

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

POVRCHOVÉ KALENÍ VYBRANÝCH DRUHŮ GRAFITICKÝCH LITIN

AUTOR: Karel Novotný

STUDIJNÍ PROGRAM: Teoretický základ strojího inženýrství

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

PRAHA 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Novotný	Jméno: Karel	Osobní číslo: 466696
Fakulta/ústav:	Fakulta strojní		
Zadávací katedra/ústav:	Ústav materiálového inženýrství		
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství		
Studijní obor:	bez oboru		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Povrchové kalení vybraných druhů grafitických litin

Název bakalářské práce anglicky:

Surface hardening of selected graphite cast irons

Pokyny pro vypracování:

Literární rešerše v oblasti povrchového kalení litin se zaměřením na indukční a laserové metody. Metalografické hodnocení vlivu povrchového kalení na mikrostrukturu vybraných druhů litin. Porovnání průběhů tvrdosti v povrchových vrstvách v závislosti na použité technologii povrchového kalení. Vyhodnocení a diskuse výsledků. Závěry.

Seznam doporučené literatury:

[1] Mužik T.: Kalení laserem, Sborník Rychlé ohřevy v TZ, Indukční kalení, elektronový paprsek, 25. 4. 2019, Praha.
[2] Mores A., Horník J., Odehnal J., Skrbek B., Němec M., Krčil J.: Povrchové laserové kalení feritické litiny s kuličkovým grafitem se zvýšeným obsahem Si, 55. Slévárenské dny 2018, Sborník sekce Metalurgie litin.
[3] Björkegren L. E., Hamberg K.: Silicon Alloyed Ductile Iron with Excellent Ductility and Machinability, In Proc. 2003 Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, Hilton Head, SC, Oct.2003

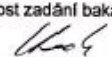
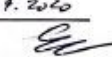

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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: **30.04.2020** Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

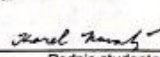
Platnost zadání bakalářské práce: 30.9.2020

 Ing. Jakub Horník, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	 prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc. podpis vedoucí(ho) ústavukatedry	 prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. podpis otkazatelky
---	--	---

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.

03.06.2020 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 stručným popisem běžných druhů litin a různými metodami jejich tepelného zpracování. Detailněji se dále zabývá povrchovým kalením, především povrchovým kalením laserem. V praktické části je vyhodnocena mikrostruktura vybraných druhů litin po povrchovém kalení a zjišťována hloubka zakalené vrstvy metalograficky a měřením průběhu tvrdosti.

Klíčová slova

Litiny, tepelné zpracování litin, povrchové kalení indukční a laserem, mikrostruktura

Annotation

This bachelor thesis starts with basic information about most common cast irons, their alloying elements and different methods of heat treatments. Surface hardening is described in more detail, especially surface hardening by laser. Experimental part regards evaluation of certain materials after surface hardening by laser or induction heating, measuring the depth of hardened layer and its hardness.

Keywords

Cast irons, heat treatment of cast irons, surface hardening by laser, surface hardening by induction, microstructure

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Jakubu Horníkovi, Ph.D. za ochotu, věnovaný čas, trpělivost a veškerou pomoc, díky které jsem mohl dokončit tuto bakalářskou práci. Dále bych chtěl také poděkovat Bc. Veronice Mazáčové a Ing. Janu Krčilovi za veškerou pomoc v laboratořích. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

Obsah

1	Úvod	9
2	Litiny	9
2.1	Grafitické litiny	11
2.1.1	Litina s lupínkovým grafitem (LLG)	12
2.1.2	Litina s kuličkovým grafitem (LKG)	13
2.1.3	Litina s červíkovitým grafitem (LVG).....	14
2.1.4	Temperovaná litina (TL).....	15
2.2	Karbidické litiny	16
2.2.1	Bílá litina	16
2.2.2	Tvrzená litina	16
2.3	Legované litiny	17
3	Tepelné zpracování litin	20
3.1	Žihání.....	20
3.2	Kalení.....	21
3.2.1	Povrchové kalení.....	23
3.2.1.1	Indukční kalení	24
3.2.1.2	Kalení plamenem.....	25
3.2.1.3	Laserové kalení.....	25
	CO ₂ lasery.....	26
	Pevnolátkové lasery	27
	Polovodičové lasery	29
3.3	Zušlechťování	30
3.4	Chemicko-tepelné zpracování	31
4	Zkoušky tvrdosti	32
4.1	Zkouška tvrdosti dle Rockwella.....	32
4.2	Zkouška tvrdosti dle Vickerse	34
4.3	Zkouška tvrdosti dle Brinella.....	35
5	Elektronová mikroskopie.....	36
6	Analýza mikrostruktury materiálu.....	39

7	Experimentální část.....	42
7.1	Materiál použitý v experimentální části	42
7.2	Metalografie a měření tvrdosti.....	46
7.2.1	Příprava vzorků	46
7.2.2	ADI 900-8	47
7.2.3	AGI GJL 250	52
7.2.1	EXTRA L – 1A.....	57
7.2.2	EXTRA L – 5	61
8	Závěr.....	65
9	Bibliografie	66
10	Seznam obrázků	68

1 Úvod

Litiny tvoří největší podíl ze všech slévárenských slitin. V současnosti je nejvíce odlitků vyráběno z litiny s lupínkovým grafitem (LKG). I když jsou litiny dnes někdy nahrazovány oceli kvůli výhodnějším výrobním a uživatelským parametrům, nové typy litin (jako např. litina s červíkovitým grafitem) přinášejí vysoký pokrok v mechanických a technologických vlastnostech. Proto litiny nachází velké užití v automobilovém průmyslu a dalších strojírenských oblastech.

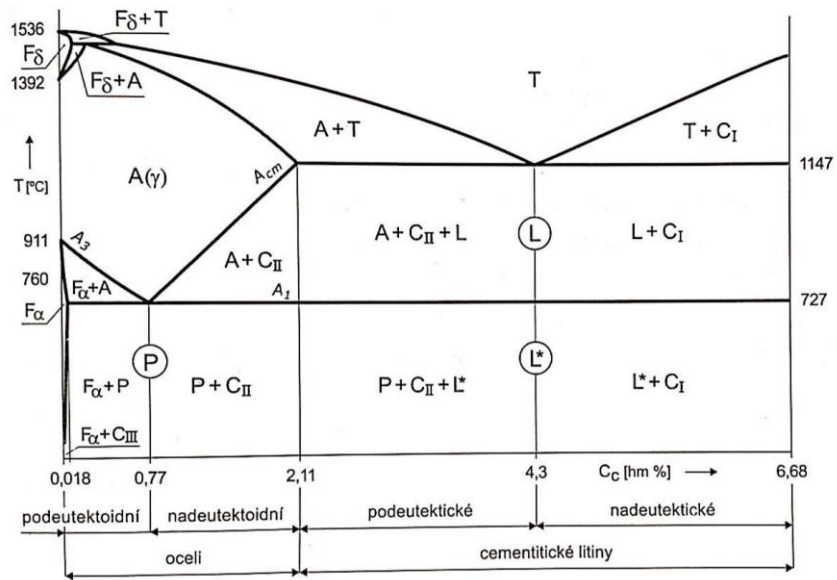
Cílem této bakalářské práce je seznámení se s nejběžnějšími druhy litin, význam nejčastějších legujících prvků a popis vybraných druhů tepelného zpracování litin, především povrchového kalení laserem.

2 Litiny

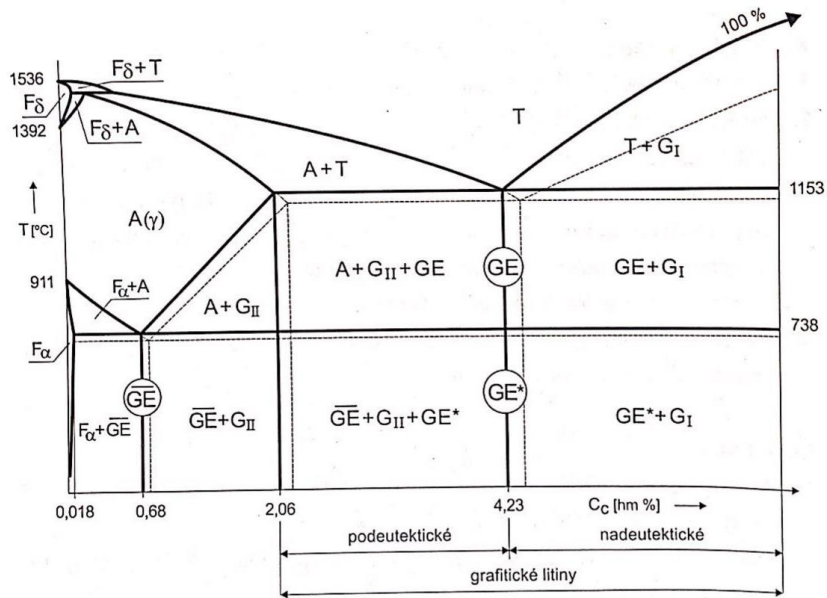
Litiny jsou slitiny železa a uhlíku a dalších prvků. Hlavním rozdílem od ocelí je rozdíl obsahu uhlíku. Obvykle v litinách obsah uhlíku přesahuje mezní rozpustnost v austenitu za eutektické teploty. Dalším rozdílem oproti ocelím bývá větší množství příměsí [1] [2].

Litiny se vyrábějí převážně ze surového železa a kovového odpadu ve slévárenských pecích. Velmi často se využívají v konstrukci, jsou levné na výrobu a jejich velkou výhodou jsou dobré technologické vlastnosti [1].

Strukturu litin vždy tvoří primární fáze a eutektikum. Obecně můžeme litiny rozdělit na dva základní druhy. První skupina, kde se vyskytuje volný uhlík, se nazývá grafitické litiny. Ve druhé skupině se objevuje uhlík vázaný v cementitu. Této skupině říkáme karbidické litiny. Podle tohoto rozdělení se fázové přeměny řídí metastabilním rovnovážným diagramem u cementitických litin (Obr. 1) a stabilním u grafitických (Obr. 2) [2] [3].



Obr. 1 Rovnovážný metastabilní diagram Fe - Fe₃C [2]



Obr. 2 Rovnovážný stabilní diagram Fe - C (v porovnání s metastabilním) [2]

2.1 Grafitické litiny

Grafitické litiny se řadí k nejstarším a zároveň dodnes používaným konstrukčním materiálům. Lomová plocha se u těchto litin zbarvuje do šeda. Obecně mají velmi dobré slévárenské vlastnosti a za použití různých tepelných zpracování lze dosáhnout velmi dobré užitkové vlastnosti, které jsou srovnatelné s mnohem dražšími materiály. Ve srovnání s ocelí se lépe obrábějí, mají větší tlumící schopnost, menší měrnou hmotnost, vrubovou citlivost a vhodným legováním lze také dosáhnout vyšší otěruvzdornosti, žáruvzdornosti a korozivzdornosti [1] [3].

Vlastnosti jednotlivých typů grafitických litin ovlivňuje významně jejich základní kovová hmota – matrice, která má několik druhů, dále pak tvar, rozložení a množství samotného grafitu. Ten se může v těchto litinách vyskytovat jako lupínkový, pavoučkovitý, červíkovitý, kuličkový nebo vločkovitý. Tvar grafitu ovlivňuje velikost vrubového účinku – koncentrace napětí na koncích útvaru. Čím jsou hrany ostřejší, tím je vrubový účinek větší [1] [3].

Obecně můžeme grafit rozdělit na 3 druhy podle jeho vzniku: eutektický, primární a grafit vznikající rozpadem metastabilních složek při tepelném zpracování. Eutektický grafit vzniká při tuhnutí eutektika a společně s austenitem tvoří grafitické eutektikum. Primární grafit vzniká jako fáze během tuhnutí nadeutektických litin. Má negativní vliv na mechanické vlastnosti [1].

Strukturu matrice nelegovaných litin vždy tvoří perlit, ferit nebo jejich směs. Nejčastěji se jedná o lamelární perlit a s jeho rostoucím obsahem se zvyšuje pevnost, odolnost proti opotřebení, ale klesá houževnatost. Naopak s větším množstvím feritu pevnost klesá a u některých typů grafitických litin dochází ke zvýšení houževnatosti [1] [4] [5].

2.1.1 Litina s lupínkovým grafitem (LLG)

Litina s lupínkovým grafitem, dříve označovaná jako šedá litina, je jedním z nejrozšířenějších materiálů v oblasti slévání. Grafit má na metalografickém výbrusu tvar lupínků, jejichž délka je podstatně větší než jejich tloušťka (Obr. 3). [1] [3]

Vyznačuje se dobrými mechanickými vlastnostmi. Mezi její nevýhody patří nízká houževnatost a nízká pevnost. Její pevnost v tlaku je až 4× větší než pevnost v tahu. Dále má výborné útlumové schopnosti, a proto nachází často využití jako materiál pro lože obráběcích strojů, různé držáky, čerpadla, kompresory a turbínové skříně. LLG také nachází velké užití v automobilovém průmyslu, kde se např. velmi často používá při pro skříně převodovek, bloky válců atd. [1] [4] [5].

Většinou se v průmyslu používá LLG v podeutektické formě, jejíž složení bývá: 2,5 - 4 % C, 1,7 – 2,5 % Si, 0,5 – 1 % Mn, 0,2 – 0,6 % P a max 15 % S. Velmi důležitou přísadou je křemík, který svým grafitizačním účinkem kompenzuje vliv manganu a zaručuje vznik grafitického eutektika. To znamená, že původně podeutektická litina s vyšším obsahem křemíku bude tuhnut jako soustava eutektická, popř. nadeutektická [1] [6].



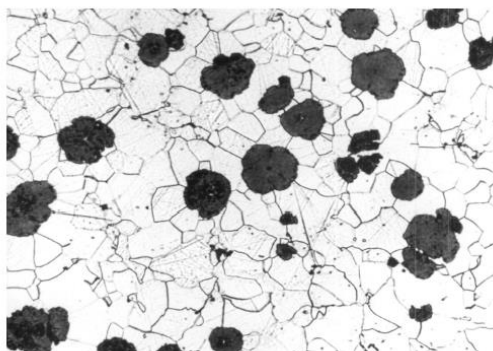
Obr. 3 Lupínkový grafit [3]

2.1.2 Litina s kuličkovým grafitem (LKG)

Grafitická litina, která má ve své struktuře grafit ve tvaru kulovitých zrn (Obr. 4), se nazývá litina s kuličkovým grafitem, dříve tvárná litina. Tvorba kuličkovitého grafitu nastává v případě, kdy je do taveniny přidáno dostatečné množství modifikátoru, obvykle hořčíku, který zajistí jeho tvorbu. LKG se vyrábí jako podeutektická i nadeutektická. Její složení bývá obvykle v těchto mezích: 3,2 – 4 % C, 1,8 – 3 % Si, 0,2 – 0,8 % Mn, max 0,1 % P, max 0,05 % S a 0,03 - 0,08 % Mg [1] [6].

Svémi mechanickými a technologickými vlastnostmi tvoří LKG přechod mezi litinou s lupínkovým grafitem a ocelí. Mezi její hlavní výhody oproti litině s lupínkovým grafitem patří poměrně velká houževnatost, lepší plasticita a vyšší modul pružnosti, který se pohybuje mezi 160 GPa až 180 GPa. To je způsobeno právě vhodnějším tvarem grafitu s nižším vrubovým účinkem. Vzhledem k náročnější výrobě je cena tvárné litiny vyšší (přibližně 2×) než litiny s lupínkovým grafitem (ale stále je LKG levnější než oceli).

Litina s kuličkovým grafitem je v současnosti velmi důležitým konstrukčním materiálem a její využití se stále rozšiřuje. V automobilovém průmyslu se z ní vyrábějí skříně převodovek, ložiskové skříně, vačkové a klikové hřídele a ozubená kola [1] [4] [5] [7].



Obr. 4 Kuličkový grafit [3]

2.1.3 Litina s červíkovitým grafitem (LVG)

Tato grafitická litina, která obsahuje červíkovitý grafit, se také nazývala litina vermikulární. Její grafit (Obr. 5) je podobný tomu, který se vyskytuje v litině s lupínkovým grafitem, ale liší se rozměry. Útvary grafitu v LVG jsou kratší, tlustší a konce jsou zaoblené.

V porovnání s LLG má litina s červíkovitým grafitem lepší pevnostní vlastnosti a mírně lepší tepelnou vodivost. LKG má pevnostní vlastnosti sice ještě lepší, ale má mnohem nižší vodivost tepla. Proto je LVG vhodná pro tepelně namáhané odlitky. Nachází například velké využití v automobilovém průmyslu, kde slouží na výrobu bloků válců motoru či brzdových třmenů.

Výroba LVG je patentově chráněna. Tavenina se buď zpracuje modifikační přísadou, která vyvolává vznik kuličkového grafitu, ale ne v takovém množství, aby mohl úplně vzniknout. Druhou možností je přidání prvku, který brání vzniku kuličkového grafitu (např. titan), do litiny [1] [3] [4] [5].



