostupné z: <https://www.kovolit.cz/en/quality-and-environment>

[26] Stabilizing Pearlite In Gray Cast Iron. - Free Online Library. Free News, Magazines, Newspapers, Journals, Reference Articles and Classic Books - Free Online Library [online]. Copyright © 2021 [cit. 15.07.2021]. Dostupné z: <https://www.thefreelibrary.com/Stabilizing+Pearlite+In+Gray+Cast+Iron.-a068660871>

[27] HWANG, JH., KIM, DY., YOUN, JG. et al.: Laser surface hardening of gray cast iron used for piston ring, J. of Materi Eng and Perform 11, 2002. Dostupné z: <https://doi.org/10.1361/105994902770344105>

[28] SORIANO, C., LEUNDA, J., LAMBARRI, J., GARCÍA NAVAS, V., SANZ, C.: Effect of laser surface hardening on the microstructure, hardness and residual stresses of austempered ductile iron grades, Applied Surface Science, 2011. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433211004235>

8 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Metastabilní rovnovážný diagram Fe – Fe ₃ C.....	12
Obrázek 2 - Stabilní rovnovážný diagram Fe - grafit v porovnání s metastabilním	12
Obrázek 3 - Tvar a rozložení grafitu v litinách.....	17
Obrázek 4 - Vrubové účinky lupínků grafitu	18
Obrázek 5 - Pseudobinární diagram Fe-C-Si pro 2% Si	19
Obrázek 6 - DPSS s bočním buzením	34
Obrázek 7 - DPSS se zadním buzením	34
Obrázek 8 - Princip vláknového laseru	35
Obrázek 9 - Schéma deskového laseru	37
Obrázek 10 - Zatížení a značení vtisku u zkoušky dle Vickerse.....	39
Obrázek 11 - Indentor pro zkoušku dle Knoopa	41
Obrázek 12 - Digitální Vickersův mikrotvrdoměr	43
Obrázek 13 - Měření úhlopříček vtisku ve speciálním softwaru.....	43
Obrázek 14 – Povrchově zakalený litinový vzorek.....	46
Obrázek 15 - Metalografická rozbrušovací pila značky LECO	47
Obrázek 16 - Metalografický lis značky LECO	48
Obrázek 17 - Leštička LECO GPX300.....	48
Obrázek 18 - Metalografický mikroskop Neophot 32	49
Obrázek 19 - Schematické znázornění postupu při měření mikrotvrdostí.....	50
Obrázek 20 - Struktura laserově zakalené LLG při stonásobném zvětšení	51
Obrázek 21 - Detail povrchové vrstvy, znatelná vrstva martenzitu a ledeburitu	52
Obrázek 22 - Struktura jádra LLG - detail	52
Obrázek 23 - Průběh mikrotvrdosti v závislosti na hloubce pro litinu s lupínkovým grafitem.....	53
Obrázek 24 - Struktura laserově zakalené litiny AGI EN GJL-200.....	54
Obrázek 25 - Detail povrchově zakalené vrstvy, znatelný martenzit a ledeburit	55
Obrázek 26 - Detail ausferitické struktury v jádru litiny AGI EN GJL-200.....	55
Obrázek 27 - Průběh mikrotvrdosti v závislosti na hloubce pro vzorek AGI EN GJL-200.....	56
Obrázek 28 - Průběh mikrotvrdosti v závislosti na hloubce pro vzorek AGI EN GJL-200.....	57
Obrázek 29 - Struktura laserově zakalené litiny AGI EN GJL-250 Sn	58
Obrázek 30 - Detail martenzitické struktury na povrchu vzorku AGI EN GJL-250 Sn	59
Obrázek 31 - Detail struktury jádra vzorku AGI EN GJL-250 Sn.....	59
Obrázek 32 - Průběh mikrotvrdosti v závislosti na hloubce pro vzorek AGI EN GJL-250 Sn ...	60
Obrázek 33 - Struktura povrchu vzorku ADI po laserovém povrchovém kalení	61
Obrázek 34 - Detail martenzitické a ledeburitické struktury u ADI litiny	62
Obrázek 35 - Struktura jádra vzorku ADI.....	62
Obrázek 36 - Závislost mikrotvrdosti a hloubky pro litinu typu ADI	63