Obr. 5 Červíkovitý grafit ve feriticko-perlitické matrici [3]

2.1.4 Temperovaná litina (TL)

Temperovaná litina, dříve nazývána litina s vločkovitým grafitem (Obr. 6), je výsledkem tepelného zpracování (tzv. temperování) bílé litiny. Vyznačuje se dobrou pevností, houževnatostí, má dobré třecí vlastnosti a je velmi dobře obrobitelná. Celkově se svými vlastnostmi velice podobá litině tvárné.

Její složení obvykle bývá: 2,2 – 3,2 % C, 0,7 – 1,5 % Si, 0,3 – 1,2 % Mn, 0 - 0,1 % P, 0,05 – 0,15 % S [1] [4] [5].

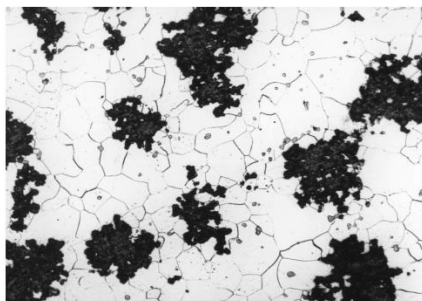
Podle převládajícího rozsahu grafitizace cementitu se dají získat tři druhy temperované litiny:

1. temperovaná litina s černým lomem
2. temperovaná litina s bílým lomem
3. perlitická temperovaná litina

Temperovaná litina s černým lomem vzniká tepelným zpracováním, při kterém je veškerý uhlík vyloučen ve formě temperovaného grafitu. Tento proces má dvě fáze. Při první se rozpadá cementit a vzniká temperovaný grafit. Teplota žíhání je okolo 950°C. V druhé fázi se získává požadovaná struktura. Tímto druhým stupněm žíhání lze také dosáhnout perlitické struktury.

Temperovaná litina s bílým lomem vzniká žíháním bílé litiny při teplotě kolem 1050°C. Během toho probíhá proces grafitizace a oduhličování povrchu odlitku. Na povrchu tím pádem dochází k úbytku uhlíku a tím se porušuje rovnováha cementitu a austenitu. Aby se rovnováha obnovila, musí na povrch difundovat uhlík zevnitř odlitku. Toto je možné pouze u odlitků s tenkou stěnou. Tímto způsobem vznikají jednotlivá pásma struktur, která jsou charakteristická pro litinu s bílým lomem.

Poslední typ se získá rozkladem ledeburitického cementitu během žíhání v neutrálním prostředí a následným ochlazováním, které je vedeno tak, aby proběhla metastabilní přeměna austenitu na perlit. Výsledná struktura je pak tvořena vločkovým grafitem a lamelárním perlitem [1] [4].



Obr. 6 Vložkovitý grafit [3]

Velkou nevýhodou temperované litiny je její smrštivost, a tak není vhodná pro výrobu velkých součástí. Proto nachází užití především v malých dílech (v automobilovém průmyslu využívána např. pro výrobu těhlic) [1] [5].

2.2 Karbidické litiny

2.2.1 Bílá litina

Bílá litina je tvořena směsí cementitu a perlitu, který vznikl z austenitu. Volný cementit způsobuje vysokou křehkost, odolnost vůči opotřebení a tvrdost, která se se stoupajícím podílem cementitu zvětšuje. Dále lze její tvrdost ještě navýšit martenzitickým kalením.

Právě kvůli velké křehkosti a špatné obrobitelnosti je využití bílé litiny velmi omezené. Lze ji využít pro výrobu temperované litiny nebo na jednoduché odlitky, jako jsou mlecí desky, lopatky metacích kol tryskačů nebo koule drtičů. V obou případech se využívá v podeutektické koncentraci (malý obsah uhlíku – 2,11 % až 4,3 %) [1] [4] [5].

2.2.2 Tvrzená litina

Tvrzená litina je tzv. přechodový typ, jelikož obsahuje jak grafitické, tak cementitické eutektikum. Výroba odlitků z tvrzené litiny je založena na kontrole krystalizace při tuhnutí odlitku. Cílem je dosáhnout takové rychlosti ochlazování do určité hloubky od povrchu, aby

byla potlačena tvorba grafitického eutektika a proces probíhal podle metastabilního diagramu. Zbytek tuhne za pomalejší rychlosti ochlazování za vzniku grafitu.

Vzhledem k těmto vlastnostem nachází tvrzená litina užití tam, kde je třeba, aby měla součást otěru odolný a tvrdý povrch jako např. hutní a mlýnské válce, vagonová kola ... [1] [4] [5].

2.3 Legované litiny

Legování je proces, při kterém úmyslně přidáváme určité prvky do litiny za účelem změny výsledných vlastností. U litiny s lupínkovým grafitem přidáním Ni, Cr, Mo nebo Cu lze dosáhnout větší pevnosti, tvrdosti a houževnatosti. Přidání Cr má také za následek větší korozní odolnost, stejný účinek má Si. Lepší žáruvzdornost se získává za pomoci Si, Al nebo Cr.

U bílé litiny, kde je uhlík vázán ve formě cementitu, lze legováním Cr, Mn, V, Mo či Ni dosáhnout větší odolnosti proti opotřebení.

Obecně se legované litiny rozdělují podle dvou kritérií, podle vylepšených vlastností nebo podle rozhodujícího legujícího prvku.

Podle prvního kritéria se legované litiny dělí do čtyřech základních skupin:

1. litiny žáruvzdorné
2. litiny korozivzdorné
3. litiny odolné proti opotřebení
4. litiny se zvýšenými mechanickými vlastnostmi.

Je-li vyžadována velmi vysoká odolnost proti opotřebení, musí se použít středně až vysoce legované bílé litiny.

V případě poslední skupiny se obvykle jedná o grafitické litiny. Jako legovací přísady se nejčastěji používají chrom (do 1 %), molybden (do 0,8 %), nikl (do 3 %) a vanad (do 0,5 %). Výsledná struktura je pak po tepelném zpracování buď perlitická, martenzitická nebo

bainitická. Tyto litiny se používají např. pro odlévání ozubených kol, vačkových hřídelů [1] [4] [5].

Podle druhého kritéria se legované litiny dělí na:

1. litiny legované hliníkem
2. litiny legované křemíkem
3. litiny legované niklem
4. litiny legované chrómem

Legováním hliníkem se získávají litiny odolné vůči oxidaci a vzniku okují. Dále se zvyšuje jejich korozivzdornost. Je pro ně typická nízká hustota a vysoký elektrický odpor. Rozsah legování hliníkem je poměrně široký - 1 – 30 %. Litiny s obsahem hliníku do 2 % se využívají na výrobu výfuků a výfukových vedení. Litiny s vyšším obsahem Al, např. 22 % Al a 2 % B se používají na žárovečné odlitky s vysokou pevností. Odlitky s obsahem Al od 22 % do 34 % a obsahem Si od 3 % do 5 % tvoří skupinu nemagnetických litin s velmi malou permeabilitou.

Dva největší zástupci druhé skupiny jsou litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem, kde křemík tvoří až 20 %. Křemík velmi napomáhá žáruvzdornosti. Pro druhy s vyšším obsahem Si je typická vyšší pevnost, která je ovšem na úkor nižší tažnosti, a chemická odolnost. Proto se využívají např. na odlitky čerpadel kyselin. Dále např. u LKG křemík zlepšuje výrazně mechanické vlastnosti.

Předposlední skupinu tvoří litiny legované niklem. Ten zvyšuje pevnost, korozivzdornost, žáruvzdornost a odolnost proti opotřebení. Podle obsahu niklu se tyto litiny rozdělují na 2 skupiny: "Ni-hard" s obsahem Ni do 6 % a "Ni-resist" s obsahem Ni od 13 % do 35 %.

Litiny "Ni-hard" mají vysokou odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Tato vlastnost se zlepšuje přímou úměrou s obsahem uhlíku, ale zároveň se tím snižuje rázová odolnost. Jejich využití se nachází například u oběžných kol čerpadel, mlecích koulí atd [1] [4] [5] [8].

Litiny s obsahem chrómu vyšším než 3 % tuhnou bíle, jelikož je uhlík vyloučen ve formě cementitu. Mikrostruktura těchto litin je obvykle tvořena dendrity austenitu a karbidy typu M_7C_3 , kde symbol M značí prvky Cr a Fe. Rozsah obsahu Cr v litině je velmi široký – od 8 % do

35 %. Pro takový materiál je typická vyšší odolnost vůči opotřebení, korozi a velmi vysoká žáruvzdornost. S vyšším obsahem Cr jsou tyto vlastnosti výraznější. Jejich využití je především v těžebním průmyslu.

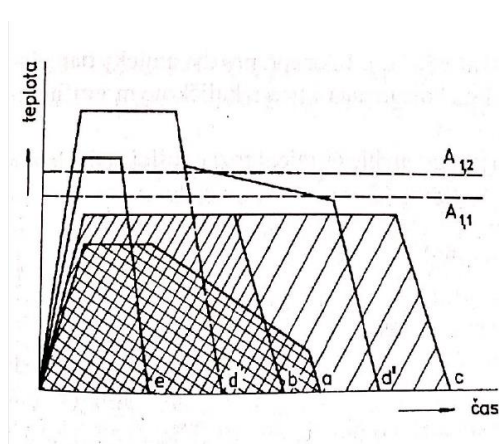
Při tepelném zpracování obvykle dochází u těchto litin k přeměně austenitu na martenzit a k precipitaci sekundárních karbidů, jejichž morfologie a uskupení mají významný vliv na výsledné vlastnosti materiálu. Z tohoto důvodu se do Cr litin často přidávají další legující prvky (obvykle Mo, Ni, Mn a Cu), které potlačují/podporují tvorbu perlitu, martenzitu a nebo výše zmíněných sekundárních karbidů. Výsledná matrice po tepelném zpracování je obvykle tvořena eutektickými karbidy a martenzitem či zbytkovým austenitem [1] [9].

3 Tepelné zpracování litin

K tepelnému zpracování litin dochází v momentě, kdy legováním nelze dosáhnout požadovaných mechanických a technologických vlastností. K nejčastějším typům tepelného zpracování litin patří žíhání a kalení, případně zušlechťování [1].

3.1 Žíhání

Žíhání je druh tepelného zpracování, při kterém se součást pomalu ohřívá na požadovanou teplotu, poté je na ní několik hodin ponechána a následně pomalu ochlazena [2].



Obr. 7 Způsoby žíhání grafitických litin

- a – žíhání ke snížení vnitřních pnutí, b – žíhání sferoidizační, c – feritizační
d – ke snížení tvrdosti, e – normalizační [1]

Prvním typem je žíhání ke snížení vnitřního pnutí, které se používá u složitých odlitků z litiny s lupínkovým grafitem. Provádí se při teplotách (500 – 650) °C, kdy se vnitřní napětí vyrovnává deformací odlitku. Rychlost ochlazování probíhá až do teplot (100 – 150) °C velmi pomalu, aby se zamezilo vzniku nových vnitřních pnutí (30 – 80 °C / hod). Výsledkem tohoto procesu je snížení vnitřního pnutí až o 30 %.

Druhým typem je žíhání ke snížení tvrdosti. Běžně se používá u litin s kuličkovým a lupínkovým grafitem u odlitků, kde snižujeme tvrdost za účelem lepší obrobitelnosti. Vysoká

tvrdost bývá zapříčiněna buď přítomností lamelárního perlitu nebo ledeburitického cementitu.

V prvním případě se provádí žíhání pod teplotou $A_{1,1}$ (Obr. 7) po dobu 2 – 8 hodin, při kterém se lamelární perlit postupně změní na zrnitý. Toto tepelné zpracování nazýváme sferoidizační žíhání. Pokud proces trvá dostatečně dlouho, začne docházet ke grafitizaci perlitického cementitu, takže výsledná matrice má feritickou strukturu. Z toho plyne název tohoto tepelného zpracování – feritizační žíhání.

K odstranění ledeburitického cementitu se používá dvoufázový proces. V první fázi se žíháním ledeburitický cementit rozpadá podle rovnice: $Fe_3C \rightarrow 3 Fe + C_{graf}$, přičemž se vylučuje temperovaný grafit. Teplota žíhání je cca 950°C. V druhé fázi se žíháním získává požadovaná struktura. Tento proces se nazývá temperace.

Normalizační žíhání se používá zejména u grafitických litin za účelem větší odolnosti proti opotřebení. Tímto procesem dochází ke snížení obsahu feritu a získáváme jemnější lamelární perlit. Při normalizačním žíhání většinou dochází vzhledem k vyšší ochlazovací rychlosti (vzduch) ke vzniku vnitřních pnutí, které je potřeba snížit popouštěním [1] [4] [5].

3.2 Kalení

Kalení je druh tepelného zpracování, jehož cílem je dosažení vyšší tvrdosti odlitku. Vzhledem k přítomnosti grafitu se ale u grafitických litin nedosahuje tvrdosti jako u ocelí. Základní princip spočívá v ohřevu součásti na kalící teplotu, krátkém setrvání na této teplotě a následném rychlém ochlazení. Velký vliv na zpevňování má pro kalení uhlík. Čím je větší obsah uhlíku, tím větší výsledné tvrdosti lze dosáhnout. Tato přímá úměra platí především u ocelí, u litin platí také, ale tvrdost se nezvyšuje již tak intenzivně. Dalším rozdílem litin a ocelí bývá rychlost ohřevu, přičemž u litin bývá zpravidla pomalejší než u ocelí. Rychlé ochlazení má za důsledek přeměnu na austenitu na martenzit či bainit – podle této výsledné struktury dělíme kalení na dva základní typy [1] [2] [5].

Bainitická transformace probíhá tak, že přechlazený austenit se transformuje pod teplotou cca 550°C na nerovnovážnou strukturní feriticko-karbidickou směs – bainit. Bainitická přeměna je z části difúzní a má některé znaky společné jak s perlitickou, tak martenzitickou přeměnou. Právě proto je poměrně malá teplotní oblast, kdy tato přeměna může proběhnout.

Struktura bainitu především závisí na teplotě přeměny. V horní části bainitické transformace vzniká tzv. horní bainit a v nižší vzniká tzv. dolní bainit. Horní bainit je tvořen svazky hrubších jehlic tetragonálního feritu s podélně uspořádanými částicemi cementitu, hlavně na povrchu. Dolní bainit tvoří tenké desky bainitického feritu s uvnitř geometricky uspořádaným jemným jehlicovitým precipitátem cementitu. V porovnání s perlitickou přeměnou lze dosáhnout vyšší pevnosti.

Martenzitické kalení se běžně používá jak u grafitických, tak bílých litin. Jak již z názvu vyplývá, jeho cílem je dosažení martenzitické struktury. Podle typu litiny probíhá tento proces za různých podmínek – teplota, doba výdrže a kalící prostředí. Většinou probíhá v teplotách o 50 °C – 80 °C vyšší než $A_{1,2}$. Běžně se nekalí za vyšších teplot z důvodu většího podílu zbytkového austenitu a tím pádem snížení požadované tvrdosti. U bílých litin je martenzitické kalení nejdůležitější typ tepelného zpracování, jelikož dochází ke zvýšení odolnosti povrchu proti opotřebení [1] [4].

Kalí se obvykle do studené lázně, ve které je buď olej nebo voda, nebo se případně odlitek ochladí termálně. Kalící prostředí se volí dle materiálu. Po kalení obvykle následuje proces popouštění, který má za cíl snížení vnitřních pnutí [1].

Po izotermickém zušlechťování lze dosáhnout tzv. ausferitické struktury. Jedná se o směs horního bainitu a zbytkového austenitu (až 40 %). Tato struktura vyniká vysokými pevnostními ale zároveň i dobrými plastickými vlastnostmi [10].

3.2.1 Povrchové kalení

Speciálním typem kalení je tzv. povrchové kalení. Jeho cílem je zvýšení odolnosti povrchu proti opotřebení, přičemž jádro součásti zůstává houževnaté. Tento proces se provádí především u odlitků z grafitických litin. Výchozí struktura musí být perlitická s velmi nízkým obsahem feritu a bez ledeburitického cementitu. Výsledkem je ve většině případů martenzitická struktura na povrchu součásti.

Z důvodu toho, aby se na kalící teplotu dostala pouze povrchová vrstva, musí být rychlost ohřevu velmi vysoká (v řádu stovek °C/s) a jeho doba krátká. Vzhledem k takto velké rychlosti se mění i celý mechanismus fázových přeměn. S vyšší rychlostí ohřevu se také zvyšuje vznik zárodků austenitu, čímž dochází ke zjemnění austenitického zrna a tím pádem i k jemnější výsledné struktuře. To má za důsledek lepší houževnatost a větší tvrdost povrchu oproti objemovému kalení. Nevýhodou je, že vzhledem k vysoké rychlosti celého procesu může docházet k neúplné austenitizaci, kdy mohou ve struktuře zůstat nerozpuštěné karbidy.

Podle zvolené technologie dělíme povrchové kalení na:

1. indukční
2. plamenem
3. laserem
4. elektronovým svazkem

Kalícím prostředí bývá nejčastěji voda, olej nebo vzduch a většinou je nutné součásti následně popouštět [1] [4].

3.2.1.1 Indukční kalení

Indukční povrchové kalení je založeno na ohřevu součásti indukovanými vířivými proudy o střední až vysoké frekvenci (od 1000 Hz až do 2 MHz). Induktorem obvykle bývá cívka nebo smyčka, do které se předmět vloží. Střídavý proud indukuje ve vodivé součásti magnetické pole a vznikají tzv. Foucaultovy vířivé proudy. Intenzita těchto proudů je největší na povrchu předmětu, a tak zde dochází k největšímu ohřevu. Tloušťka ohřáté vrstvy je intenzitě proudů nepřímo úměrná, obvykle bývá v rozmezí 1 až 6 mm. Výsledná oblast má lepší odolnost proti opotřebení, únavě a má větší pevnost.

Indukční kalení se dělí na 2 základní typy – jednorázové a postupné. První druh funguje na principu, že se ohřeje na kalici teplotu celá součást (případně celá požadovaná část součásti, která má být zakalena) a poté se ponoří do chladicí lázně.

Postupné kalení je založeno na principu, že za induktorem je ihned umístěna chladicí sprcha, takže se ohřívá pouze část povrchu, která je následně hned ochlazena. Velkou nevýhodou této metody je tzv. šev – měkké místo, které vzniká překrytím 2 postupně kalených částí povrchu.

Právě vysoká hloubka společně s možností získání velké povrchové tvrdosti patří mezi hlavní výhody indukčního kalení. Obvykle se používá na součásti jako ozubená kola, čepy, kladky, ... (zejména symetrické díly), které jsou mimořádně zatíženy (namáhání krutem, povrch zatížen nárazovými silami).

Tato metoda povrchového kalení je vzhledem k ceně zařízení finančně velmi náročná, nastavení parametrů se musí pro jednotlivé součásti a materiály odladit, a tak se využívá především v sériové výrobě [1] [11] [12].

3.2.1.2 Kalení plamenem

Při povrchovém kalení plamenem se obvykle používá kyslíko-acetylonový hořák. Stejně jako u indukčního kalení jej můžeme rozdělit na jednorázové a postupné, přičemž u jednorázového lze dosáhnout až dvojnásobné tloušťky zakalené vrstvy (obvykle 3 mm). V porovnání s indukčním kalením je rovnoměrnost struktury horší, ale pořizovací náklady mnohem nižší. Oblasti využití jsou stejné, avšak vzhledem k nižší ceně se využívá především u kusové výroby [1].

3.2.1.3 Laserové kalení

Laserové povrchové kalení dokáže bezkontaktně dodat povrchu velké množství energie a tím pádem dosáhnout i velmi vysoké rychlosti ohřevu – v řádech $10^4 - 10^6$ °C/s. Z důvodu takové rychlosti se posouvají transformační teploty na vyšší hodnoty a přestávají platit běžné fázové diagramy. Kalící teplota je většinou těsně pod bodem tání (900 °C – 1400 °C) [13] [14].

Princip kalení laserem je takový, že se paprsek plynule pohybuje, povrch se zahřívá ve směru posuvu a následně se ochlazuje okolním materiálem. Jedná se o tzv. samokalení, u kterého není potřeba materiál chladit chladicí kapalinou. Díky tomu, že teplo je rychle odváděno z povrchu součásti, dochází k postupnému vyrovnávání teplot zevnitř, a tak jsou vnitřní pnutí a možnost praskání minimalizovány. Z hlediska struktury vznikají po kalení laserem velmi drobné karbidy a krátké martenzitické jehlice. Aby proces samokalení mohl proběhnout, musí platit, že tloušťka stěny součástky kaleného materiálu je minimálně 10x větší než tloušťka kalené vrstvy. U menších součástí, kde tohoto poměru nelze dosáhnout, se musí povrch chladit vzduchem nebo chladicí kapalinou [1] [7] [15].

Velikost a tvar zpevnění části povrchu ovlivňuje doba působení a hustota energie dopadajícího svazku. Šířka stopy může v současnosti u nejnovějších systému dosahovat až 60 mm, v případě zpracování větších ploch je třeba několikanásobného kladení laserových stop. Obvyklá hloubka prokalené vrstvy bývá v řádu desetin mm, ovšem maximální hloubka může být až 2-3 mm. V případě, kdy je potřeba dosáhnout větší hloubky, se používá hybridní

kalení. Jedná se o kombinaci laserového paprsku s induktorem. Hybridní kalení je v průmyslovém světě novinkou a zatím není moc používané.

Obecně má kalení laserem několik předností oproti ostatním technologiím – možnost lokalizace do konkrétní požadované oblasti součásti, minimální deformace a vnitřní pnutí. Nevýhodou bývá velmi vysoká pořizovací cena a následně vysoké provozní náklady. Vzhledem k malým deformacím odpadají například náklady na dodatečné opracování součásti [1] [7] [11] [15] [16].

Kalení laserem je vhodné jak pro velkosériovou, tak malosériovou výrobu a nachází poměrně velké využití v automobilovém, leteckém a strojním průmyslu. Nejčastějšími součástkami, které se povrchově kalí laserem, bývají ozubená kola, turbínové lopatky, hřídele a vodící lišty. Pro laserové kalení se obvykle využívají CO₂, pevnolátkové a polovodičové lasery [13] [16].

CO₂ lasery

CO₂ lasery patří do skupiny plynových laserů. Obecně jsou velmi účinné pro řezání a různé povrchové úpravy široké palety plastů, látek, kůže, dřeva a organických materiálů.

Základní princip je takový, že v lampě naplněné vzácnými plyny a CO₂ vzniká laserové záření. Jeho vlnová délka je vyšší než u polovodičových laserů (cca 10 μm). Díky tomu se energie velmi dobře dostává do materiálu, kde se přeměňuje na teplo, které následně odebírá materiál. Výkon paprsku může dosahovat až 20 kW [17] [18].

CO₂ lasery mají několik výhod, kterými předcházejí ostatní typy laserů – spolehlivost, dlouhá životnost a nízké provozní náklady. Díky těmto přednostem nachází užití při malých a středních sériích. Jednou z nevýhod je používání speciální optiky, která vytváří hranatý profil paprsku, který zlepšuje efektivitu celého procesu a možnost řezat a svařovat kovy. Taková soustava zrcadel je velmi náročná na údržbu. Nicméně v současnosti se hlavní výrobci snaží tento problém vyřešit tím, že se ve velkovýrobě lasery montují přímo na ramena robotů, čímž se zkrátí dráha paprsku, a tím pádem je potřeba menšího počtu průvodních zrcadel [19] [20].

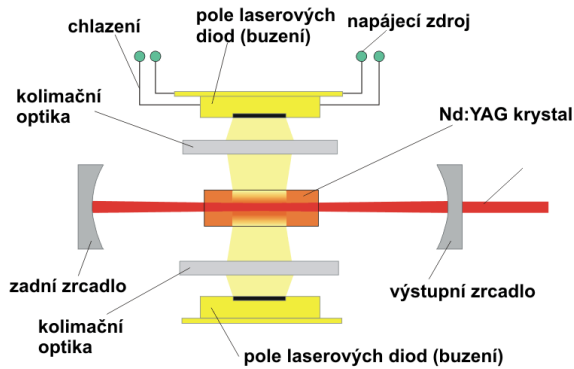
Využití CO₂ laserů se dělí po výkonové stránce následovně. CO₂ lasery s výkonem nižším než 500 W se používají při zpracování nekovových materiálů. Plynové lasery se středním výkonem (500 – 6000) W se užívají pro řezání ocelových plechů (max tloušťka 40 mm), trubek a různých dalších profilů. Výkonnější lasery pak nachází užití zejména ke svařování v automatizované velkosériové výrobě [19].

Pevnolátkové lasery

Dalším typem laserů používaných pro povrchové kalení jsou pevnolátkové lasery. Pevnolátkové lasery se rozdělují na tři druhy: Nd:YAG, vláknové a diskové. Aktivní prostředí tvoří u všech těchto typů matrice umělého YAG krystalu dopovaného ionty neodymu (Nd) a yterbia (Yb), ale liší se geometrií tohoto prostředí. U prvního typu (Nd:YAG) se jedná o tyčinku s délkou (15 – 20) cm. U diskového laseru je aktivním prostředím tenký disk (průměr 10 mm, tloušťka 0,25 mm) a u vláknového laseru se jedná o dlouhé optické vlákno s průměrem 50 – 300 μm [18].

Nd:YAG laser je z těchto tří typů nejdéle používaný v průmyslu. V dnešní době se používají dva druhy – Nd:YAG lasery buzené výbojkami (LPSS – lamp pumped solid state) nebo laserovými diodami (DPSS – diode pumped solid state). LPSS mají velmi nízkou účinnost přeměny elektrické energie na světelnou z důvodu toho, že většina energie výbojky se nevyužije a přemění se na teplo. Tím dochází k ohřevu výbojky a je nutné chlazení. DPSS mají oproti LPSS mnohem vyšší účinnost.

LPSS (Obr. 8) se používají v pulzním režimu hlavně pro svařování a vrtání. Mezi hlavní výhodu patří přenos velké energie jedním pulsem. Naopak nevýhodou jsou velké provozní náklady, nutnost chlazení a nízká účinnost [18] [19] [20] [21] [22].



Obr. 8 Princip laseru LPSS [18]

U DPSS laserů (Obr. 9) se rozlišují 2 typy buzení, které vznikají různě uspořádanými rezonátory – boční (transversální) buzení a zadní buzení. Obecně platí, že u zadního buzení lze dosáhnout lepší kvality svazku, ale dosahuje se nižších výkonů a u bočního buzení je tomu naopak. Obdobně jako LPSS se dnes používají hlavně v pulzním režimu [18].



Obr. 9 Princip laseru DPSS [18]

Diskové lasery fungují na podobném principu jako Nd:YAG akorát s tou výhodou, že díky jiné geometrii aktivního prostředí dochází k rovnoměrnému teplotnímu profilu, a tak lze pracovat s většími výkony (až 8 kW). Právě díky tomu nachází využití především ve výkonově náročných operacích – například svařování karoserií či jiných dílů automobilu. Za vedoucího výrobce diskových laserů (stejně jako u CO₂ laserů) se považuje firma Trumpf [18] [20].

Poslední druhem jsou vláknové lasery (Obr. 10). Jedná se o nejmodernější druh pevnolátkového laseru. Základní princip je založen na vedení buzení z laserových diod přes optickou spojku do aktivního vlákna. Na rozdíl od předchozích typů je místo zrcadel použita tzv. Braggovská mřížka. Jedná se o strukturu vytvořenou přímo na optickém vlákně. Záření se poté z vlákna dostává pomocí kolimátoru.

Vláknové lasery se obecně rozdělují dle pracovního režimu na kontinuální, pulsní a kvazipulzní. Mezi jejich hlavní výhody patří jednoduchost, robustnost, vysoká životnost a účinnost a modularita. Modularitou je myšleno to, že laser je tvořen tzv. moduly a jejich spojováním lze dosahovat vyšších výkonů (až 80 kW). Mezi jejich největší výrobce patří americká firma IPG Photonics Corp [18] [20] [21].



Obr. 10 Princip vláknového laseru [18]

Polovodičové lasery

Posledním typem jsou diodové, neboli polovodičové lasery. Jejich aktivní prostředí je tvořeno polovodičovou diodou, která je schopna vydávat záření o vlnové délce (790 – 980) nm. Odlišností od ostatních typů laserů je pravoúhlý profil paprsku s konstantním rozložením intenzity záření, díky kterému odpadá potřeba použití speciální optiky pro kalení. Naopak pro některé jiné operace je tato vlastnost nežádoucí, jelikož parsek nelze zaměřit do malého bodu. Další speciální vlastností diodových laserů je snadná změna vlnové délky, čehož se dosáhne změnou jednotlivých prvků v polovodiči.

Obvykle se lasery s výkonem do 250 W využívají pro řezání a svařování plastů, případně pájení. Takové lasery můžeme nalézt například v laserových tiskárnách, CD/DVD přehrávačích. Při vyšších výkonech nacházejí užití právě v kalení, svařování, vytvrzování kovů. Mezi hlavní výhody polovodičových laserů patří dobrá účinnost (50 % - 60 %), nízké náklady (pořizovací a provozní) a velmi dobrá životnost [14] [19] [20] [21].

U všech těchto laserů je možné regulovat výkon laserového paprsku v průběhu kalení za pomoci pyrometru, který paralelně snímá teplotu na povrchu součásti pro zajištění požadovaných parametrů prováděného zpracování (např. teploty austenitizace) [15].

3.3 Zušlechťování

Dalším typem kalení je izotermické zušlechťování. Provádí se zejména u litin s kuličkovým a lupínkovým grafitem a výsledkem je materiál s bainitickou strukturou. Cílem tohoto tepelného zpracování je zvýšení pevnosti, houževnatosti a odolnosti proti opotřebení.

Průběh je takový, že odlitky se nejprve ohřejí na teplotu (50 – 80) °C nad $A_{1,2}$ a pak se ochladí na teplotu požadované bainitické přeměny (- 250 – 400) °C. Po prodlevě 1-3 hod na dané teplotě v termální lázni se odlitek ochladí na vzduchu. Je-li doba zušlechťování příliš krátká, může kromě bainitu vzniknout také martenzit. Vzhledem k nízké úrovni vznikajících vnitřních pnutí se po izotermickém zušlechťování nepopouští.

Největší význam má izotermické zušlechťování u litin s kuličkovým grafitem. Její vlastnosti se odvíjejí od teploty, za níž bainitická transformace probíhala. Obecně pevnost v tahu, mez kluzu a tvrdost klesají s vyšší teplotou, ale tažnost a houževnatost stoupají. Zpravidla se tedy volí teploty (360 – 380) °C, pokud je požadováno zajištění vysoké houževnatosti, a naopak zušlechťováním na teplotě 250 °C se dosahuje vysoké pevnosti. Zušlechťená litina s kuličkovým grafitem má širokou škálu využití, jelikož svými vlastnostmi může sloužit jako náhrada za tvářenou ocel. Má velký význam pro ozubená kola, ozubené věnce, klikové hřídele, vodící kladky, pojezdová kola, ... [1] [2] [4].

3.4 Chemicko-tepelné zpracování

Z různých chemicko-tepelných typů zpracování se u litin většinou provádí pouze nitridace a sulfonizace. Nitridace je proces, při kterém se sytí povrch litiny dusíkem za účelem zvýšení odolnosti proti opotřebení. Obvykle se teplota ohřevu pohybuje mezi (500 – 550) °C a součást setrvává na této teplotě po dobu 50 – 90 hodin (podle požadované hloubky vrstvy). Celý proces se může urychlit tzv. stupňovitým nitridováním – ze začátku probíhá nitridace na nízké teplotě (500 – 520) °C, poté se z důvodu urychlení difuze přechází na (600 – 650) °C a nakonec se dostává na teplotu (500 – 550) °C (z důvodu snížení křehkosti). Při sulfonizaci se materiál sytí uhlíkem, dusíkem a sírou, čímž dochází ke vzniku sulfidů, které způsobují, že má vrstva velmi dobré třecí vlastnosti [1] [6] [8] [23].

4 Zkoušky tvrdosti

Tvrlost materiálu lze definovat jako odpor, který klade materiál proti vnikajícímu tělesu. Zkoušky tvrdosti mají nedestruktivní charakter a lze je provádět na hotových součástech. Mimo jiné díky této charakteristice jsou náklady na provedení tohoto typu zkoušky velmi nízké.

Zkoušky tvrdosti se dělí na následující druhy dle:

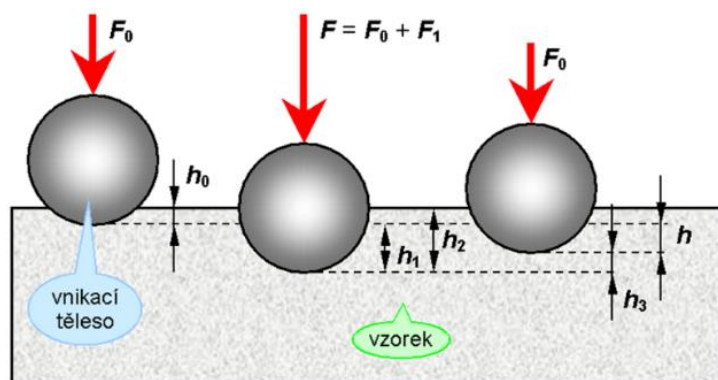
- Principu: vnikající, vrypové, odrazové a kyvadlové
- Rychlosti zatěžující síly: statické a dynamické
- Velikosti zatěžující síly: zkoušky makrotvrlosti (> 10 N), mikrotvrlosti (0,1 – 10 N) a nanotvrlosti ($< 0,1$ N)

V praktické části se tvrdost daných vzorků měřila metodami vnikajícími, a tak jsou v následující kapitole uvedeny tři nejznámější typy vnikajících zkoušek tvrdosti [2].

4.1 Zkouška tvrdosti dle Rockwella

Princip zkoušky dle Rockwella je založen na vtlačování diamantového kuželu (120°) nebo kuličky z tvrdokovu do povrchu součásti. Měří se rozdíl hloubky vtisku indentoru mezi předběžným a celkovým zatížením. Důvodem předběžného zatížení je zamezení nepřesností vzniklých drsností povrchu.

Postup (Obr. 11) celé zkoušky je, že se nejdříve vzorek mírně zatíží, poté se zatěžovací síla postupně zvětší na požadovanou hodnotu a poté se opět vrátí na hodnotu předběžného zatížení. Tvrlost samotná se neměří, nýbrž se odečítá ze stupnice dle hloubky vtisku. Norma popisující detailně celou zkoušku má číslo ČSN EN ISO 6508 [2] [24].



Obr. 11 Princip zkoušky tvrdosti dle Rockwella [24]

Zkouška tvrdosti dle Rockwella je velice jednoduchá, vzhledem k širokému rozsahu kombinací zatížení a indentorů ji lze použít pro měkké i tvrdé materiály, vpichy jsou malé (max. hloubka 0,2 mm) a je velmi rychlá. Nevýhodou je, že v porovnání se zkouškou dle Brinella a Vickerse je nejméně přesná.

Označení tvrdosti dle Rockwella se značí hodnotou tvrdosti, následované písmeny HR a použitou stupnicí. V České republice se používají nejvíce následující 3 stupnice: HRA, HRB a HRC (Tabulka 1) [2] [24].

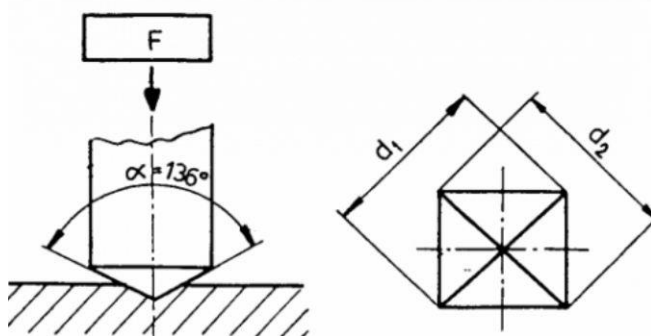
Tabulka 1 - Nejčastěji používané stupnice tvrdosti dle Rockwella [2]

ZNAČKA TVRDOSTI	TYP VNIKAJÍCÍHO TĚLESA	PŘEDBĚŽNÉ ZKUŠEBNÍ ZATÍŽENÍ [N]	CELKOVÉ ZKUŠEBNÍ ZATÍŽENÍ [N]	POUŽITÍ
HRA	Diamantový kužel	98,07	588,5	Křehké materiály a tenké vrstvy
HRB	Kulička (d=1,587 mm)	98,07	980,7	Měkčí kovy
HRC	Diamantový kužel	98,07	1471	Kalené a zušlechtěné oceli a litiny

4.2 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Princip zkoušky dle Vickerse spočívá ve vtláčování pravidelného diamantového čtyřbokého jehlanu (136°) do povrchu zkušební tělesa. Zatěžující síla se obvykle volí v rozmezí 10 – 1000 N. Obvyklá doba zatěžování bývá kolem 10 - 15 s, ale v ojedinělých případech může být až 180 s.

Postup (Obr. 12) je takový, že po odlehčení se změří délky úhlopříček vtisku (Obr. 12). Poté se z těchto dvou rozměrů vypočte jejich aritmetický průměr d . Tvrdost se pak vypočítá dosazením do následujícího vzorce: $HV = 0,1891 \frac{F}{d}$ (N), d (mm). Číslo normy pro zkoušku tvrdosti dle Vickerse je ČSN ISO EN 6507 [2] [24].



Obr. 12 Princip zkoušky tvrdosti dle Vickerse [24]

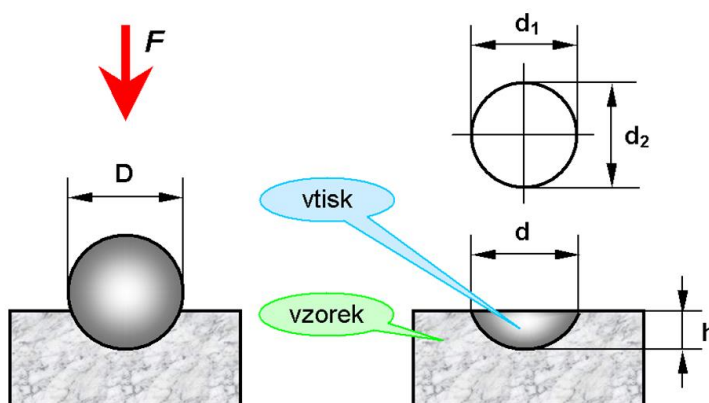
Ze všech zkoušek tvrdosti se jedná o nejpřesnější metodu, je vhodná pro měkké i tvrdé materiály. Nevýhodou jsou vysoké požadavky na kvalitu povrchu. U heterogenní struktury může být za nevýhodu považována malá oblast vtisku, jelikož vpich může zasahovat pouze do některé fáze a zkreslit tak celkový výsledek. V takovém případě je potřeba udělat velké množství vpichů, aby se těmto chybám zamezilo. Naopak při malých zátěžích je malého vtisku využíváno pro zjišťování tvrdosti jednotlivých fází, tzv. mikrotvrdost. V praxi se často používají tabulky, ve kterých se podle velikosti d a zatížení F určuje přímo odpovídající hodnota tvrdosti.

Tvrdost dle Vickerse se značí písmeny HV a číslicemi charakterizujícími velikost zatížení v kp. Pokud byla součást zkušebnímu zatížení vystavena po dobu jinou než obvyklých 10 – 15 s, následuje za lomítkem ještě tento čas [2] [24].

4.3 Zkouška tvrdosti dle Brinella

Poslední z těchto tří vnikajících zkoušek tvrdosti je dle Brinella. Princip (Obr. 13) je založen na vtlačování tvrdokovové kuličky o průměru $D = 1; 2,5; 5$ nebo 10 mm do povrchu součásti. Tloušťka zkoušeného vzorku musí být minimálně $8 \times$ hloubka vtisku a vzdálenost vtisku od kraje minimálně $2,5 \times$ průměr vtisku. Obvyklá doba působení zatížení bývá $10 - 15$ s, ovšem u některých materiálů může dosáhnout i 180 s.

Tvrdotu určujeme dle velikost průměru vtisku, který se měří $2 \times$ z důvodu vyloučení možné chyby/nepřesnosti. Aritmetický průměr z těchto hodnot poté označíme jako d . Tvrdotu podle Brinella lze vypočítat následujícím vzorcem: $HBW = 0,102 \frac{2F}{\pi * D * (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$ $F(N), D(mm), d(mm)$. Norma pro zkoušku tvrdosti dle Brinella má číslo ČSN ISO 6506 [2] [24].



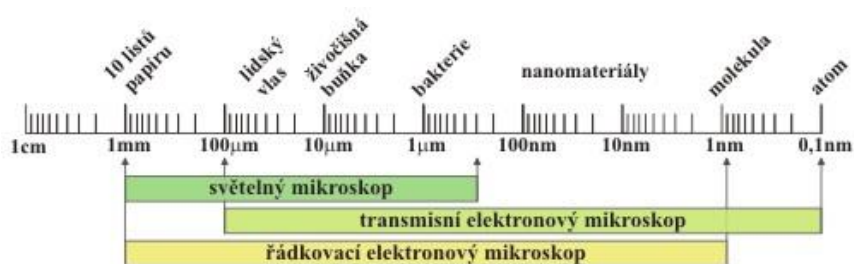
Obr. 13 Princip zkoušky dle Brinella [24]

Značení zkoušky tvrdosti dle Brinella je takové, že před se označením HBW uvádí hodnota tvrdosti a za něj průměr kuličky a zkušební zatížení.

Přesnost této zkoušky závisí na správném proměření vtisku, což bývá často obtížné a nepřesné. Důvodem je, že vtisk je často nesouměrný. Na to má vliv několik faktorů. Pokud se jedná o neztuhlý materiál, tak může docházet k tzv. vtažení materiálu. Naopak u ztuhlých materiálů se může vytvořit tzv. obvodový val. V neposlední řadě má také vliv deformace samotné kuličky. Tato zkouška je vhodná pro měkké, středně tvrdé materiály a materiály s heterogenní strukturou, naopak není vhodná pro tvrdší (kalené) materiály [2] [24].

5 Elektronová mikroskopie

Elektronové mikroskopy tvoří speciální kategorii mikroskopů, která místo světelného paprsku používá elektrickým polem urychlené elektrony a místo skleněných čoček se používají elektromagnetické. Vlnová délka těchto urychlených elektronů je: $\lambda = \frac{1,226}{\sqrt{U}} [nm]$. Za běžných podmínek se užívá napětí v řádech desítek až stovek kV, a tak je vlnová délka elektronů o 4 – 5 řádů nižší v porovnání s viditelným světlem. Z důvodu zamezení kontaktu elektronů s atmosférou, musí být zkoumaný vzorek i svazek elektronů ve vakuu [6].



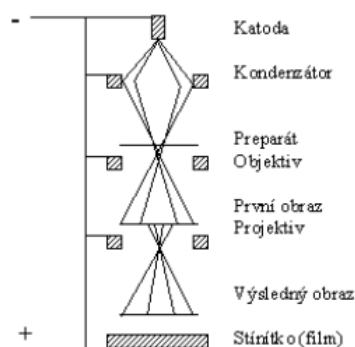
Obr. 14 Porovnání světelného mikroskopu s elektronovými [25]

Elektronové mikroskopy se dělí na 2 kategorie: transmisní (TEM) a řádkovací (SEM). Oba typy umožňují vzhledem k záření s velmi malou vlnovou délkou pozorovat objekty v lepším rozlišení (Obr. 14). Rozdíl SEM a TEM je ve využití vyzářovaných elektronů. Zatímco v transmisních elektroskopech jsou využívány elektrony, které projdou vzorkem a následně soustavou čoček, u řádkovacích se využívají interakce primárních elektronů s hmotou. K vytvoření obrazu u SEM pak slouží zejména sekundární a odražené elektrony.

Transmisní elektronové mikroskopy (TEM) se vzhledem ke kratší vlnové délce využívají hlavně k analýze vnitřní struktury, substruktury a lze jimi analyzovat materiál i na atomární úrovni. Nutno podmínkou je velmi malá tloušťka vzorku, aby jím byl svazek elektronů schopný projít.

Princip TEM (Obr. 15) je takový, že zdrojem záření je rozžhavená katoda. Elektrony jsou poté urychlené elektrickým polem a prochází tzv. elektronovou čočkou, která soustřeďuje elektrony na vzorek. Proud poté prochází další čočkou (objektivem) a vytvoří se první obraz.

Část vzniklého obrazu se další čočkou (projektivem) zvětší a vzniká výsledný obraz na stínítku nebo na CCD snímači [6] [25] [26].



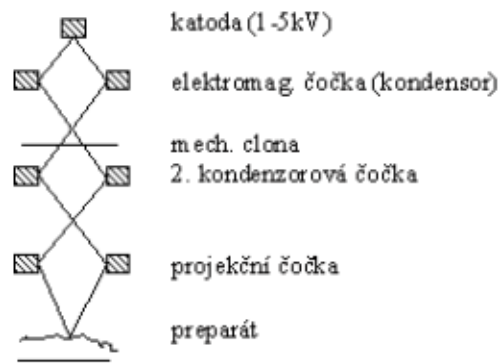
Obr. 15 Princip TEM [26]

Řádkovací elektronové mikroskopy (SEM) nachází užití v analýze povrchu téměř jakkoliv velkých vzorků (limitem je obvykle velikost vakuové komory).

Princip SEM spočívá v postupném vyzářování elektronů katodou. Elektrony jsou ve vakuu urychlovány a prochází soustavou elektromagnetických čoček. Čočky fokusují elektrony do úzkého svazku, který dopadá na povrch vzorku. Rastrovací cívký posouvají svazek po řádcích, dokud se nepokryje celá plocha. K vytvoření obrazu se využívá interakce dopadajících elektronů s materiálem vzorku. Obraz je obvykle tvořen převodem signálu z odražených a sekundárních elektronů (Obr. 16).

Intenzita sekundárních elektronů závisí hlavně na sklonu povrchu vzhledem k primárnímu svazku záření. Různé sklony se poté zobrazí na detektoru různým jasem, a tak je možné získat tzv. topografický kontrast.

Intenzita zpětně odražených elektronů závisí na atomovém čísle přítomných prvků. Jako světlé oblasti se budou jevit místa s prvky o vyšším atomovém čísle, zatímco prvky v nižším atomovém čísle se zobrazí jako tmavá místa. Vzhledem k tomu lze získat přehled o chemickém složení materiálu – materiálový kontrast [6] [25] [26] [27].



Obr. 16 Princip SEM [26]

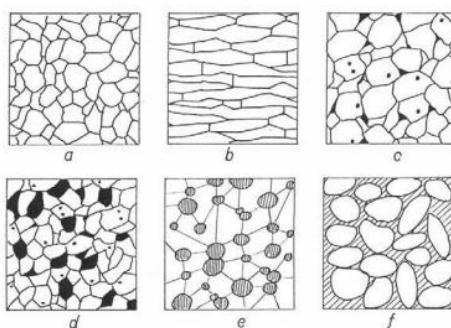
Souhrnem má elektronová mikroskopie mnoho výhod, mezi něž patří velké zvětšení, vysoké rozlišení, možnost komfortně řídit svazek elektronů počítačem. Hlavní nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady [6] [26].

6 Analýza mikrostruktury materiálu

Obecně struktura materiálu značí množinu vztahů mezi různými částmi hmoty, které utváří určitý stav. U krystalických a amorfních látek lze strukturu rozdělit na makrostrukturu, která je pozorovatelná pouhým okem nebo lupou, mikrostrukturu, která je pozorovatelná s využitím mikroskopie.

Mikrostrukturou jsou myšleny druhy, tvary a uspořádání složek (fází, poruch, ...) materiálu, které jsou viditelné pod mikroskopem. Mikrostruktura má velký vliv na výsledné vlastnosti. Materiál při stejném chemickém složení může mít v závislosti na výrobním postupu a následných tepelných úpravách velmi odlišné vlastnosti z důvodu rozdílné mikrostruktury. Základní informace o tom, jaké fázové složení je možné u daného materiálu očekávat, nám poskytují rovnovážné fázové diagramy.

Mikrostruktura (Obr. 17) bývá zpravidla tvořena kompaktní pevnou fází, ale může obsahovat i nečistosti (např. póry) a vměstky, které mají značný vliv na výsledné chemické a fyzikální vlastnosti. Hranice zrn jsou v mikrostruktuře oblasti o šířce několika atomů se specifickým uspořádáním, energií a vlastnostmi, zajišťující souvislý přechod mezi zrnky s rozdílnou orientací krystalové mřížky. K hranicím často difundují vakance nebo intersticiály a jedná se také o nejčastější místa v materiálu, kde probíhají přednostně chemické či mechanické jevy (lom, koroze) [3] [28].

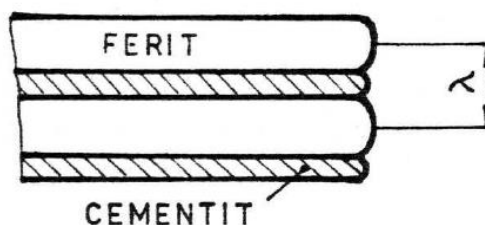


Obr. 17 Různé typy mikrostruktur [28]

Struktura grafitických litin je tvořena základní kovovou hmotou a grafitem (u bílých litin pouze kovovou hmotou). Za normálních teplot je kovová hmota většiny litin tvořena perlitem, feritem a případně ledeburitem [3].

Ferit ve struktuře litin je ve skutečnosti grafitový eutektoid vznikající při eutektoidní transformaci austenitu dle stabilního diagramu. Vzhledem k nízkému podílu grafitu se stabilní eutektoid označuje ferit (intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe s krychlovou prostorově středěnou mřížkou). Má nízkou pevnost ($R_m = 260 \text{ MPa}$), je velmi tvárný, houževnatý a feromagnetický. Při pozorování pod mikroskopem se jeví jako světlá fáze.

Perlit je eutektoid, který vzniká rozpadem austenitu podle metastabilní rovnováhy. Skládá se z perlitického cementitu a feritu. Perlit má ve srovnání s feritem vyšší pevnost ($R_m = 700 \text{ MPa}$), odolnost proti opotřebení a tvrdost, ale horší obrobitelnost a plastické vlastnosti. Při mikroskopickém pozorování se jeví jako tmavá složka. Vlastnosti perlitu výrazně závisí na dispersitě perlitu, která se určuje mezilamelární vzdáleností feritu λ (μm) – Obr. 18 [3] [6].



Obr. 18 Dispersita lamelárního perlitu [3]

Dle tepelného zpracování se perlit dělí na lamelární a globulární. Lamelární perlit vzniká při běžném chladnutí odlitku. Tvoří ho rovnoběžné lamely feritu a cementitu, které leží vedle sebe. Globulární perlit vzniká sbalením lamel cementitu během sferoidizačního žíhání. Litiny obsahující globulární perlit dosahují lepší obrobitelnosti oproti odlitkům s perlitem lamelárním [3] [6].

Ledeburit je eutektikum v metastabilní soustavě Fe-Fe₃C. Je tvořen austenitem a ledeburitickým cementitem. Při dosažení eutektoidní teploty se přeměňuje na tzv. transformovaný ledeburit, ve kterém se austenit rozpadl na perlit.

Legováním či tepelným zpracováním lze v kovové hmotě získat také austenit, martenzit, bainit či karbidy legujících prvků.

Austenit je tuhý intersticiální roztok uhlíku v železe s krychlovou plošně středěnou mřížkou. V odlitcích se obvykle vyskytuje pouze jako zbytkový austenit po tepelném zpracování či v legovaných litinách, kde legující prvky stabilizují jeho přítomnost za podeutektoidních teplot. Austenit je velmi měkký, tvárný, odolný proti korozi a paramagnetický. Právě díky těmto vlastnostem ho nacházíme v žáruvzdorných a korozivzdorných litinách. Pod mikroskopem se jeví jako světlá fáze obsahující dvojčata.

Martenzit vyniká velkou tvrdostí a křehkostí. Vzniká bezdifuzním rozpadem austenitu během kalení (kapitola 3.2).

Bainit se vyznačuje dobrou pevností a tvrdostí, ale zároveň si zachovává poměrně dobré plastické vlastnosti. Bainitické kalení je detailněji popsáno v kapitole 3.2 [2] [3] [6].

7 Experimentální část

Povrchové kalení litin je již v technické praxi obvyklou technologií. V dnešní době se stále více rozšiřuje jako zdroj ohřevu laser a to z důvodů vysokých výkonů a poměrně velké stopy, kterou lze povrch součásti tepelně zpracovat. Výhodou je také vysoký stupeň automatizace a kontrola procesu. Experimentální část se zabývá vyhodnocením mikrostruktury několika vybraných vzorků grafitických a negrafitických litin, které se obvykle povrchovým kalením nezpracovávají. Cílem bylo porovnat mikrostrukturu vrstvy vzniklé po indukčním a laserovém povrchovém kalení. Poté byla na všech vzorcích provedena zkouška tvrdosti dle Vickerse pro zjištění efektu povrchového kalení a hloubky zakalené vrstvy.

7.1 Materiál použitý v experimentální části

Pro tuto práci bylo vybráno 6 materiálů. Čtyři vzorky byly grafitické litiny ADI 900-8 a AGI GJL 250, od každého materiálu dva vzorky – jeden po indukčním a jeden po laserovém povrchovém kalení. ADI je zkratka pro izotermicky tepelně zpracovanou litinu s kuličkovým grafitem. Konkrétně tato litina se řídí normou ČSN 42 2308. AGI je užívaná zkratka pro izotermicky tepelně zpracovanou litinu s lupínkovým grafitem. Konkrétně tento materiál se řídí normou ČSN 42 2425. Indukčně kalené vzorky byly kaleny střední frekvencí (SF), parametry jsou uvedeny v Tabulka 2. Vysokofrekvenční indukční kalení (VF) nebylo použito z toho důvodu, že u podobných dřívějších zkoušek s ocelí s nízkým obsahem C a s velkým podílem feritu bylo ve struktuře dosaženo značných rozptylů naměřených hodnot tvrdostí. U středofrekvenčního povrchového kalení byly rozptyly minimální. Parametry laserového kalení obou grafitických litin jsou uvedeny v Tabulka 3.

Tabulka 2 – Parametry indukčního středofrekvenčního kalení

SF Kalení – SMK 150/05/500					
Rotace [1/min]	Převod trafa	Kapacita [uF]	Napětí [V]	Proud [A]	Frekvence [kHz]
180	1:12	30	248	153	7,9
Vodní sprcha [1/min]	Posuv [mm/s]	Čas přehřevu [s]	Čas dochlazení [s]	Teplota popouštění [°C]	Výdrž na teplotě [min]
≈ 12	4	1	15	155-165	60

Tabulka 3 - Parametry laserového kalení

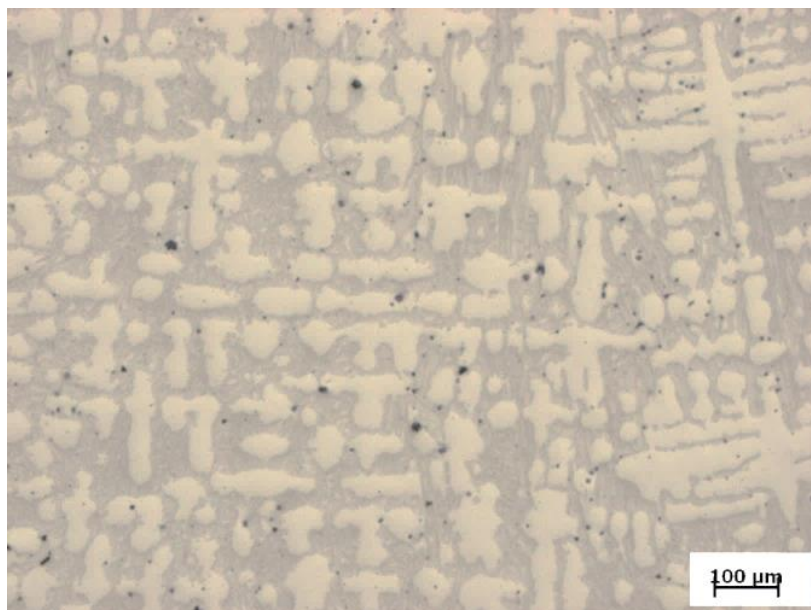
	Průjezd
Teplota	1120 °C
Velikost laserového spotu	8×20 mm
Povrchová rychlost	45 cm / min
Použitý laser	Laserline LDF 10000-100
Fokusační vzdálenost	348 mm
Manipulátor	Robot Fanus M710iC s jednoosým polohovadlem
Kalící optika	Laserline zoom optics (proměnný rozměr paprsku v obou osách 8-54 mm)

Další dva materiály byly negrafitické chromové litiny s různým složením – EXTRA L - 1A a EXTRA L - 5. Tyto litiny se řídí normou ČSN EN 12513 pro ořezuvzdorné litiny. Konkrétně se jedná o skupinu s obsahem Cr (23 – 28) %, které je označena jako „Litiny se strukturou tvořenou komplexními karbidy v matrici vznikajícími po zakalení a tvořené převládající martenzitickou strukturou, která může obsahovat také část austenitu nebo jiných produktů rozpadu austenitu.“ Vzhledem k požadavkům zákazníka bylo chemické složení obou materiálů upraveno a je uvedeno v Tabulka 4 [29].

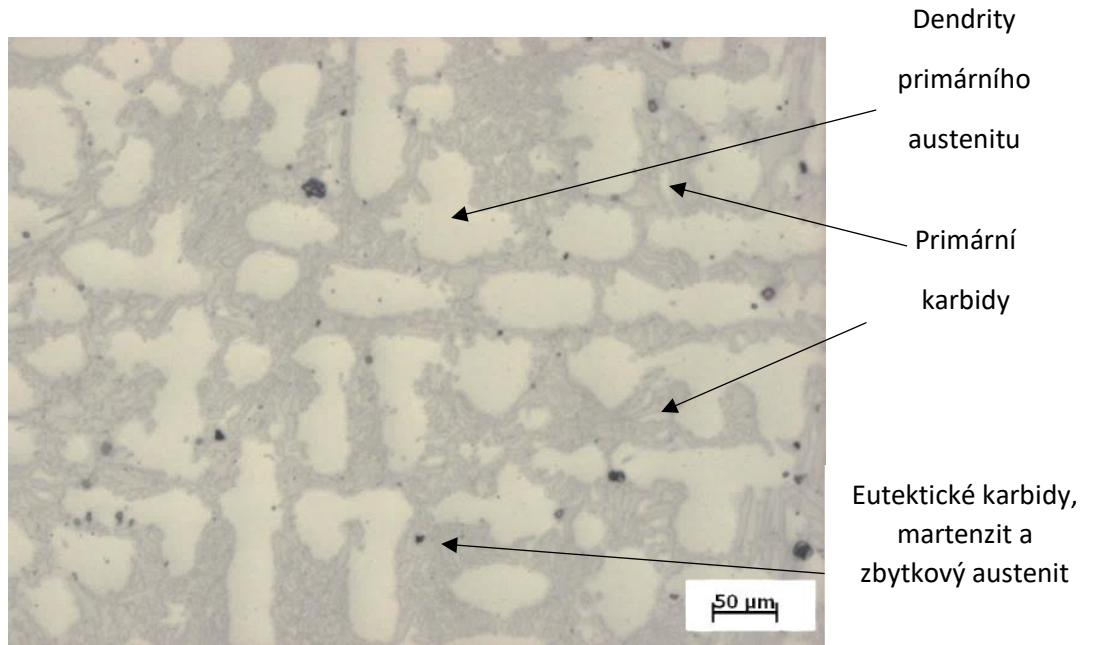
Tabulka 4 - Chemické složení [29]

Materiál	Chemické složení (hm %)							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
EXTRA L- 1A	3,20	0,89	0,30	0,030	0,019	24,77	0,076	0,17
EXTRA L- 5	2,23	1,01	0,31	0,040	0,020	26,66	0,025	0,07

Oba materiály jsou určeny pro abrazivzdorné součásti, které jsou namáhány z hlediska nebezpečí opotřebení bez dynamických rázů. Materiál EXTRA L – 5 má oproti EXTRAL L – 1A nižší obsah uhlíku, a tak ho lze použít i v podmínkách, kde působí dynamické rázy a tlaky. Na Obr. 19 a Obr. 20 je zachycena mikrostruktura materiálu EXTRA L – 5 ve výchozím stavu [29].



Obr. 19 Snímek mikrostruktury materiálu EXTRA L - 5 ve výchozím stavu [29]



Obr. 20 Snímek mikrostruktury materiálu EXTRA L - 5 ve výchozím stavu, detail [29]

Na obou vzorcích Cr litin bylo provedeno opravné svařování k odstranění povrchových vad, po kterém následovalo žíhání na snížení vnitřního pnutí. Poté bylo provedeno povrchové kalení laserem.

7.2 Metalografie a měření tvrdosti

7.2.1 Příprava vzorků

Pro dělení vzorků byla použita rozbrušovací metalografická pila. Poté byly vzorky za tepla lisovány do bakelitu pro lepší následné operace a manipulaci. Následoval proces broušení a leštění, po kterém přišlo na řadu první zdokumentování mikrostruktury pro případ, že by při následujícím procesu došlo k poškození vzorku. Poté byly vzorky naleptány a opět byla zdokumentována již zvýrazněná mikrostruktura povrchu a jádra. Vyhodnocení tvrdosti dle Vickerse proběhlo ze 120 vpichů do každého vzorku.

Na obou vzorcích Cr litin byla patrná tmavá stopa od laserového povrchového kalení (Obr. 21 a Obr. 22), kdy byl zřejmě na začátku procesu nastaven velmi vysoký výkon paprsku. Z tohoto důvodu byly pro metalografické vyhodnocení zhotoveny od každého materiálu dva vzorky – jeden v příčném řezu (PN), ve kterém je možné vidět vrstvu „spálenou“ od laseru, a druhý v podélném řezu (PO), ze kterého je možné vyhodnotit mikrostrukturu povrchu zbytku vzorku. Tvrdost obou materiálů byla měřena v podélném řezu.



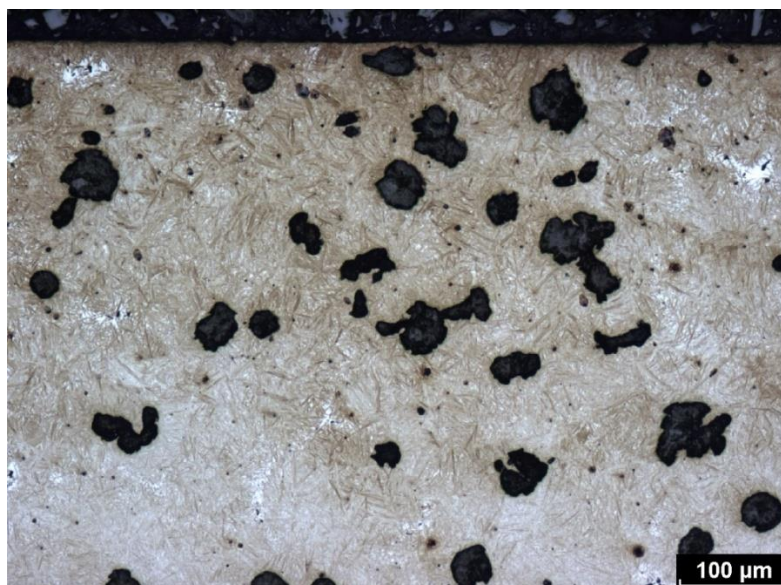
Obr. 21 Původní vzorek materiálu EXTRA L - 1A



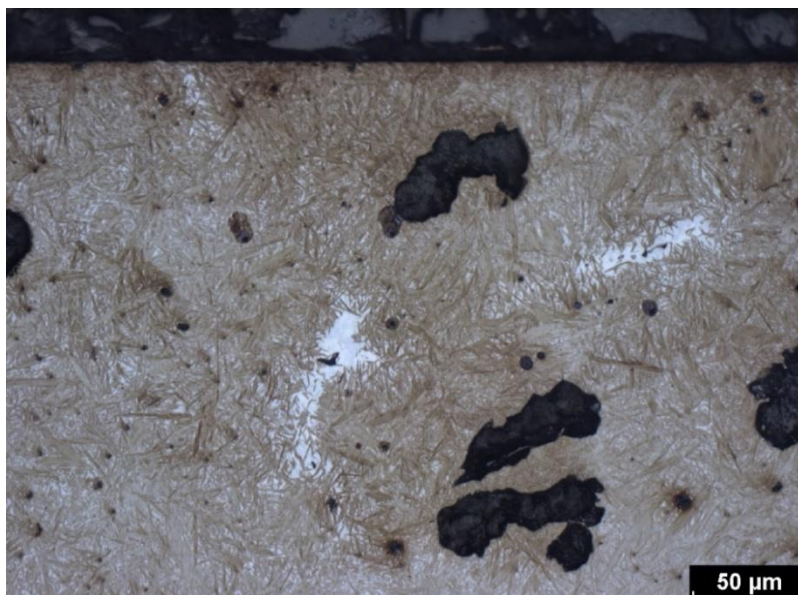
Obr. 22 Původní vzorek materiálu EXTRA L – 5

7.2.2 ADI 900-8

Na Obr. 23 a Obr. 24 je zdokumentována kalená vrstva tvárné litiny ADI 900-8, které je tvořena martenzitem a zbytkovým austenitem (10 %).



Obr. 23 Mikrostruktura LK povrchu materiálu ADI 900-8



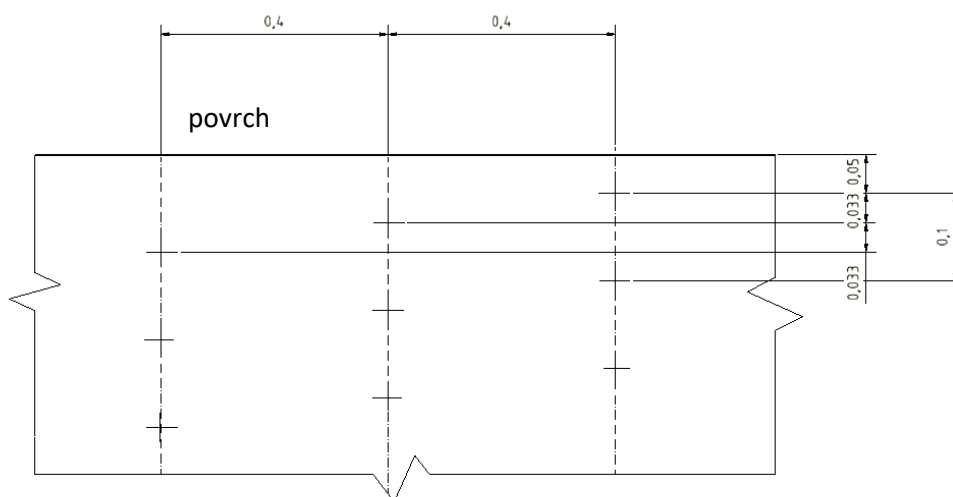
Obr. 24 Mikrostruktura LK povrchu materiálu ADI 900-8, detail

Mikrostruktura jádra (Obr. 25) je tvořena kuličkovým grafitem a ausferitem, avšak vyskytuje se v ní lokálně i ferit (méně než 5 %).



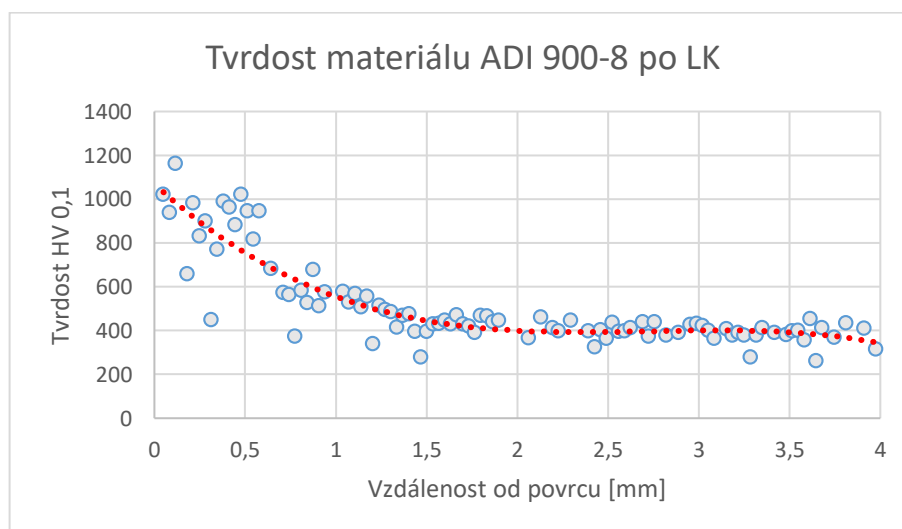
Obr. 25 Mikrostruktura LK jádra materiálu ADI 900-8, detail

Na závěr proběhlo vyhodnocení tvrdosti dle Vickerse se zatížením 0,98 N (HV 0,1). Směrem od povrchu do jádra bylo provedeno 120 vpichů. Schéma umístění jednotlivých vpichů, tak aby byly dodrženy vzájemné vzdálenosti sousedních vtisků, je uvedeno na Obr. 26.



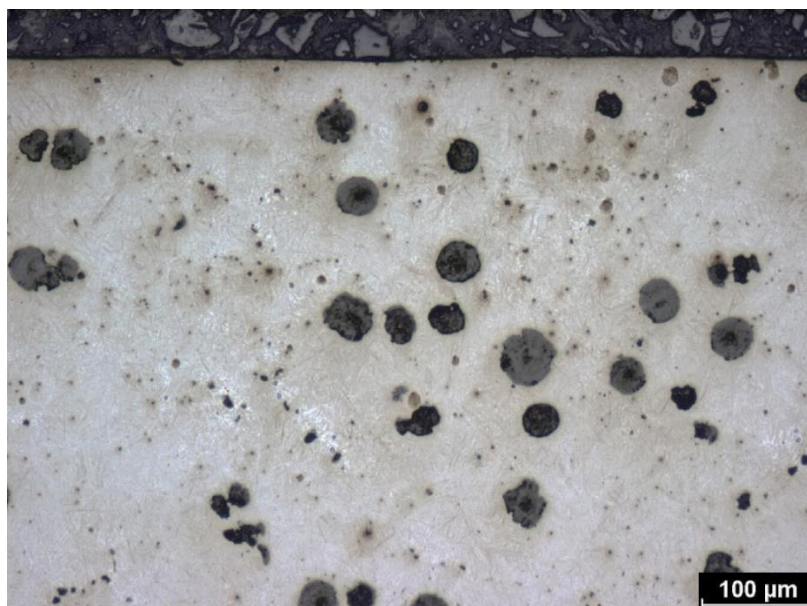
Obr. 26 Trajektorie vpichů při měření tvrdosti dle Vickerse

Z průběhu a zjištěných hodnot tvrdosti (Obr. 27) je patrné, že struktura povrchové vrstvy je martenzitická vzhledem k naměřené tvrdosti. Zároveň je patrný výrazný pokles ve vzdálenosti 0,6 mm od povrchu, kde je přechodová oblast mezi zakalenou povrchovou vrstvou a ausferitickou strukturou jádra.



Obr. 27 Tvrdost materiálu ADI 900-8 po LK

Po indukčním povrchovém kalení (IK) se na povrchu vytvořil jemný martenzit se zbytkovým austenitem (10 – 20 %) (Obr. 28 a Obr. 29).

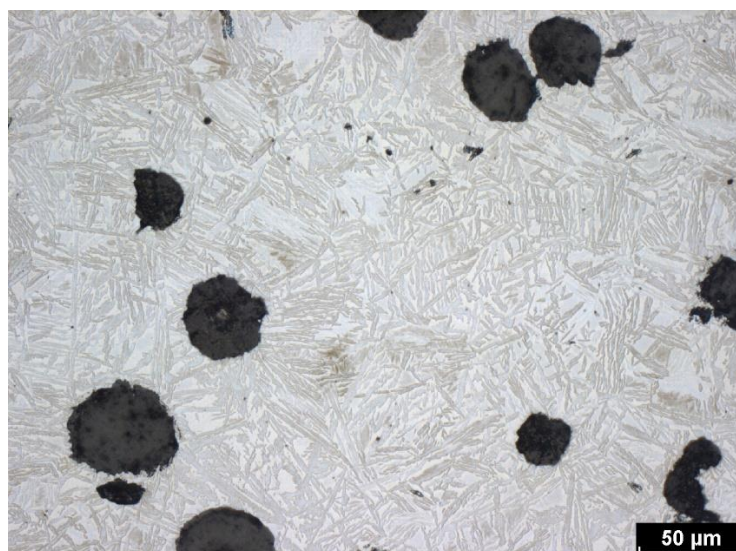


Obr. 28 Mikrostruktura IK povrchu materiálu ADI 900-8

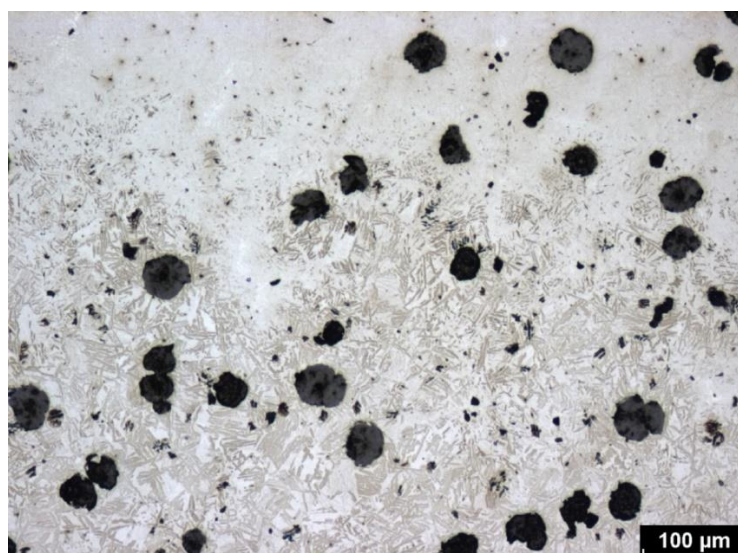


Obr. 29 Mikrostruktura IK povrchu materiálu ADI 900-8, detail

Mikrostruktura jádra (Obr. 30) je tvořena kuličkovým grafitem v ausferitické matici a ojediněle feritem. Na Obr. 31 je viditelný přechod mezi zakalenou mikrostrukturou u povrchu a tepelně neovlivněného jádra.

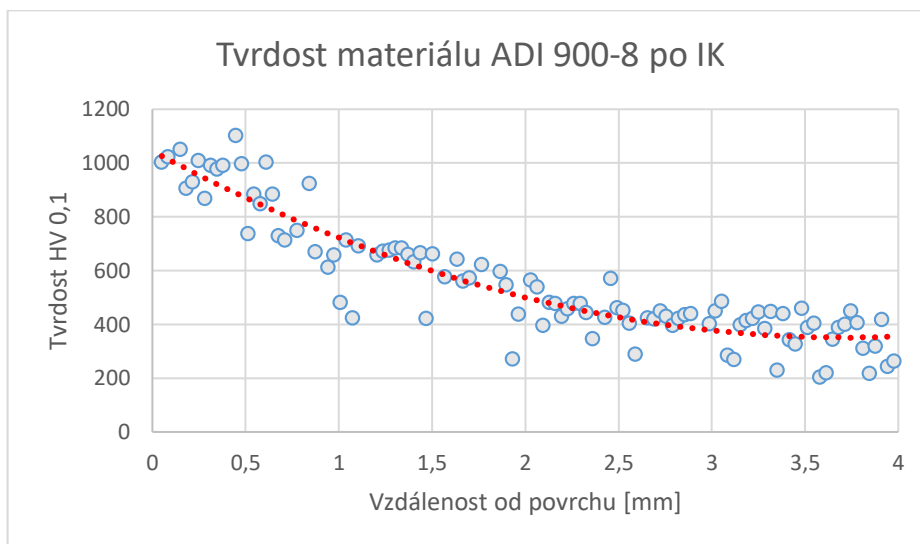


Obr. 30 Mikrostruktura IK jádra materiálu ADI 900-8, detail



Obr. 31 Mikrostruktura IK přechodu ADI 900-8

Z grafu (Obr. 32) je patrný postupný pokles tvrdosti směrem k jádru. Tvrdost do hloubky 0,9 mm odpovídá martenzitu, který poté přechází v ausferitickou strukturu. V porovnání s laserovým povrchovým kalením zde vznikla hlubší zakalená vrstva (2 mm).



Obr. 32 Tvrdost materiálu ADI 900-8 po IK

7.2.3 AGI GJL 250

Na povrchu litiny AGI GJL 250 po povrchovém kalení laserem (Obr. 33, Obr. 34) byla viditelná tvorba martenzitické struktury obdobně jako u povrchového kalení laserem litiny s kuličkovým grafitem.



Obr. 33 Mikrostruktura LK povrchu materiálu AGI GJL 250



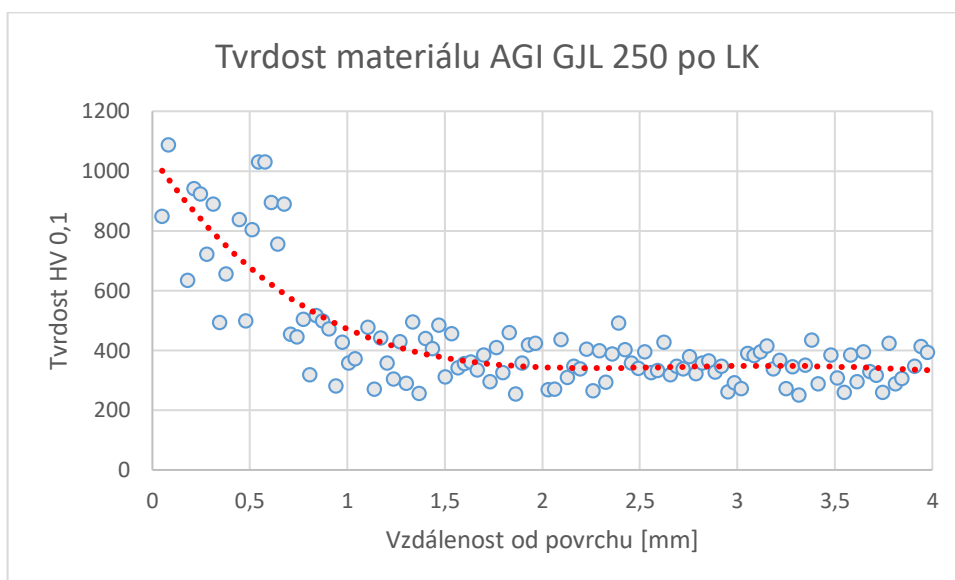
Obr. 34 Mikrostruktura LK povrchu materiálu AGI GJL 250, detail

Jádro (Obr. 35) je tvořeno lupínkovým grafitem, ausferitem (45 %) a perlitem (50 %). Ojediněle se ve struktuře objevuje i ferit (do 5 %).



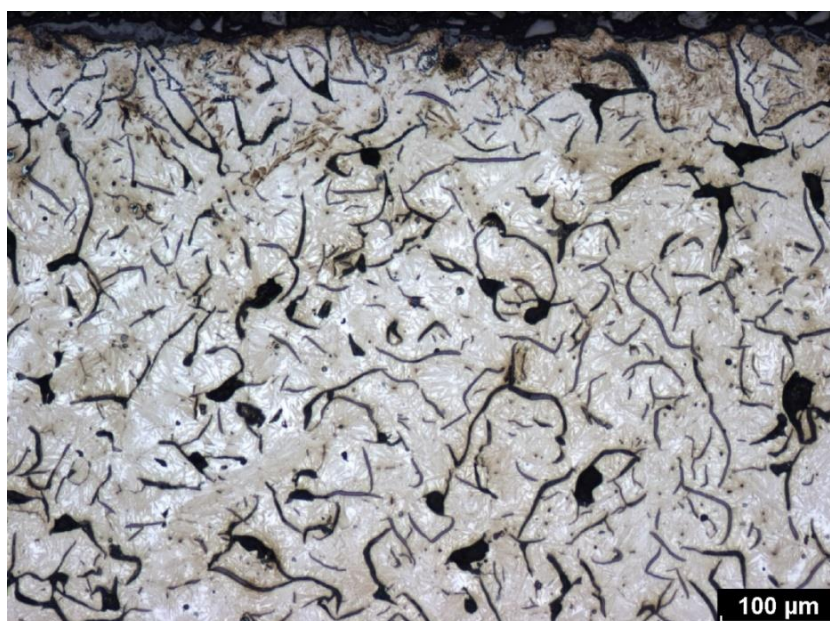
Obr. 35 Mikrostruktura LK jádra AGI GJL 250, detail

Obdobně jako u tvárné litiny (Obr. 27) graf na Obr. 36 vykazuje výrazný pokles tvrdosti, v podobné hloubce (0,7 mm). I zde naměřená tvrdost dle Vickerse potvrzuje přítomnost martenzitu na povrchu.

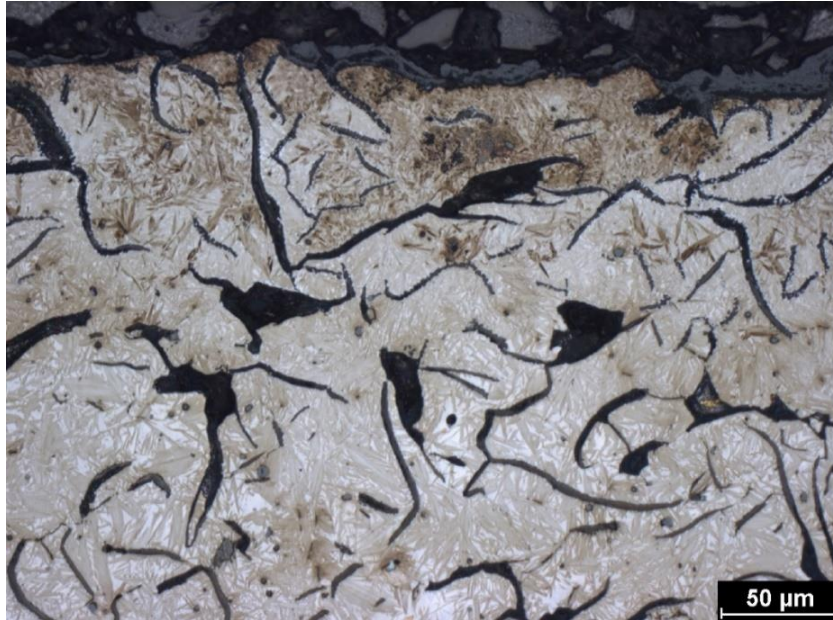


Obr. 36 Tvrdost materiálu AGI GJL 250 po LK

Na povrchu po indukčním povrchovém kalení vznikla tenká vrstva martenzitu se zbytkovým austenitem (20 %) (Obr. 38), která přechází v ausferitickou strukturu jádra (Obr. 37).



Obr. 37 Mikrostruktura IK povrchu materiálu AGI GJL 250



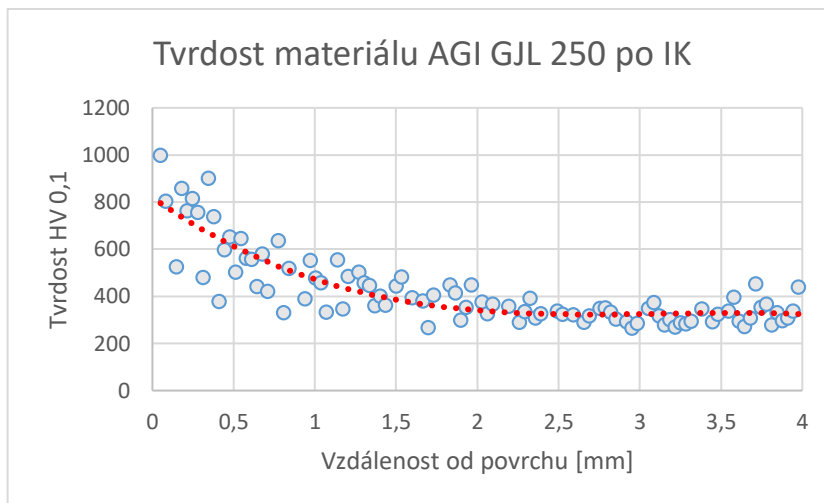
Obr. 38 Mikrostruktura IK povrchu materiálu AGI GJL 250, detail

Struktura jádra (Obr. 39) je tvořena lupínkovým grafitem, ausferitem, perlitem a ojediněle feritem.



Obr. 39 Mikrostruktura IK jádra AGI GJL 250, detail

Z grafu (Obr. 40) je patrná přítomnost poměrně tenké vrstvy martenzitu, která byla zachycena do hloubky 0,4 mm. Nižší naměřené hodnoty tvrdosti ohřevem neovlivněné matrice oproti litinám s kuličkovým grafitem jsou v souladu s pozorovanou přítomností perlitu vedle ausferitu.



Obr. 40 Tvrdost materiálu AGI GJL 250 po IK

7.2.1 EXTRA L – 1A

V PN řezu bylo možné na povrchu zobrazit tmavou oblast okraje laserové stopy. Z Obr. 41 a Obr. 42 je zřejmé, že zde došlo k vytvoření přetavené vrstvy na povrchu a zformování nových jemnějších dendritů orientovaných ve směru odvodu tepla. Vzniklé vrstvy se pravděpodobně vytvořily v důsledku jednotlivých pulsů laseru.

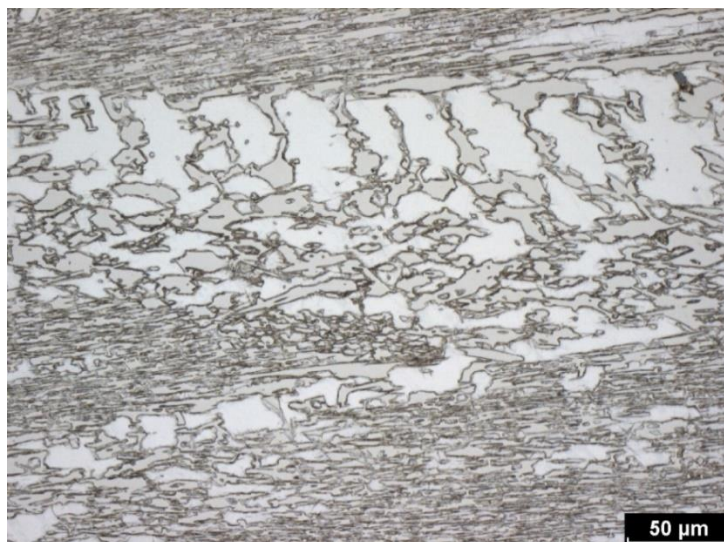


Obr. 41 Mikrostruktura povrchu materiálu EXTRA L - 1A v příčném řezu



Obr. 42 Mikrostruktura povrchu materiálu EXTRA L - 1A v příčném řezu, detail

Mikrostruktura jádra (Obr. 43) je tvořena dendrity primárního austenitu a primárními karbidy typu M_7C_3 , přičemž symbol M značí prvky Cr a Fe. Jemné eutektické karbidy jsou obklopeny martenzitem a zbytkovým austenitem.

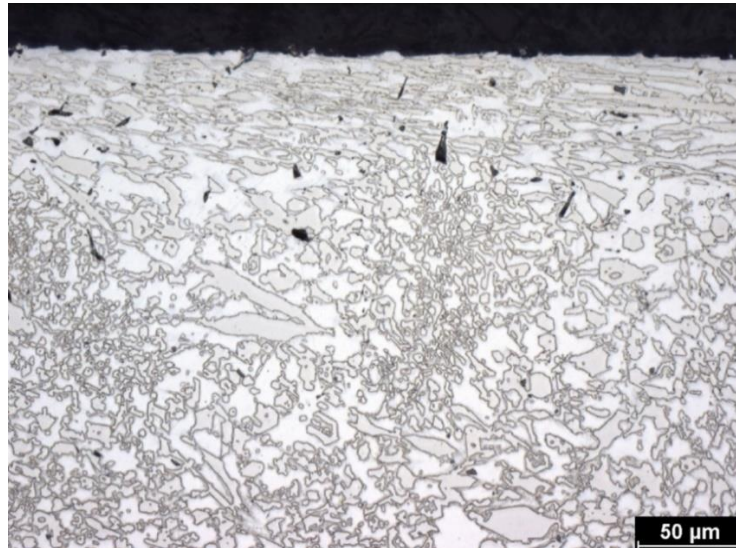


Obr. 43 Mikrostruktura jádra materiálu EXTRA L - 1A v příčném řezu, detail

V PO řezu (Obr. 44) je zachycen „nespálený“ zakalený povrch vzorku. Veškeré tmavě černé útvary na snímku (výrazné především ve zvětšení 200×) jsou praskliny. Nejedná se o nežádoucí příměsi, které by se např. během procesu broušení dostaly do vzorku. Především na Obr. 45 je zřejmé, že na povrchu došlo ke zjemnění eutektické struktury.

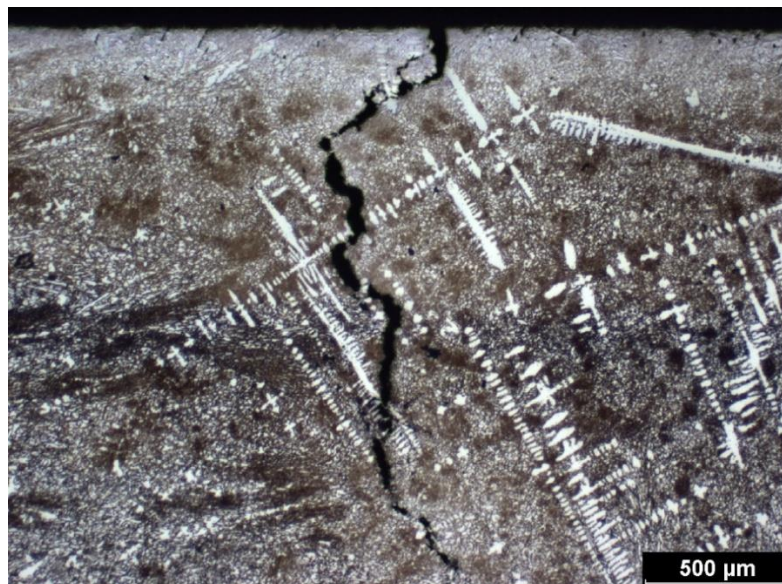


Obr. 44 Mikrostruktura povrchu materiálu EXTRA L - 1A v podélném řezu



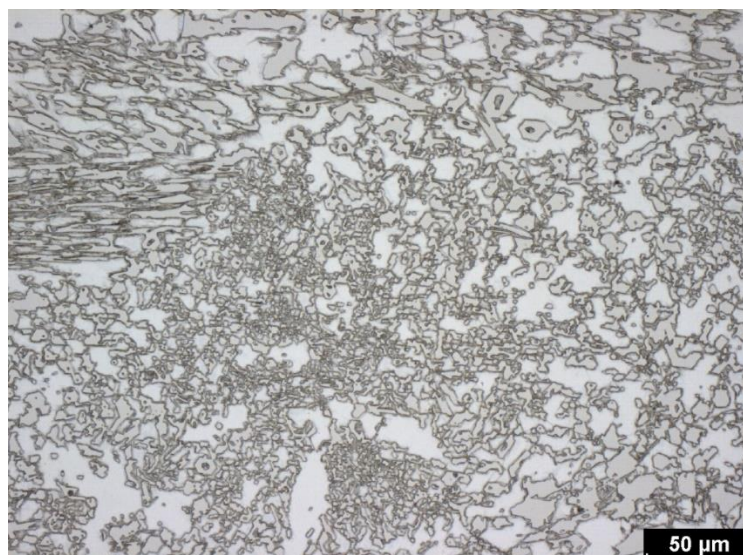
Obr. 45 Mikrostruktura povrchu materiálu EXTRA L - 1A v podélném řezu, detail

Jak již bylo patrné z Obr. 21, tento vzorek měl několik prasklin, které pravděpodobně vznikly v důsledku povrchového kalení. V PO řezu se podařilo jednu prasklinu zachytit. Na Obr. 46 je vidět, že defekt směřuje od povrchu přímo k jádru převážně po hranicích karbidů.



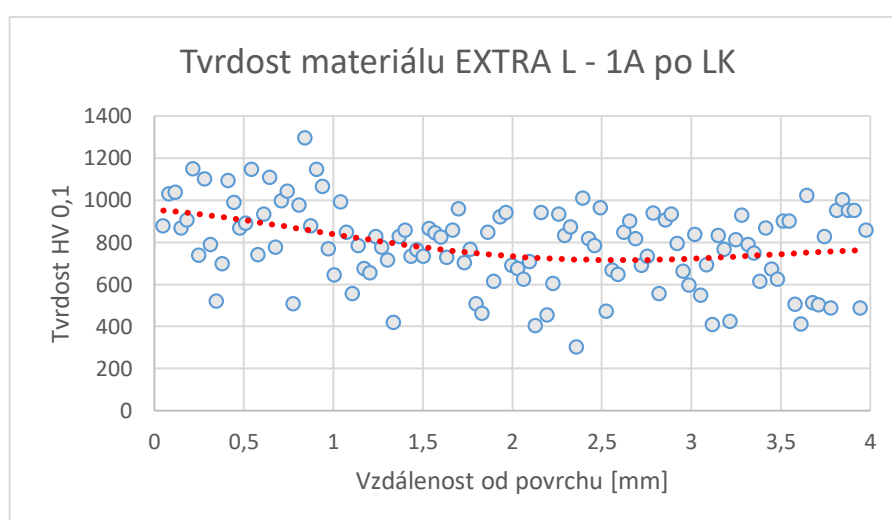
Obr. 46 Prasklina materiálu EXTRA L - 1A v podélném řezu

Mikrostruktura jádra v podélném řezu (Obr. 47) dle očekávání nevykazovala žádné odlišnosti od příčného řezu.



Obr. 47 Mikrostruktura jádra materiálu EXTRA L - 1A v podélném řezu, detail

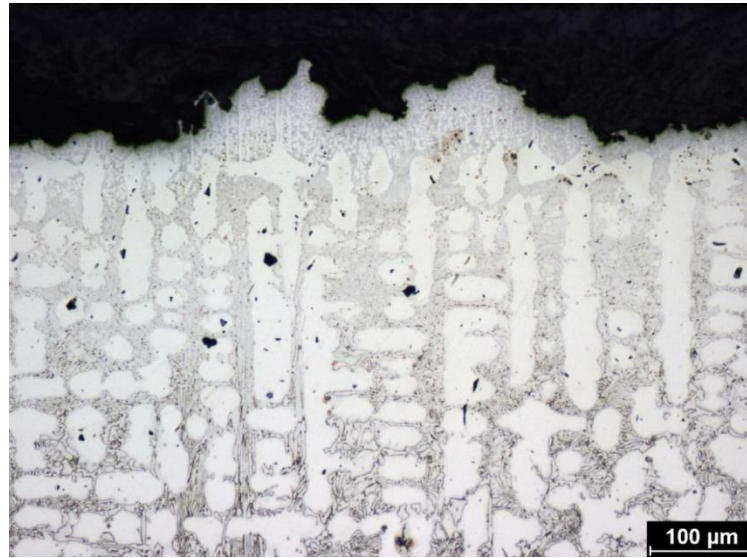
Na závěr proběhlo vyhodnocení tvrdosti dle Vickerse v podélném řezu se zatížením 0,98 N (HV 0,1). Z grafu na Obr. 48 je patrné, že povrchové kalení mělo vzhledem k tvrdosti jádra na zvýšení tvrdosti povrchu pouze malý efekt. Nárůst tvrdosti povrchové vrstvy je pravděpodobně spojen se zjemněním karbidické fáze a s transformací části austenitu na martenzit. Přibližně do hloubky 0,9 mm byly naměřeny mírně vyšší hodnoty tvrdosti. Rozdíly v hodnotách jsou obvykle způsobené tím, zda byla tvrdost měřena v místě karbidů (vyšší hodnoty) či zbytkového austenitu (nižší hodnoty).



Obr. 48 Tvrdost materiálu EXTRA L - 1A po LK

7.2.2 EXTRA L – 5

Pracovní postup byl u tohoto materiálu naprosto identický jako u EXTRA L – 1A. V PN byla opět zachycena tmavá oblast okraje laserové stopy. Na Obr. 49 a Obr. 50 je patrné, že na povrchu došlo k výraznému zjemnění dendritů primárního austenitu.

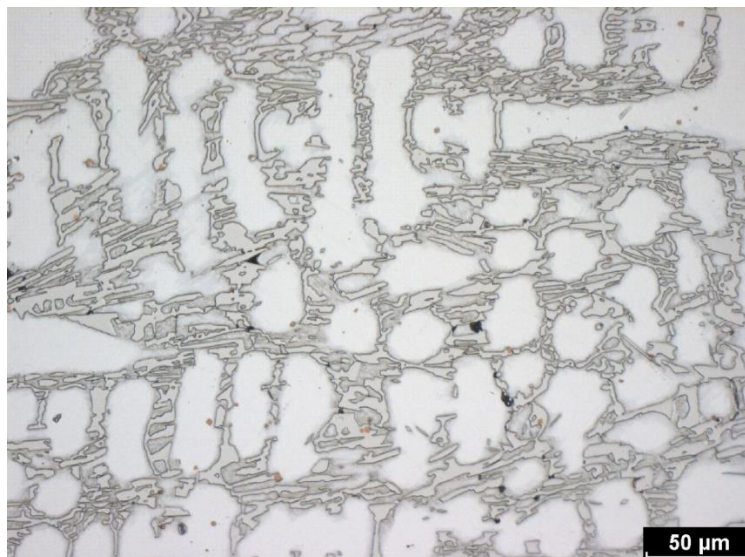


Obr. 49 Mikrostruktura povrchu materiálu EXTRA L - 5 v příčném řezu



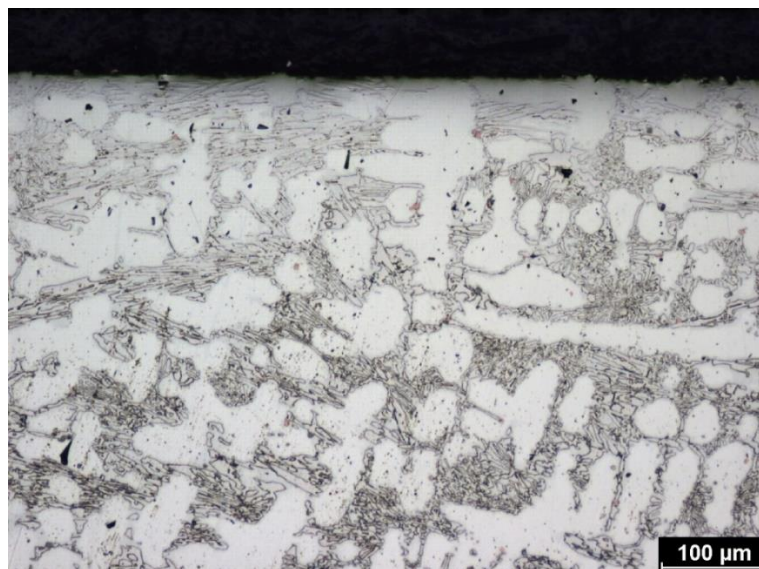
Obr. 50 Mikrostruktura povrchu materiálu EXTRA L - 5 v příčném řezu, detail

Jádro (Obr. 51) je u tohoto materiálu tvořeno dendrity primárního austenitu, eutektickými karbidy a ojedinělými nitridy v martenzitických ostrůvcích.

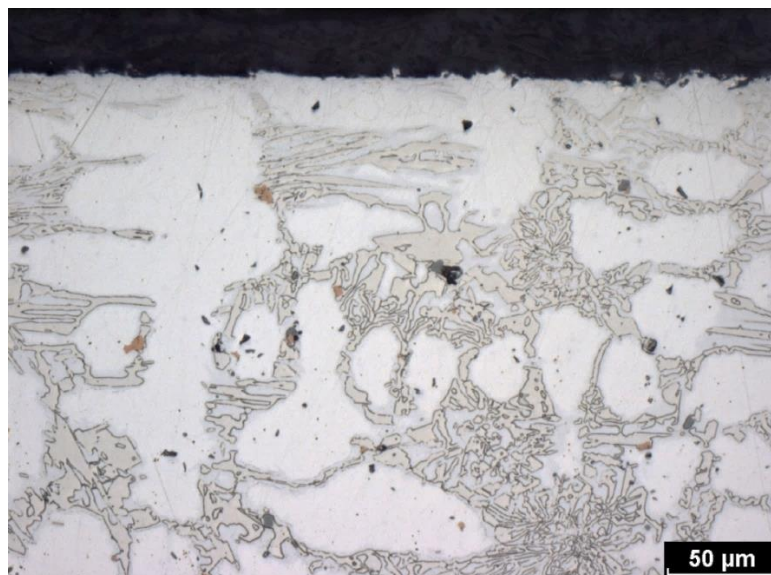


Obr. 51 Mikrostruktura jádra materiálu EXTRA L - 5 v příčném řezu, detail

V podélném řezu (Obr. 52) byla analyzována „nespálená“ povrchová vrstva. Na povrchu vznikla velmi tenká vrstva karbidů a martenzitu (Obr. 53).

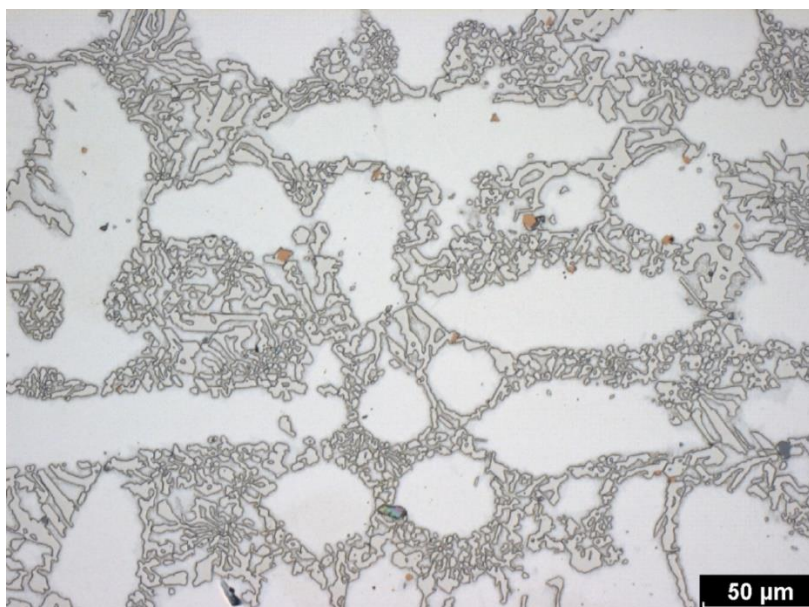


Obr. 52 Mikrostruktura povrchu materiálu EXTRA L - 5 v podélném řezu



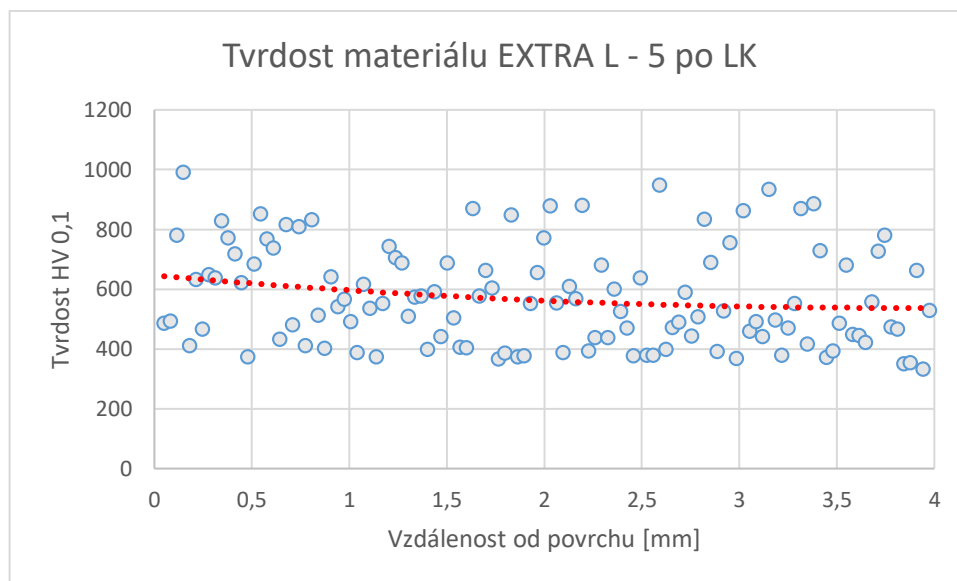
Obr. 53 Mikrostruktura povrchu materiálu EXTRA L - 5 v podélném řezu, detail

Obdobně jako u materiálu EXTRA L – 1A mělo jádro v příčném a podélném (Obr. 54) průřezu stejnou strukturu.



Obr. 54 Mikrostruktura jádra materiálu EXTRA L - 5 v podélném řezu, detail

Z grafu (Obr. 55) je viditelný mírný pokles tvrdosti směrem k jádru, ale v porovnání s materiálem EXTRA L – 1A je křivka poklesu tvrdosti mnohem lineárnější. Z Obr. 53 je patrná velmi tenká vrstva martenzitu, kterou ale vzhledem k malé vzdálenosti od povrchu nebylo možné zachytit při použitém režimu měření tvrdosti.



Obr. 55 Tvrdost materiálu EXTRA L - 5 po LK

Níže uvedená Tabulka 5 sumarizuje naměřené hodnoty tvrdostí jádra a zakalené povrchové vrstvy jednotlivých materiálů a hloubky zakalené vrstvy.

Tabulka 5 - Souhrn naměřených tvrdostí u jednotlivých materiálů

Materiál	Tvrdost jádra (HV 0,1)	Tvrdost zakalené povrchové vrstvy (HV 0,1)	Nárůst tvrdosti povrchové vrstvy (HV 0,1)	Hloubka zakalené vrstvy (mm)
ADI 900-8 po LK	380	980	600	0,6
ADI 900-8 po IK	380	1000	620	2
AGI GJL 250 po LK	365	960	595	0,7
AGI GJL 250 po IK	360	780	420	1,6
EXTRA L – 1A po LK	780	980	200	0,9
EXTRA L – 5 po LK	580	650	70	≈ 0,04

8 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo popsat nejpoužívanější druhy litin, vliv legujících prvků a různé druhy tepelného zpracování se zaměřením na povrchové kalení indukční a laserem. Získané výsledky prokazují, že kalení laserem je v případě grafitických litin alternativní a efektivní metodou zpevnění povrchu ke kalení indukčnímu. Jak při indukčním povrchovém kalení, tak při povrchovém kalení laserem došlo ke zvýšení tvrdosti na povrchu litin.

Při povrchovém kalení grafitických litin vznikla u všech čtyřech vzorků martenzitická struktura. Po indukčním povrchovém kalení se dle předpokladu dosahuje zpevnění do větší hloubky než v případě kalení laserem. Laserové kalení dosahuje mírně vyšších hodnot tvrdosti u povrchu oproti indukčně kaleným vzorkům. Hloubka zakalené vrstvy byla po indukčním kalení u ADI 900-8 přibližně 3× větší v porovnání s povrchovým kalením laserem, u AGI GJL 250 přibližně 2× větší.

Pro hodnocené druhy otěruvzdorných chromových litin je efekt povrchového kalení diskutabilní a to především s ohledem na vlastnosti základní struktury a skutečnosti, že proces laserového kalení nebyl pro tyto litiny předem optimalizován. U materiálu EXTRA L – 1A došlo ke změně struktury na povrchu, ale následně naměřená tvrdost neprokazovala velký rozdíl mezi tvrdostí povrchu a jádra. U tohoto materiálu došlo pravděpodobně v důsledku teplotních změn při povrchovém kalení k tvorbě prasklin, které směřovaly téměř kolmo od povrchu do jádra. EXTRA L – 5 vykazoval ve velmi úzké povrchové vrstvě změny mikrostruktury, ale vzhledem k malé tloušťce nemohly být při použitých parametrech měření případné změny tvrdosti zachyceny.

Potenciál pro další výzkum v oblasti aplikace laserového povrchového kalení litin je v optimalizaci parametrů procesu a jeho vlivu na strukturu, tvrdost a dosaženou hloubku zpevnění. Pro litiny s vysokým obsahem Cr by pak bylo zajímavé ověření, zda optimalizací parametrů kalicího procesu lze zabránit vzniku prasklin a současně zvýšit povrchovou tvrdost.

9 Bibliografie

1. PTÁČEK, L., KOLEKTIV. *Nauka o materiálu II.* 2. vydání. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
2. SOBOTOVÁ, J., KOLEKTIV. *Nauka o materiálu I. a II.* 1. vydání. Praha : České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-05550-2.
3. ROUČKA, J. *METALURGIE LITIN.* Brno : PC DIR , 1998. ISBN 80-214-1263-1.
4. SKÁLOVÁ, J., KOUTSKÝ, V., MOTYČKA, V. *Nauka o materiálech.* 3. vydání. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2003. ISBN 80-7043-244-6.
5. HOŘEJŠ, J., BERNÁŠEK, V. *Technologie slévání.* 2. vydání. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2000. ISBN 80-7082-640-1.
6. VOJTĚCH, D. *Kovové materiály.* Praha : Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
7. MORES, A., HORNÍK, J., SKRBK, B., NĚMEC, M., KRČIL, J. Povrchové laserové kalení litiny s kuličkovým grafitem s různými výchozími strukturami. *Slévárenské dny.* Brno : 2019.
8. KONTOROVICH, I., E. *Tepelné zpracování ocelí a litin.* Praha : Průmyslové vydavatelství, 1952.
9. KARANTZALIS, E., LEKATOU, A., MAVROS, H. *Microstructure and properties of high chromium cast irons: effect of heat treatments and alloying additions.* místo neznámé : International Journal of Cast Metals Research , 2009.
10. GÁBRIŠOVÁ, Z., BRUSILOVÁ, A. *Tepelné spracovanie - Návody na cvičenia.* Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2019.
11. MUŽÍK, T. *Kalení laserem, Sborník Rychlé ohřevy v TZ, indukční kalení, elektronový paprsek.* Praha, 25. 04. 2019.
12. Bodycote. [Online] [Citace: 21. 02. 2020.] <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelné-zpracování/kalení-popuštění-zuslechtní/indukční-kalení/>.
13. BULLING, D. Tribotechnika. [Online] [Citace: 18. 02. 2020.] <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22012/laserove-kaleni-proces-s-velkym-potencialem.html>.
14. SCHUBERT, S. *MM.* [Online] 11. 07. 2011. [Citace: 10. 02. 2020.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/kaleni-laserem-urychluje-vyrobu-soucasti-a-nastroju.html>.
15. LASCAM. [Online] 09. 05. 2017. [Citace: 10. 02. 2020.] <https://www.lascam.cz/kaleni-laserem/>.

16. KEREČANINOVÁ, Z., ŘASA, J. MM. [Online] [Citace: 20. 02. 2020.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil.html>.
17. LINTTECH. [Online] [Citace: 12. 02. 2020.] <https://www.lintech.cz/produkty/laserove-technologie/laser-podle-technologie/co2-laser/>.
18. KOŘÁN, P. LAO. [Online] 19. 02. 2013. [Citace: 10. 02. 2020.] <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>.
19. ŠMÍD, J. MM. [Online] 31. 07. 2008. [Citace: 12. 02. 2020.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl.html>.
20. NOVÁK, M. MM. [Online] 04. 09. 2012. [Citace: 20. 02. 2020.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>.
21. NOVÁK., M. LAO. [Online] 15. 03. 2011. [Citace: 20. 02. 2020.] <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>.
22. MOHAMED, ADEL, K., MAHMOUD, MUZHER, T. *LASER SURFACE HARDENING OF DUCTILE CAST IRON*. Diyala-Baqouba : Faculty of Engineering , Diyala University, 2013. ISSN 1310-3946.
23. Technologie, stroje a zařízení. [Online] [Citace: 22. 02. 2020.] <http://techstroj.g6.cz>.
24. ELUC. [Online] [Citace: 01. 03. 2020.] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1105>.
25. JAGER, A., GARTNEROVA, V. FZU. [Online] [Citace: 02. 03. 2020.] <https://www.fzu.cz/popularizace/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>.
26. FZU. [Online] [Citace: 02. 03. 2020.] http://jointlab.upol.cz/soubusta/OSYS/El_mikr/El_mikr.html.
27. NEBESÁŘOVÁ, J. Elektronová mikroskopie pro biology. [Online] 2001. [Citace: 24. 07. 2020.] <http://triton.paru.cas.cz/old-lem/book/Podkap/7.2.html>.
28. KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V., VOJTĚCH, D. *Úvod do studia materiálů*. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
29. MORES, A., NOVÁK, P., PROVAZNÍK, J., NĚMEC, M. *Opravné svařování odlitků z otěruvzdorných litin s vysokým obsahem chromu*.

10 Seznam obrázků

Obr. 1 Rovnovážný metastabilní diagram Fe - Fe ₃ C [2]	10
Obr. 2 Rovnovážný stabilní diagram Fe - C (v porovnání s metastabilním) [2]	10
Obr. 3 Lupínkový grafit [3]	12
Obr. 4 Kuličkový grafit [3]	13
Obr. 5 Červíkovitý grafit [3]	14
Obr. 6 Vločkovitý grafit [3]	16
Obr. 7 Způsoby žíhání grafitických litin[1]	20
Obr. 8 Princip laseru LPSS [18]	28
Obr. 9 Princip laseru DPSS [18]	28
Obr. 10 Princip vláknového laseru [18]	29
Obr. 11 Princip zkoušky tvrdosti dle Rockwella [24]	33
Obr. 12 Princip zkoušky tvrdosti dle Vickerse [24]	34
Obr. 13 Princip zkoušky dle Brinella [24]	35
Obr. 14 Porovnání světelného mikroskopu s elektronovými [25]	36
Obr. 15 Princip TEM [26]	37
Obr. 16 Princip SEM [26]	38
Obr. 17 Různé typy mikrostruktur [28]	39
Obr. 18 Dispersita lamelárního perlitu [3]	40
Obr. 19 Snímek mikrostruktury materiálu EXTRA L - 5 ve výchozím stavu [29]	44
Obr. 20 Snímek mikrostruktury materiálu EXTRA L - 5 ve výchozím stavu, detail [29]	45
Obr. 21 Původní vzorek materiálu EXTRA L - 1A	46
Obr. 22 Původní vzorek materiálu EXTRA L - 5	47
Obr. 23 Mikrostruktura LK povrchu materiálu ADI 900-8	47
Obr. 24 Mikrostruktura LK povrchu materiálu ADI 900-8, detail	48
Obr. 25 Mikrostruktura LK jádra materiálu ADI 900-8, detail	48
Obr. 26 Trajektorie vpichů při měření tvrdosti dle Vickerse	49
Obr. 27 Tvrdost materiálu ADI 900-8 po LK	49
Obr. 28 Mikrostruktura IK povrchu materiálu ADI 900-8	50
Obr. 29 Mikrostruktura IK povrchu materiálu ADI 900-8, detail	50

Obr. 30 Mikrostruktura IK jádra materiálu ADI 900-8, detail.....	51
Obr. 31 Mikrostruktura IK přechodu ADI 900-8	51
Obr. 32 Tvrdost materiálu ADI 900-8 po IK	52
Obr. 33 Mikrostruktura LK povrchu materiálu AGI GJL 250	52
Obr. 34 Mikrostruktura LK povrchu materiálu AGI GJL 250, detail.....	53
Obr. 35 Mikrostruktura LK jádra AGI GJL 250, detail	53
Obr. 36 Tvrdost materiálu AGI GJL 250 po LK	54
Obr. 37 Mikrostruktura IK povrchu materiálu AGI GJL 250.....	54
Obr. 38 Mikrostruktura IK povrchu materiálu AGI GJL 250, detail.....	55
Obr. 39 Mikrostruktura IK jádra AGI GJL 250, detail	55
Obr. 40 Tvrdost materiálu AGI GJL 250 po IK	56
Obr. 41 Mikrostruktura povrchu materiálu EXTRA L - 1A v příčném řezu	57
Obr. 42 Mikrostruktura povrchu materiálu EXTRA L - 1A v příčném řezu, detail	57
Obr. 43 Mikrostruktura jádra materiálu EXTRA L - 1A v příčném řezu, detail	58
Obr. 44 Mikrostruktura povrchu materiálu EXTRA L - 1A v podélném řezu	58
Obr. 45 Mikrostruktura povrchu materiálu EXTRA L - 1A v podélném řezu, detail	59
Obr. 46 Prasklina materiálu EXTRA L - 1A v podélném řezu.....	59
Obr. 47 Mikrostruktura jádra materiálu EXTRA L - 1A v podélném řezu, detail	60
Obr. 48 Tvrdost materiálu EXTRA L - 1A po LK	60
Obr. 49 Mikrostruktura povrchu materiálu EXTRA L - 5 v příčném řezu.....	61
Obr. 50 Mikrostruktura povrchu materiálu EXTRA L - 5 v příčném řezu, detail.....	61
Obr. 51 Mikrostruktura jádra materiálu EXTRA L - 5 v příčném řezu, detail.....	62
Obr. 52 Mikrostruktura povrchu materiálu EXTRA L - 5 v podélném řezu.....	62
Obr. 53 Mikrostruktura povrchu materiálu EXTRA L - 5 v podélném řezu, detail.....	63
Obr. 54 Mikrostruktura jádra materiálu EXTRA L - 5 v podélném řezu, detail.....	63
Obr. 55 Tvrdost materiálu EXTRA L - 5 po LK.....	64